

N° d'ordre :05/1016-M/GC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DES SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

Faculté de Génie Civil



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MAGISTER**

En : GENIE CIVIL

Spécialité : Construction

Par : BENISSAD SEKOURA

Sujet

Détection des fissures à l'aide de la méthode des éléments finis et des réseaux de neurones.

Soutenu publiquement, le 09/03/2016, devant le jury composé de :

M. D.Benouar	Professeur à l' USTHB	Président
M. M.Chabaat	Professeur à l' USTHB	Directeur de Mémoire
M. K.Aoudjane	Maitre de Conférence/A à l' USTHB	Examineur
M. M.Touati	Maitre de Conférence/A à l' USTHB	Examineur
M. A.Kibboua	Maitre de Recherche/A au CGS	Examineur

Résumé

La détection et la caractérisation d'un défaut sont l'un des problèmes les plus rencontrés dans la plupart des secteurs industriels, aéronautique et nucléaire, car ces derniers se sont trouvés devant l'obligation de se doter de techniques les plus avancées pour se renseigner des caractéristiques physiques et géométriques des différents matériaux. Pour choisir la technique la mieux adaptée à une application, un certain nombre de critères peuvent être pris en compte tel que la facilité de mise en œuvre de la technique et son faible coût. Parmi ces techniques de CND (Contrôle Non Destructif), celle des Courants de Foucault (CF) est largement utilisée industriellement en raison principalement de son caractère non polluant. Elle est très sensible aux défauts de type « fissures » situés à la surface ou à l'intérieur de la structure inspectée. À cet égard, nous avons proposé d'étudier et de résoudre un problème de CND par la technique des CF. Le développement de modèles mathématiques décrivant ces systèmes permet, à travers des simulations numériques, à la fois de comprendre les résultats expérimentaux et de concevoir des systèmes plus performants. Pour ce développement, la méthode des éléments finis a été exploitée dans ce travail pour générer un tel modèle mathématique dont l'objectif est de simuler l'interaction capteur pièce à tester. Ce travail comprend un aperçu général sur les différentes techniques de CND ainsi que les différentes méthodes de résolution des problèmes directs et inverses des systèmes (CND-CF). Il est suivi par une étude comparative entre deux types de défaut, ainsi qu'une illustration de l'influence de l'effet de quelques caractéristiques du défaut conducteur tel que l'effet de la géométrie de défaut. À la fin, un modèle inverse a été élaboré en utilisant les réseaux de neurones artificiels RNA a fin de reconstituer la géométrie d'un défaut à partir des données obtenues à travers le problème direct élaboré dans la première partie.

Mots clés : Contrôle non Destructif, Eléments Finis, Capteur, Courants de Foucault, Problème Direct, Problème Inverse, Réseaux de Neurones Artificiels.

Abstract

The detection and characterization of a defect is one of the problems most frequently encountered in numerous industrial sectors, aerospace and nuclear, because they were faced with the obligation to acquire the most advanced techniques for obtaining information of the physical and geometric characteristics of the different materials. In order to choose the best technique suited for an application, a number of criteria can be taken into account such as the ease of implementation of the technique and its low cost. Among these NDT techniques, the eddy currents (EC) one is the most commonly used industrially because of its environmental friendliness. It is very sensitive to defects such as «cracks» being on the surface or inside the inspected structure. In this respect, we have proposed to study and resolve a NDT problem using the EC method. The development of mathematical models describing these systems allows, through numerical simulations, to compare and both the experimental results and to design more efficient systems. For this development, the finite element method will be exploited in the present work to build such a mathematical model that serves to simulate the interaction between the sensor and the tested piece. This work comprises a survey of various NDT techniques as well as the different methods of solving direct and inverse problems of EC-NDT systems. Afterwards, a comparative study between a defect with lack of material and a conductor defect with finished conductivity such as micro welding, burning..., as well as an illustration of the impact of the effect of some characteristics of the conductor defect such as the effect of the default geometry effect. At the end, an inverse model has been elaborated using the artificial neural networks (ANN) so as to reconstitute the defect geometry from the data obtained through the direct problem developed in the first part.

Key words: Non-Destructive Testing, Finite Elements, Sensor, Eddy Current, Problem Inverse Direct, Artificial Neural Networks

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce présent travail.

J'adresse à cet effet mes remerciements à :

Mr. M. Chabaat, directeur de ce mémoire, pour m'avoir dirigé tout au long de sa réalisation.

Ainsi que tous mes membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner ce travail.

À la mémoire de ma grand mère

YAYA SEKOURA.....

Sommaire

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>iii</i>
<i>Liste de Figures</i>	<i>iv</i>
<i>Liste de Symboles</i>	<i>v</i>

Introduction Générale	1
-----------------------	---

Chapitre I

Contrôle Non Destructif et la mécanique de la rupture

Introduction	4
I.1 Différents défauts détectés en CND	5
I.1.1 Défauts de surface	5
I.1.2 Défauts interne	5
I.2 Techniques de CND et concepts généraux	6
I.2.1 Procédés optiques	7
2.1.1 Examen visuel	7
2.1.2 Ressuage	7
2.1.3 Champ d'application	8
2.1.4 Avantages et inconvénients	9
I.2.2 Procédés à flux de fuite magnétique	9
2.2.1 Principe et base physique	9
2.2.1.1 Magnétoscopie	10
2.2.1.2 Magnétographie	10
2.2.2 Champ d'application	11
2.2.3 Avantages et inconvénients	11
I.2.3 Procédés à ultrasons	12
2.3.1 Bases physiques du contrôle ultrasonore	12
2.3.2 Champ d'application	13
2.2.3 Avantages et inconvénients	13

I.2.4 Procédés radiographiques	14
I .2.4.1 Radiographie	14
4.1.1 Principe et bases physiques de la radiographie	14
4.1.2 Champ d'application	14
4.1.3 Avantages et inconvénients	14
I.2.4.2 Thermographie	15
4.2.1 Principe et bases physiques de la thermographie	15
4.2.2 Champ d'application	16
4.2.3 Avantages et inconvénients	16
I .2.5.Procédés électromagnétiques	16
I.2.5.1 Principe de la détection par courant de Foucault	16
I.2.5.2 Effet de peau	18
I.2.5.3 Différents types de capteurs	19
5.3.1 Classification selon la géométrie	19
5.3.2 Classification selon la fonction	20
5.3.3 Classification selon le mode de contrôle	22
I.2.5.4 Modes d'excitation	22
I.2.6 Plan d'impédance normalisée	24
I.3 Avantages et limites de la technique par courant de Foucault	26
I.4 Evaluation non destructive	26
I.5 Mécanique de la rupture	27
I.5.1 Définitions	27
I.5.2 Facteurs d'intensité de contrainte	28
I.5.3 Evaluation du F.I.C	30
I.5.3.1 Extrapolation des déplacements	31
I.5.3.2 Intégrale de contour « Intégrale J »	33
I.5.3.3 Intégrale d'interaction	34
Conclusion	38

Chapitre II

Formulation du problème par la méthode des éléments finis d'un capteur inductif à CF

Introduction	39
II.1 Phénomènes électromagnétiques	40
II.1.1 Historique	40
II.1.2 Equations de l'électromagnétisme	40
II.1.3 Les équations de Maxwell	40
II.1.4 Changement de milieu	43
II.1.5 Hypothèses simplificatrices	44
II.1.6 Résolution des équations de Maxwell	44
II.1.6.1 Formulation en termes de potentiel vecteur	45
II.1.7 Modèle en 2D	46
II.1.8 Équation électromagnétique d'un système axisymétrique	48
II.1.9 Méthodes de résolution	49
II.1.9.2 Méthodes numériques	50
1.9.2.1 Méthode de Galerkin	52
II.1.9.2 Conditions aux limites et conditions d'interfaces	53
II.1.9.3 Résolution du système	54
9.3.1 Discrétisation du domaine	55
9.3.2 Maillage en éléments triangulaires linéaires	55
II.1.10 Formulation éléments finis des équations électromagnétiques	55
1.10.1 Équation électromagnétique linéaire	55
II.1.11 Calcul de l'impédance	58
II.2 Applications et simulations	61
II.2.1 Modèle proposé	64
II.2.2 Maillage du domaine d'étude	65
II.2.3 Simulation d'un (capteur-tube magnétique) avec défaut externe	66
II.2.4 Interprétation des résultats	69
Conclusion	72

Chapitre III

Les problèmes inverses

Introduction	73
III.1 Problèmes inverses	73
III.1.1 Inversion itérative	74
III.1.2 Inversion directe	75
III.2. Méthodes de résolution des problèmes inverses	76
III.2.1 Les algorithmes génétiques	76
III.2.1.1 Concept de base	76
III.2.2 Les algorithmes de colonies de fourmis	77
III.2.3 Méthodes de descente	78
III.2.3.1 Méthodes du gradient	79
III.2.3.2 Méthodes du gradient conjugué	79
III.2.4 Essaims particulières	79
III.2.5 L'algorithme du simplex	80
III.2.6 Recherche tabou	81
III.2.7 Méthode des réseaux de neurones	81
III.2.7.1 Cerveau et neurones biologiques	81
III.2.7.2 Neurone artificiel (formel)	84
III.2.7.3 Fonction d'activation	85
III.2.7.4 Composition d'un réseau de neurones	86
III.2.7.5 Architecteur d'un réseau de neurones	87
III.2.7.6 Apprentissage d'un réseau de neurones	88
III.2.7.6.1 Type d'apprentissage	89
III.2.7.7 Différents types de réseaux	90
III.2.7.7.1 Réseaux à une seule couche	90
III.2.7.7.2 Limitation des réseaux à une seule couche	93
III.2.7.7.3 Réseaux Multicouches	93
III.2.7.8 Algorithmes d'apprentissage du perceptron multicouche	96
III.2.7.9 Capacité de généralisation	97
Conclusion	98

Chapitre VI

Application des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts

Introduction	99
IV.1 Mise en application des réseaux de neurones	99
IV.1.1 Le choix du type de réseau de neurones	99
IV.1.2 Le choix de la stratégie d'apprentissage	100
IV.1.3 Le choix de la fonction coût	100
IV.1.4 Elaboration de la base de données pour l'apprentissage	101
IV.2 Reconstitution d'un défaut	101
IV.2.1 Validation et tests	102
IV.2.2 Application	104
IV.2.2.1 Estimation du défaut : Mise en œuvre de méthodes d'inversion	104
1.1 Bases de données	105
1.2 Inversion par RN MLP	105
Conclusion	108
Conclusion générale	109
Annexes	
Bibliographie	

LISTE DES SYMBOLES

f :	fréquence	Hz
n :	nombre de spires	
r :	rayon	m(mm)
s :	section	mm ²
w :	énergie des courants de Foucault	JSm ⁻¹
(x, Y ,z):	coordonnées cartésiennes	
(r, z, φ)	coordonnées cylindriques	
A:	potentiel vecteur magnétique	Wbm ⁻²
B:	vecteur induction magnétique	T
E :	vecteur champ électrique	Vm ⁻¹
I:	intensité des courants	A
H :	vecteur champ magnétique	Am ⁻¹
J :	vecteur densité de courant	Am ⁻²
Js :	densité de courant imposé dans l'inducteur.	Am ⁻²
Jind :	densité du courant induit.	Am ⁻²
R :	résistance électrique	Ω
P:	puissance active	W
T:	période	S
X :	réactance	Ω
Z:	impédance	Ω
V:	potentiel scalaire électrique	V
δ:	profondeur de pénétration des courants de Foucault	mm
φ :	potentiel magnétique total scalaire	A
Φ :	Potentiel scalaire électrique	A
μ :	Perméabilité absolue des matériaux	Hm ⁻¹
μ_0	Perméabilité du vide.	Hm ⁻¹
μ_r	Perméabilité relative du milieu considéré.	Hm ⁻¹

Liste des symboles

ρ :	Résistivité des matériaux	Ωm
σ :	conductivité des matériaux	Sm^{-1}
ω :	pulsation des grandeurs électriques	rd/s
ε_0	Permittivité de l'air.	
ε_r	Permittivité relative du milieu considéré.	
KI	facteur d'intensité de contrainte mode I	
KII	facteur d'intensité de contrainte mode II	
σ_{ij}	Tenseurs de contraintes et de déformations	
ε_{ij}	Tenseurs de déformations	
W	La densité d'énergie de déformations	
E *	module de Young	
v	coefficient de poisson.	
J	L'intégrale de contour.	
κ	constante de kolosov	
λ, μ	coefficients de lamé	

Liste des figures

Figure I.1 : Principe du ressuage	8
Figure I.2 : Principe de la magnétoscopie	10
Figure I.3 : Principe des ultrasons	10
Figure I.4 : Principe de la radiographie	14
Figure I.5 : Principe thermographie	15
Figure I.6 : Principe CND par courants de Foucault	17
Figure I.7 : Répartition des Courants de Foucault pour la pièce	18
Figure 1.10 : Effet de peau	19
Figure I.9 : Classification des bobines selon la géométrie	19
Figure I.10: Sonde à double fonctions	19
Figure I.11 : Sonde à fonction séparées	21
Figure I.12: Sonde différentielle	21
Figure I.13: Mode différentiel	22
Figure I.14 Mesure de la variation d'impédance du capteur	24
Figure 1.16: Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique)	25
Figure I.16 : Problème direct et problème inverse	27
Figure I.17 : Modes d'ouvertures des fissures	28
Figure I.18 : Champ des contraintes au voisinage de la fissure	28
Figure I.19 : Extrapolation des déplacements en deux points	32
Figure I.20 : Contour indépendant de l'intégrale J	33
Figure I.21 : Contour indépendant de l'intégrale J	34
Figure II.1 : Interface entre deux milieux différents	43
Figure II.2 : Géométrie du dispositif en 2D	47
Figure II.3 : Dispositif axisymétrique	48
Figure II.4 : Organigramme de la résolution du problème électromagnétique	64
Figure II.5 : Domaines de résolution	65
Figure II.6 : Maillage du domaine de résolution	67
Figure II.7 : La répartition du potentiel magnétique A	68
Figure II.8 : La variation de l'impédance Z pour les deux fissures	69
Figure II.10 : La variation de l'impédance Z pour la fissure triangulaire	70
Figure III.1 : Problème direct et inverse	74

Figure III.2 : Opérateur de croisement	77
Figure III.3 : Opérateur de mutation	77
Figure III.4 : Opérations de base des algorithmes du simplex	80
Figure III.6 : Neurone biologique	83
Figure III.7 : Représentation d'un neurone artificiel	85
Figure III.8 : Fonction sigmoïde	85
Figure III.9 : Fonction seuil	85
Figure III.10 : Fonction saturation	86
Figure III.11 : Fonction gaussienne	86
Figure III.12 : Composition d'un réseau de neurones	87
Figure III.13 : Exemples de RN : a) non bouclé, b) bouclé	88
Figure III.14 : Schéma général de l'apprentissage d'un RN	88
Figure III.15 : Apprentissage supervisé	89
Figure III.16 : Apprentissage non supervisé	90
Figure III.17 : Réseau à une seule couche	91
Figure III.18 : Le schéma du Perceptron	91
Figure III.19 : Schéma de classification	92
Figure III.20 : Représentation géométrique du problème XOR	93
Figure II.21 : Structure d'un réseau de Kohonen à 2 entrées et 5 neurones concurrents	94
Figure III.22 : Structure d'un réseau de Hopfield	94
Figure III.23 : Architecture du perceptron multicouche	95
Figure III.24 : Illustration de la validation croisée	98
Figure IV.1 : Type du réseau de neurones	100
Figure IV.2 : Organigramme de l'entraînement du réseau de neurones	103
Figure IV.3 : Inversion par RN	105
Figure VI.4 : EQM sur les bases d'apprentissage et de validation	106
Figure VI.5 : La corrélation entre la sortie désirée et la sortie du réseau	107
Figure IV.6 : Profil du défaut réel et celui estimé par RN	108

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie, les exigences de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité d'un produit ne cessent de s'intensifier notamment dans l'aéronautique et le nucléaire, d'où la nécessité d'une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constituent. Cette connaissance implique en particulier la réalisation des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci justifie l'importance croissante que prend le Contrôle Non Destructif (CND).

Les techniques de CND sont diverses (les ultrasons, rayons X, radiographie, ressuage, Courants de Foucault (CF)...). Le choix de l'une entre elles dans une application dépend à la fois de la nature du matériau, de la précision requise, de la géométrie à contrôler et le contexte économique (coût). Ces techniques peuvent être classées en deux familles : les techniques de volume et techniques de surface, c'est en surface ou proche de la surface des pièces que sont amorcées la majorité des ruptures (défauts). C'est pour cette raison que ces dernières sont largement appliquées. Parmi elles, le Contrôle par Courants de Foucault (CF) y prend une place privilégiée.

Le principe du CND par Courant de Foucault (CF) est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Lorsqu'une cible conductrice est approchée d'une bobine alimentée en courant alternatif, des courants sont induits de façon qu'ils créent un champ réactif opposant au champ source. L'impédance aux bornes du capteur est ainsi modifiée.

Le but principal de la modélisation des Courants Foucault est d'arriver à des modèles directs qui établissent une réponse en fonction des caractéristiques géométriques et électromagnétiques de la pièce et celles des défauts éventuellement présents. Ces modèles sont basés sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique. Les méthodes analytiques demandent un temps de développement considérable et un traitement particulier pour chaque configuration géométrique. Or, l'évolution rapide de l'informatique et des techniques de calcul a contribué à résoudre ce problème. La méthode numérique la plus utilisée est la Méthode des Eléments Finis (MEF) puisqu'elle permet de prendre en compte les géométries complexes de sonde et de pièces. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les phénomènes électromagnétiques.

La connaissance de la forme du défaut est un paramètre très important pour l'ingénieur, afin de lui permettre de décider de l'avenir de la pièce. La plupart des méthodes de CND ne nous renseignent pas suffisamment sur la forme du défaut. Actuellement il y a une forte demande pour une caractérisation plus quantitative que qualitative des défauts. Dans ce cas on parle plus souvent d'une évaluation non destructive ou du problème inverse, généralement difficile à résoudre.

La difficulté de l'étude des problèmes inverses c'est qu'elle demande souvent une bonne connaissance du problème direct, ce qui se traduit par le recours à une grande variété de notions tant physique que mathématique. Il existe toutefois quelques techniques qui possèdent un domaine d'application étendu tel que : la méthode des réseaux de neurones, qui ne nécessite pas une grande connaissance de ces notions. Une méthode que nous allons mettre en œuvre, afin de satisfaire aux besoins d'une évaluation non destructive.

Ce choix est motivé par la capacité des réseaux de neurones de modéliser aussi bien de façon linéaire que non linéaire, les relations entre les données présentées à son entrée et les sorties désirées. Le réel pouvoir des réseaux de neurones réside dans leur capacité d'apprendre ces relations directement à partir des données modélisées sous forme d'exemples.

En se basant sur une étude concernant le contrôle non destructif par courant de Foucault, cette technique qui offre la possibilité d'un contrôle sans contact entre le capteur et la pièce ainsi que le déplacement rapide de ce capteur sur la pièce, font d'elle une technique appréciée.

L'objectif de ce travail est l'étude d'un dispositif de contrôle par courants de Foucault à travers une simulation d'un capteur type sonde à double fonction pour deux types de matériaux magnétique et amagnétique, qui présentent un défaut. La résolution des équations formulées s'est faite par la méthode des éléments finis implantés sur environnement MATLAB.

Le premier chapitre est consacré à exposer un état de l'art du contrôle non destructif par Courant de Foucault après une revue générale des différentes techniques utilisées dans le (CND), objet de notre recherche. Par ailleurs, un historique sur la mécanique de la rupture ainsi que les méthodes anciennes [1] (Sneddon, Irwin) et récentes (Utilisation de l'extrapolation de déplacement et de l'intégral d'interaction) [2] concernant le calcul des facteurs d'intensité K_i .

Le deuxième chapitre traite les principales lois des phénomènes électromagnétiques (équations de Maxwell) et fait aussi l'objet d'une présentation des méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles. Par ailleurs, un intérêt particulier est consacré à la méthode des éléments finis avec une formulation de résidus pondérés afin de résoudre l'équation magnétodynamique en utilisant l'algorithme de calcul sous le logiciel « environnement MATLAB ».

Le troisième chapitre est entièrement dédié aux problèmes inverses ainsi que les méthodes d'inversion généralement utilisées en évaluation non destructive. Nous nous attarderons sur la méthode des réseaux de neurones qui fera l'objet de notre étude.

Le quatrième chapitre est consacré à la caractérisation de fissures à partir de techniques d'inversion. Il constitue donc le dernier maillon de la stratégie globale de la caractérisation des fissures. Après identification des paramètres physiques et modélisation de la fissure accomplies dans les chapitres précédents, une base de données est ainsi construite, et pouvant remplacer les mesures expérimentales. Une inversion de données réalisée par réseau de neurones nous permet ainsi de caractériser complètement un défaut.

Une conclusion et des perspectives sont données en guise de finalisation de notre recherche. Par ailleurs, une bibliographie assez fournie et récente précédant les annexes.

Annexes

Introduction

L'histoire du Contrôle Non Destructif (CND) a commencé à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) consistent à établir l'état d'intégrité d'une structure, appelée structure « cible », sans la dégrader. Généralement peu connue du grand public, cette problématique répond néanmoins à des enjeux sociaux majeurs, tels que la sécurité des systèmes industriels et des personnes, l'optimisation des cycles de maintenance et le développement durable. Ces techniques sont exploitées dans de très nombreux secteurs industriels, dont les secteurs nucléaires et aéronautiques, pour des raisons de sécurité évidentes, mais également pour des raisons économiques. En effet, une connaissance fine de l'état d'intégrité d'une structure peut permettre de prolonger sa durée de vie, éventuellement au-delà de la durée initialement prévue, tout en maintenant un degré de fiabilité élevé.

En Evaluation Non Destructif CND et en END, il existe une grande variété de techniques, chacune possédant ses propres contraintes d'utilisation et ses applications privilégiées. Pour choisir la technique là mieux adaptée à une application, un certain nombre de critères peut être pris en compte, tels que la facilité de mise en œuvre de la technique, la précision du système et son coût.

La connaissance des grandeurs du défaut s'avère être un paramètre clé pour la compréhension de **la mécanique de rupture** de matériaux causée par ce type de défauts [3,4]. En conséquence, il existe une forte demande pour une caractérisation plus quantitative que qualitative des défauts.

Ce chapitre sera réparti en deux parties, dans la première partie nous allons rappeler les différentes techniques exploitées par l'industrie du CND, ensuite nous allons définir

l'évaluation non destructive, dans la seconde nous présentons la mécanique de la rupture et calcul de facteur d'intensité K par méthodes de l'extrapolation de déplacement et l'intégral d'interaction

1.1 Différents défauts détectés en CND

Détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité des matières, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Ça peut être des porosités, criques, rivets, soudures, fissures, délaminages, corrosion, collages, taux de fibre /matrice, décohésion fibre matrice, cotation, forme. D'habitude on classe les défauts en deux grandes catégories liées à leurs emplacements : les défauts de surface, les défauts internes.

1.1.1 Défauts de surface

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visible à l'œil nu, on peut les classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

a) Défauts ponctuels : correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement capables de provoquer la rupture de la pièce à long terme, par exemple en initiant des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leurs profondeurs dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi des méthodes non destructives sensibles pour leur détection, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

b) Défauts d'aspect : correspondent à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, et on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

1.1.2 Défauts internes

Ce sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimension extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Dans les industries de métaux, il s'agit de criques internes, de porosités, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie.

1.2 Techniques de CND et concepts généraux

Les techniques CND sont diverses et peuvent être classées en plusieurs procédés :

- ✓ Procédés optiques : l'examen visuel, le ressuage ;
- ✓ Procédés à flux de fuite magnétique
- ✓ Procédés à ultrasons ;
- ✓ Procédés radiographiques.
- ✓ Procédés électromagnétiques : les courants de Foucault, les bruits de Barkhausen;

Le choix d'une entre elles peut-être conditionné par un certain nombre de paramètres dont les principaux sont :

- ✓ La nature du matériau à contrôler (propriétés physiques) ;
- ✓ L'information recherchée (détection, mesure, dimensionnement du défaut, ...etc.) ;
- ✓ L'environnement du contrôle (nature des perturbations externes, ...etc.) ;
- ✓ Le type de contrôle à effectuer (pièce mobile, possibilité de contact ou non, ...etc.) ;
- ✓ Contraintes économiques.

Dans ce paragraphe, les diverses techniques mises en œuvre pour le contrôle sont brièvement présentées en précisant pour chaque type, ses propres caractères, ses possibilités et ses limitations.

1.2.1 Procédés optiques

Les procédés optiques regroupent l'examen visuel et la technique de ressuage[5 - 7].

2.1.1 Examen visuel

C'est le plus ancien du contrôle non destructif. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures telles que : les conditions de l'éclairage et la limitation de l'œil.

Afin de remédier à ce genre de problème, généralement on a recours à des appareils d'aides optiques à la vision :

- ✓ ***Appareils optiques classiques*** :Loupes, verres grossissants, microscopemétallographique, Microscopes Electroniques à Balayage (MEB).
- ✓ ***Appareils optiques spécifiques*** : Endoscope, le stroboscope.

2.1.2Ressuage

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité où il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation [5, 7]. Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux trois phases illustrées sur la Figure I.1.

L'un des intérêts de cette technique réside dans la simplicité de sa mise en œuvre, aussi le fait qu'il s'agisse d'une méthode globale, en ce sens qu'elle autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageront sa surface. Les défauts non débouchant ne peuvent pas être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes. Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement[5].

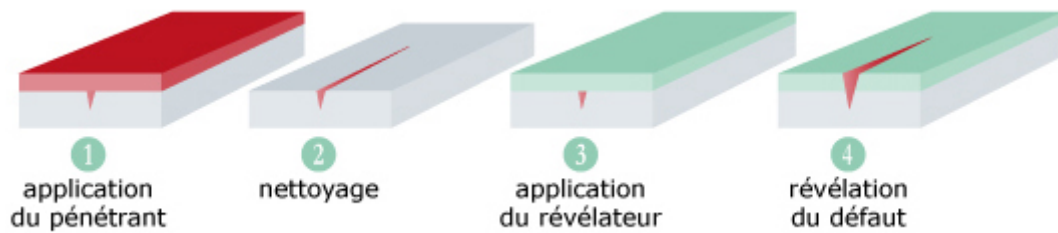


Figure I.1 : Principe du ressuage.

Les phases successives du contrôle par ressuage sont les suivantes :

- ✓ Un nettoyage soigné de la surface de la pièce ;
- ✓ l'application d'un produit coloré ou fluorescent appelé pénétrant, soit par immersion soit par pulvérisation, suivie d'un temps d'imprégnation ;
- ✓ l'élimination de l'excès de pénétrant ;
- ✓ l'application d'un révélateur, qui peut être liquide ou sous forme de poudre, dans lequel le pénétrant, accumulé dans les fissures, va se diffuser et former des images interprétables par le contrôleur. La détection est améliorée à la fois par le contraste de couleur entre pénétrant et révélateur et par le fait que la diffusion du pénétrant dans le révélateur élargie considérablement l'aspect du défaut.

2.1.3 Champ d'application

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple à employer et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité (matériaux métalliques, plastiques, composites...) [8].

Cette méthode peut être utilisée à la fois pour le contrôle de pièces en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou au cours des opérations de maintenance. [7, 9]

2.1.4 Avantages et inconvénients

a) Avantages

- ✓ Possibilité d'être effectué sur toutes sortes de matériaux non perméables (métaux, plastiques, composites...) de géométrie et dimensions quelconque, à condition toutefois qu'ils se réagissent pas chimiquement ou physiquement(adsorption) avec le pénétrant,
- ✓ Méthode globalement autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce, l'orientation de défauts est sans influence ;
- ✓ Méthode peu onéreuse ;
- ✓ Facile à mettre en œuvre (pour pénétrants pré émulsionnés).

b) Inconvénients

- ✓ Nécessite un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection ;
- ✓ Inspection des résultats est subjective : il est impossible de déterminer la dimension exacte des défauts ;
- ✓ Inspection finale est visuelle ;
- ✓ Opérations mécaniques comme le peeling, le rectifiant, l'usinage, le polissage,..etc. Ont tendance à fermer la fente (le craquement), s'ouvrant en enduisant la matière superficielle [9].

1.2.2 Procédés à flux de fuite magnétique

2.2.1 Principe et base physique

Pour les matériaux ferromagnétiques, un des procédés les plus efficaces de recherche des défauts de surface est l'observation des perturbations du champ magnétique créé au voisinage de celle-ci.

En effet, la théorie des circuits magnétiques indique que la présence d'un entrefer correspond à un fort accroissement local de la réluctance du circuit, constituant ainsi un obstacle au flux magnétique dont les lignes de force doivent alors s'épanouir latéralement selon un flux de fuite.

Cet effet de dispersion d'un flux magnétique hors pièce ferromagnétique, au droit d'une fissure débouchant ou sous-cutanée (ou toute autre hétérogénéité non ferromagnétique se comportant comme un entrefer), est à la base d'une gamme de procédés magnétiques de détection des défauts de surface dans les aciers dont le plus connu et le plus employé est la magnétoscopie. Les procédés magnétiques diffèrent entre eux principalement dans le mode de mise en évidence du flux de fuite magnétique correspondant à la dispersion de flux décrite sur la Figure I.2 [10].

2.2.1.1 Magnétoscopie

L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de particules ferromagnétiques très fines et d'un liquide porteur (poudre de fer ou magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent d'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible [10].

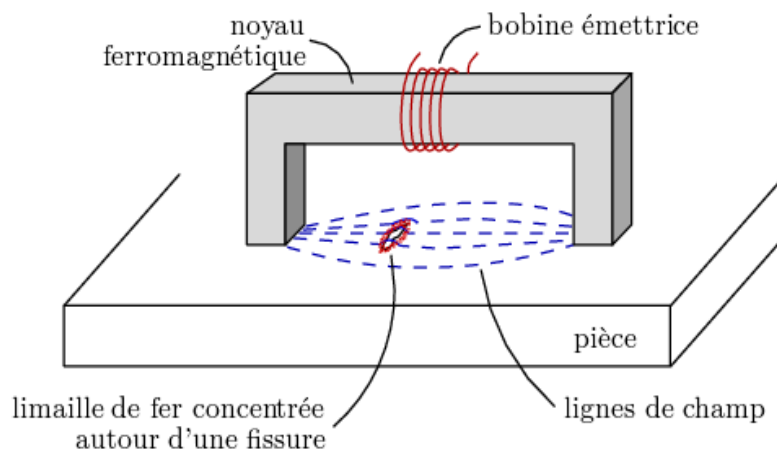


Figure I.2 : Principe de la magnétoscopie.

2.2.1.2 Magnétographie

On recueille la trace magnétique du flux de fuite sur un film, une bande ou une pâte d'empreinte magnétisable ;

2.2.1.2 Détecteurs à flux de fuite

Il s'agit généralement d'appareils de contrôle automatiques de barres et de tubes d'acier mettant en œuvre des détecteurs de flux électromagnétique.

2.2.2 Champ d'application

L'examen de flux de fuite magnétique (magnétoscopie et mesure directe de flux) se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface très fins sur les pièces en acier au carbone et autres alliages ferromagnétiques. Grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, le procédé, s'adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées. Son champ d'application recouvre trois familles principales : [10]

- ✓ Le contrôle des pièces de série, issues de forage et usinage, comme les pièces de sécurité pour l'industrie automobile ; ces contrôles se font sur machine fixe, en général sous lumière noire ;
- ✓ Le contrôle à l'unité de grosses pièces, il s'agit d'un contrôle localisé par magnétoscopie, autour de toutes ou parties des soudures, sur lesquelles on recherche des fissures transversales ou longitudinales lors de contrôle en service dans le cadre d'opération de maintenance, on utilise des méthodes similaires ;
- ✓ Le contrôle des pièces cylindriques, barres rondes ou formes convexes, billettes...etc. Il s'agit dans tous les cas de pièces très longues en regard de leur dimension transversale.

2.2.3 Avantages et inconvénients [6]

a) Avantages

- ✓ Défauts sous-jacents peuvent être détectés (de 1 à 2 mm à partir de la surface) ;
- ✓ Ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure : longueur minimale 0.5mm, largeur 1 mm ;
- ✓ Détecte même les fentes (craquements) remplies de la matière étrangère ;
- ✓ Fournit quelques informations sur la profondeur de première classe ;
- ✓ Peu coûteuse ;
- ✓ Se prête bien à l'automatisation.

b) Inconvénients

- ✓ Méthode de contrôle ne s'appliquant qu'à des alliages susceptibles d'être démagnétisés (aciers magnétisables) ;
- ✓ Détecte seulement la casse de surface et les fentes proches de la surface ;
- ✓ Problèmes liés à l'hygiène et la sécurité (utilisation de lumière ultraviolette, stockage et élimination des produits chimiques dont certains sont inflammables). Pour la sensibilité maximale la surface devrait être nettoyée et séchée ;
- ✓ Peut chauffer et brûler des parties fortement finies aux points de contact électrique.

1.2.3 Procédés à ultrasons

2.3.1 Bases physiques du contrôle ultrasonore

Les ultrasonores sont des ondes de vibrations mécaniques générées à partir d'un élément piézo-électrique excité à une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 KHz.. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux à des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'ondes [5, 7].

Dans ce type de contrôle, il s'agit d'envoyer un signal électrique vers un transducteur ultrasonore qui émet une onde élastique qui se propage à l'intérieur du matériau à contrôler, puis se réfléchit sur les obstacles présents (défaut, face de la pièce...), les échos reviennent et seront détectés par un récepteur ultrasonore, et ils sont convertis en signal électrique que l'on peut mesurer facilement. Ce principe met en jeu des phénomènes physiques tels que la diffraction de la source, la réflexion, réfraction aux différentes interfaces, l'interaction de l'onde avec le défaut.

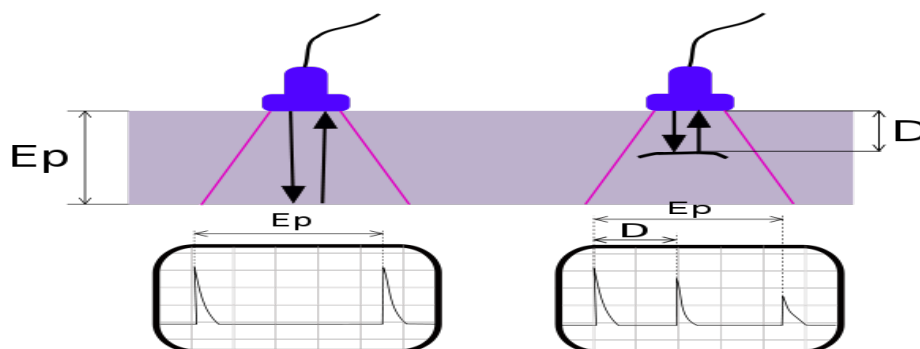


Figure I.3 : Principe des ultrasons.

2.3.2 Champ d'application

Le contrôle non destructif par ultrasons a des applications presque innombrables dans : la tuyauterie, les semi-conducteurs, la fabrication des chemins de fer, industries médicales...etc. Le CND par ultrasons est utilisé pour détecter des fentes (craquements) et des dégâts de fatigue sur des parties de sécurité critiques, L'ultrason peut aussi être utilisé pour l'imagerie. Ces techniques d'imagerie ultrasoniques sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs des traitements thermochimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques [7].

2.3.3 Avantages et inconvénients [6] [10] [7]

a) Avantages

- ✓ Équipements portatifs ;
- ✓ Appareil très sensible aux fissures ;
- ✓ Résultats immédiats ;
- ✓ Absence totale d'inconvénients liés à la sécurité ;
- ✓ Haute profondeur de pénétration ;
- ✓ Capacité de tester des pièces à géométrie complexe ;
- ✓ Pour tester tous les matériaux.

b) Inconvénients

- ✓ Sensible à la nature et à l'orientation des défauts ;
- ✓ Assujetti à un couplage pièce traducteur ;
- ✓ Huile ou gel de couplage est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'opération.
- ✓ Les mesures et la qualité des images dépendent beaucoup de la position de la sonde, et donc de l'habileté et de la compétence de l'examineur.

I.2.4 Procédés radiographiques

I.2.4.1 Radiographie

4.1.1 Principe et bases physiques de la radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale, son principe consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique du type film photographique argentique ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autres, comme l'illustre la Figure I.3[11]

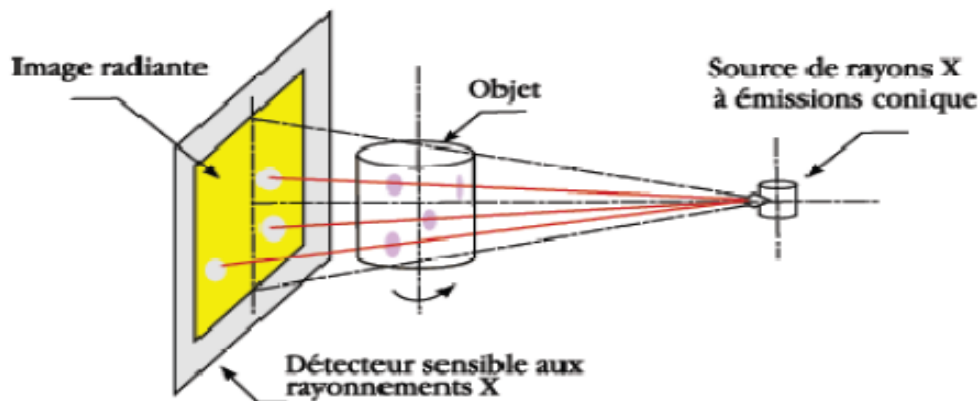


Figure I.4: Principe de la radiographie

4.1.2 Champ d'application

Le champ d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

4.1.3 Avantages et inconvénients [10]

a) Avantages

- ✓ Contrôle des défauts internes ;
- ✓ Transportabilités (générateurs de rayon X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs).

b) Inconvénients

- ✓ Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel
- ✓ Réglementations souvent contraignantes (transport et stockage des sources radioactives, déclarations,.....).

1.2.4.2 Thermographie**4.2.1 Principe et bases physiques de la thermographie**

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermo-grammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de températures sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique[1]

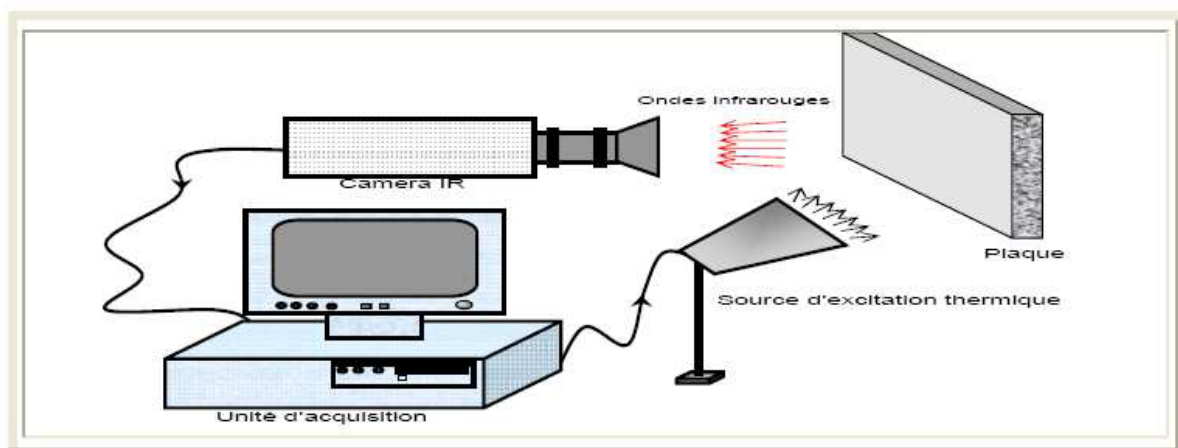


Figure I.5: Principe de thermographie.

4.2.2 Champ d'application

L'utilisation de la thermographie pour des applications sur matériaux métalliques permet la détection de défauts débouchant et sous-jacents dans de nombreux cas. En règle générale, une excitation optique est utilisée. Cependant, les surfaces concernées par le contrôle sont souvent fortement réfléchissantes et les matériaux qui les constituent diffusent rapidement la chaleur. L'emploi de sources d'excitation de forte puissance est donc nécessaire afin de permettre un échauffement mesurable, ce qui complique la mise en œuvre sur site ou lors d'une expertise (utilisation de lampes flash ou de lasers qui nécessitent des protections oculaires et un confinement du faisceau).

4.2.3 Avantages et inconvénients [10]

a) Avantages

- ✓ Permet de faire des mesures à distance ;
- ✓ Facilement personnalisable en fonction des besoins
- ✓ Utilisable sur de nombreux types d'échantillons (métalliques, diélectriques, semi-conducteurs, massifs ou composites,..)

b) Inconvénients

- ✓ Limitée à l'étude des matériaux minces (jusqu'à quelques millimètres d'épaisseur) ;
- ✓ Peut être dépendante des propriétés radiatives de surface.

1.2.5. Procédés électromagnétiques

1.2.5.1 Principe de la détection par courant de Foucault

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,...) afin de mettre en évidence les défauts surfaciques ou sous-cutanés ou une quelconque variation des paramètres physiques du matériau à contrôler (σ , μ) [5, 12].

Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler, la trajectoire de ces courants sera perturbée soit par la géométrie soit par les caractéristiques internes de la pièce [10]. Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) et le champ résultant sera fonction

- ✓ du signal d'excitation ;
- ✓ de la conductivité électrique ;
- ✓ de la perméabilité magnétique ;
- ✓ de la géométrie de la cible ;
- ✓ de la distance capteur-cible (lift-off).

La présence d'un défaut dans la pièce à contrôler, constitue une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault.

Ce principe est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau).

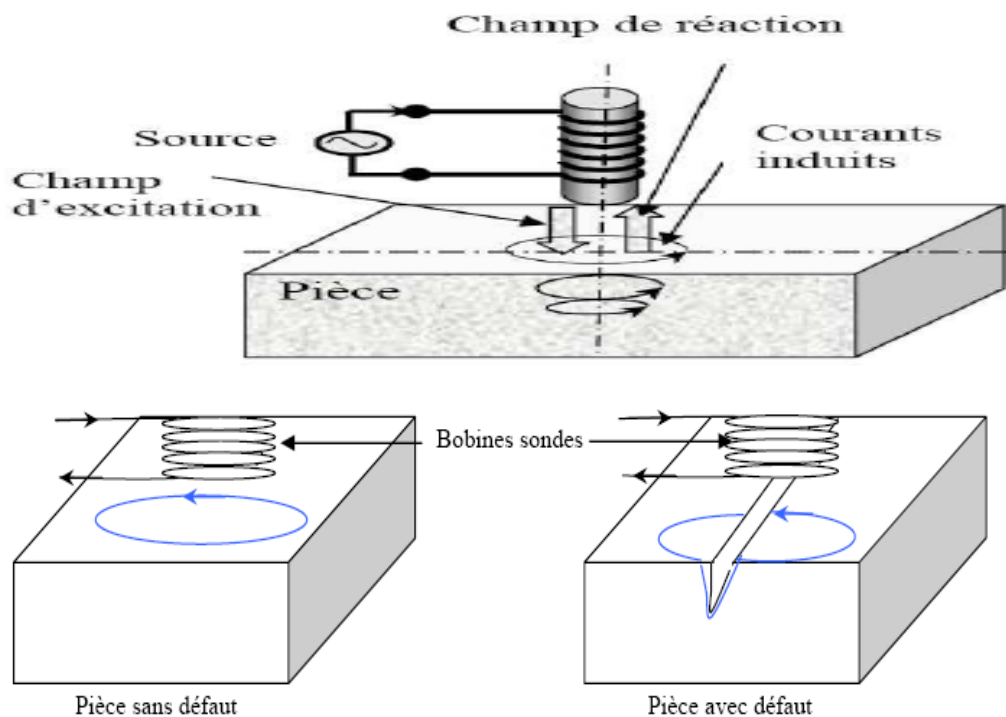


Figure I.6 : Principe CND par courants de Foucault.

1.2.5.2 Effet de peau

Ce phénomène d'origine électromagnétique apparaît dans tous matériaux conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps, dans le cas du contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce commencent à décroître d'une manière exponentielle à partir de la surface [6] donnée par

$$j(z) = j_0 \exp\left(\frac{-z}{\delta}\right) = j_s \left(\frac{-z}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}\right) \quad (I.1)$$

La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration δ telle que

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (I.2)$$

avec ;

Z : La profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.

$j(z)$: Le module de la densité de courant à la profondeur z .

j_s : Le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).

δ : La profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

f : La fréquence d'alimentation.

μ_r : La perméabilité magnétique relative du matériau.

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide.

σ : La conductivité électrique.

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau.

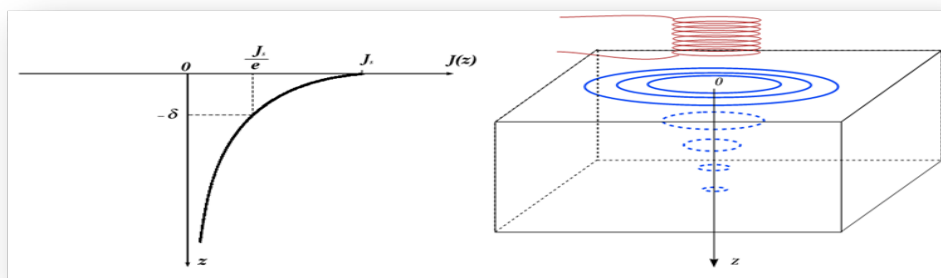


Figure I.7 : Répartition des Courants de Foucault dans la pièce.

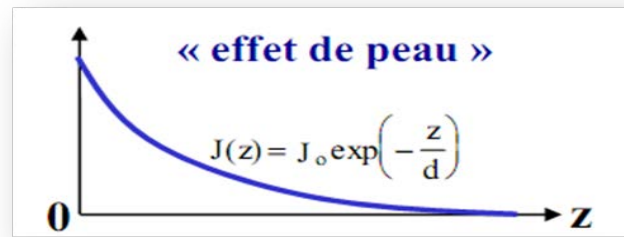


Figure I.8 : Effet de peau.

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

1.2.5.3 Différents types de capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle.

5.3.1 Classification selon la géométrie

- a) ***Bobine interne*** : C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau.
- b) ***Bobine encerclante*** : C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, barres,...).
- c) ***Bobine ponctuelle*** : Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe.
- d) ***Bobine plate*** : De même que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces de pièces. Vu sa géométrie, sa zone d'action est plus large.

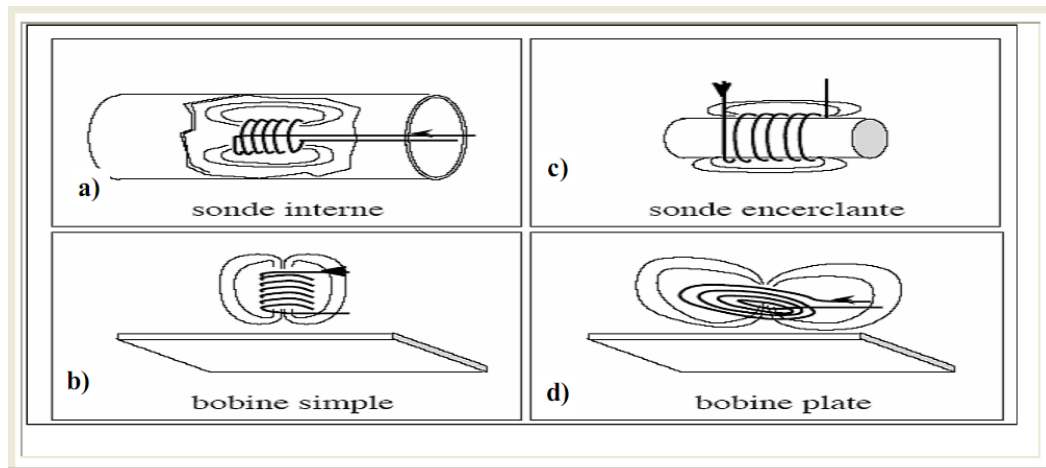


Figure I.9 : Classification des bobines selon la géométrie.

5.3.2 Classification selon la fonction

En principe, tous les capteurs assurent deux fonctions : la fonction d'alimentation et celle de mesure. Si ces dernières sont assurées par un seul enroulement, on parle de capteur à double fonctions, sinon il s'agit d'un capteur à fonction séparée.

- a) **Bobine à double fonctions** : Dans ces dispositifs, les fonctions d'excitation et d'observation (émission-réception) sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine.

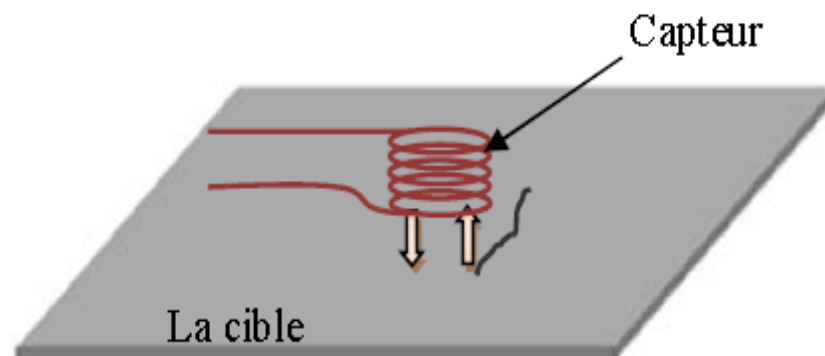


Figure I.10: Sonde à double fonctions.

- b) **Bobine à fonctions séparées** : La sonde à fonctions séparées est constituée d'au moins deux éléments. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par des éléments distincts. La réception peut alors se faire à un endroit différent de la position de l'émetteur. L'élément de mesure peut être une bobine aux bornes de laquelle on mesure la d.d.p induite ou un capteur de champ (*giant magneto-impedances*, GMI, *giant magneto-resistances*, GMR...).

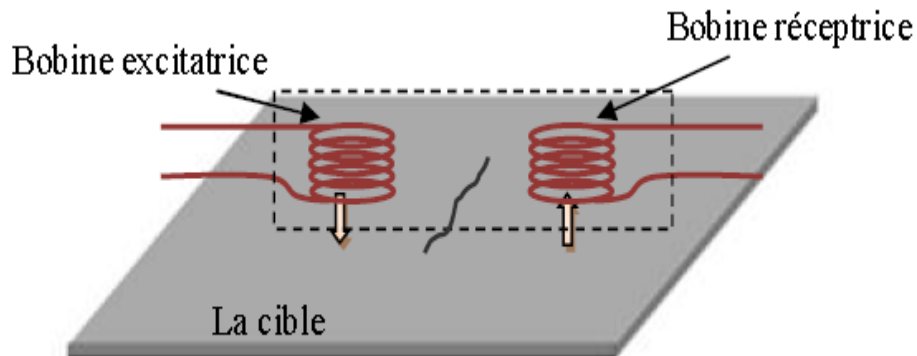


Figure I.11: Sonde à fonction séparées.

- c) **Sonde différentielle** : elles sont constituées d'au moins deux éléments rigidement liés. La mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de capteur est particulièrement utilisé en déplacement le long d'une pièce pour détecter des discontinuités.

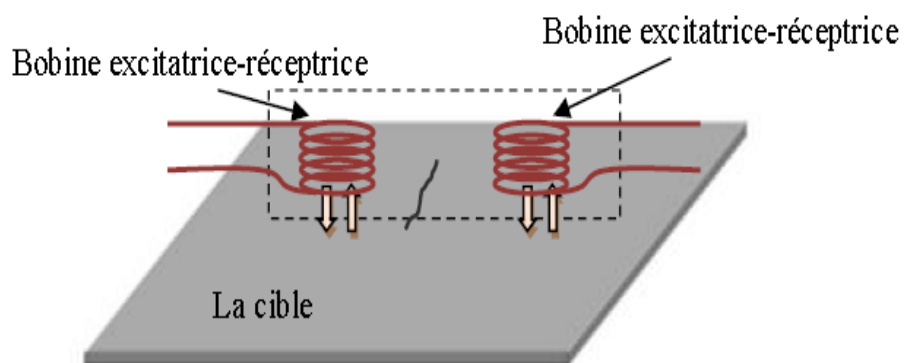


Figure I.12: Sonde différentielle.

5.3.3 Classification selon le mode de contrôle

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à contrôler et des perturbations éventuelles, on compte deux modes de mesure : le mode absolu et le mode différentiel.

a) Capteurs à mode absolu : Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe.

Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis.

C'est pourquoi, en contrôle par courant de Foucault, on utilise une mesure comparative.

La méthode absolue utilise un capteur à double fonctions et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique.

b) Capteurs à mode différentiel : Ils sont constitués de deux bobines rigidement liées. La mesure différentielle est équivalente à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins.

Dans le cas de pièce saine, l'impédance du capteur différentiel est nulle. La réponse est sensible seulement aux variations brusques de la géométrie de la pièce à contrôler. La Figure I.13 présente un montage différentiel pour le contrôle d'un tube.

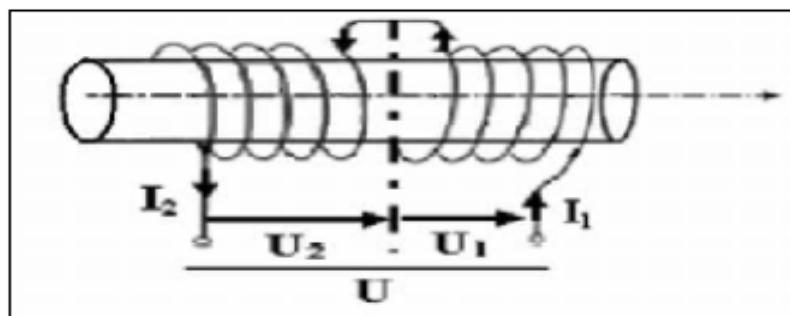


Figure I.13: Mode différentiel.

1.2.5.4 Modes d'excitation

On distingue trois modes d'excitation

a) Excitation mono fréquence [7]

Les courants de Foucault sont obtenus par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe, le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés.

Pour une fréquence très basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure est insuffisante à cause des bruits.

Pour une fréquence très élevée, elles font apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter spires du capteur.

b) Excitation multifréquence

Le contrôle par courant de Foucault multifréquence est très utilisé pour l'inversion des données fournies par le capteur dans le but de déterminer des paramètres du matériau en vue.

Cette méthode consiste à choisir judicieusement les fréquences d'excitation du capteur de manière à recueillir des informations riches et complémentaires sur le matériau à contrôler.

Le principe de la technique multifréquence permet aussi ; dans les cas de contrôle difficiles, d'atténuer fortement l'effet des facteurs perturbateurs, ou encore dans d'autres, d'effectuer simultanément la détection de plusieurs types de défauts [10, 8].

c) Excitation pulsée

Cette méthode a été mise en place durant les années 50 pour une application d'évaluation d'épaisseur de revêtement métallique, puis elle a été appliquée à la détection de défauts profonds [9].

Dans un problème de contrôle où il s'agit de discriminer plusieurs paramètres, une alternative à l'alimentation sinusoïdale multifréquence consiste à émettre un champ magnétique large bande en excitant la sonde avec un signal impulsionnel ou quasi-impulsionnel. La forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Cependant, l'excitation pulsée nécessite une instrumentation particulière: générateur d'impulsions à fort courant de bande passante élevée, système d'acquisition performant (les signaux à mesurer étant rapides et souvent de faible amplitude).

1.2.6 Plan d'impédance normalisée

La présence d'un défaut, engendre la perturbation de la circulation des courants de Foucault dans la pièce (Figure. I.14), modifiant ainsi l'impédance du capteur inductif. La mesure de la variation d'impédance entre les deux états de la pièce (saine et fissurée) constitue le paramètre recherché

$$\Delta Z = Z_0 - Z \quad (I.3)$$

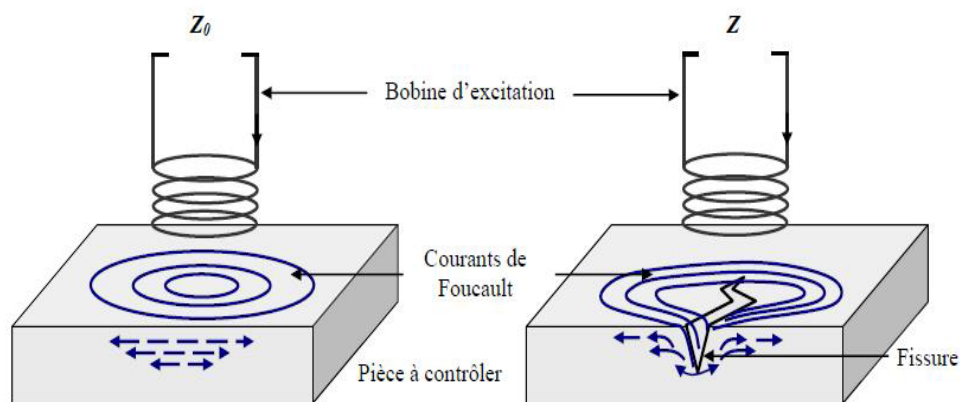


Figure I.14 Mesure de la variation d'impédance du capteur.

Il convient donc d'utiliser des circuits d'équilibrage appelés ponts de mesure dont le rôle est de mesurer la variation de l'impédance (écart entre la valeur de l'impédance apparente de la bobine en l'absence et en présence du défaut).

La technique des circuits électriques propose plusieurs ponts de mesure tels que le pont de Wheatstone, le pont de Maxwell, ... etc.

Dans le cas général, un capteur inductif est donc caractérisé par deux grandeurs : la partie résistive (R) qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le terme inductif (X) qui représente la réactance du bobinage d'excitation liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le palpeur

$$Z = R + jX \quad (I.4)$$

Et pour le conserver dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, on introduit la notion d'impédance normalisée Z_N qui se déduit de Z à l'aide de l'expression

$$Z_N = R_N + j X_N = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (I.5)$$

où :

$$Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (I.6)$$

Z_0 : L'impédance à vide du capteur.

La présence de défauts, ou d'hétérogénéités de la cible induit une modification dans l'espace de l'un ou de plusieurs des paramètres influents (σ , lift - off . . .), qui se traduit dans le plan d'impédance (R_N, X_N), par un déplacement du point représentatif de la sonde.

La prédétermination de ces trajectoires pour une cible quelconque est un problème relativement complexe qui nécessite une modélisation complète du dispositif. Un modèle du type transformateur [7] a permis d'identifier la conductivité locale de la cible et la distance séparant la sonde de la cible, à partir des deux mesures (R_N, X_N).

La Figure I.15 illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift-off).

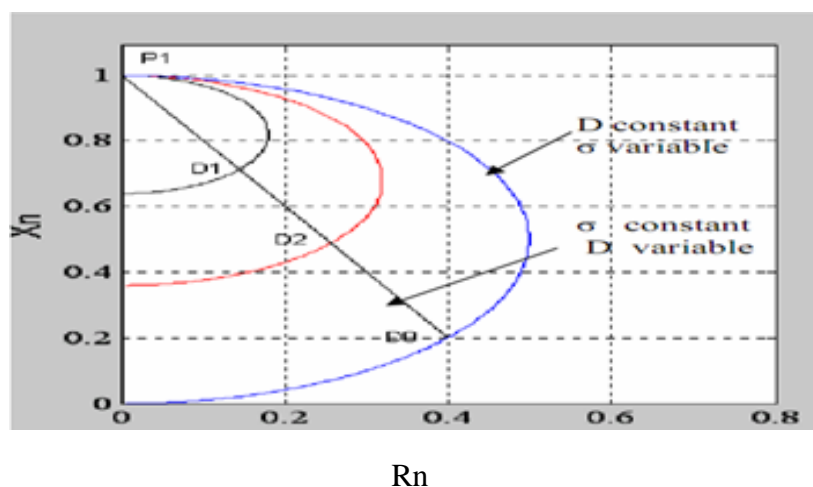


Figure I.15: Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique).

1.3 Avantages et limites de la technique par courant de Foucault

a) Avantages

- ✓ La méthode permet de rechercher des défauts situés à des profondeurs variables (de Zéro à quelques millimètres) et de connaître la taille de la fissure ou de la piqûre (longueur minimale de 0.2 mm et une largeur de 1 mm) [8] ;
- ✓ Inspection rapide, simple et fiable pour la détection des défauts de surface et de faible profondeur sur des matériaux conducteurs [12];
- ✓ Possibilité d'être utilisée pour mesurer la conductivité électrique de matériaux ;
- ✓ Inspection des trous avec l'utilisation de scanners tournant à grande vitesse et de sondes de surface.

b) Inconvénients

- ✓ Le CND par courants de Foucault ne s'applique que sur les pièces réalisées en matériaux conducteurs en électricité [8, 12];
- ✓ La sensibilité à une vaste gamme de paramètres augmente la complexité d'interprétation ;
- ✓ Sensibilité à des craquements perpendiculaires à la surface inspectée uniquement [12].

1.4 Evaluation non destructive

Parmi les méthodes de CND nombreuses sont, celles qui détectent les défauts surfaciques ou débouchant en surface (craques, fissures, corrosion, revêtement, décollement, défauts de soudure...), aussi des défauts ou des fissures cachés dans des matériaux diélectriques. Mais les dimensions réelles du défaut ne sont pas toujours accessibles par ces méthodes.

L'évaluation non destructive (END) par rapport au contrôle non destructif (CND) a vocation à apporter une caractérisation plus quantitative que qualitative [13] ,en effet, lors d'un contrôle non destructif (problème direct) nous cherchons à détecter et localiser des défauts , par contre lors d'une évaluation non destructive (problème inverse) ; nous partons des résultats fournis par un problème direct et à l'aide des méthodes d'inversion, nous récupérons des paramètres, tels que la forme et les dimensions du défaut...etc.

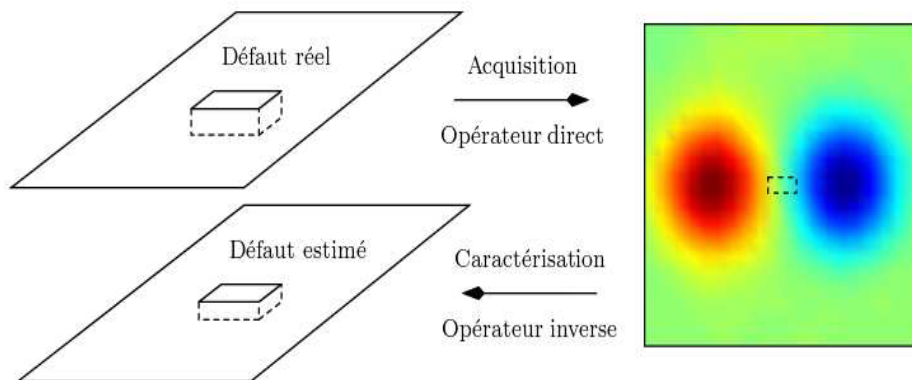


Figure I.16 : Problème direct et problème inverse.

I.5 Mécanique de la rupture

I.5.1 Définitions

Toutes les pièces mécaniques contiennent des fissures, même si cela ne se voit pas à l'œil nu. Ces fissures peuvent croître lentement ou brutalement, le dernier cas de figure étant souvent synonyme de rupture ; la prévision de ces phénomènes est donc un enjeu essentiel pour le dimensionnement. La branche de la mécanique qui permet de modéliser la fissuration s'appelle la Mécanique de la Rupture. Nous en présentons ici quelques concepts, et notamment la notion de ténacité, qui caractérise la résistance d'un matériau à l'avancement des fissures et qui peut-être mesurées par des essais de fissuration[1, 2].

Nous supposons ici que les fissures sont planes et se propagent dans leur plan. Il est ainsi possible de montrer que l'état général de propagation se limite à la superposition de trois modes :

- ✓ **Mode I (mode par ouverture)** : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissure,
- ✓ **Mode II (glissement de translation)** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure,
- ✓ **Mode III (glissement de rotation)** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure.

Le mode I est souvent le plus critique et les études théoriques sont donc souvent limitées à ce mode de propagation.

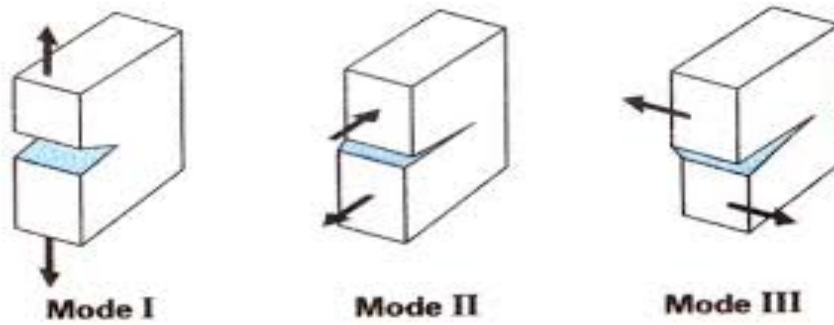


Figure I.17 : Modes d'ouvertures des fissures.

I.5.2 Facteurs d'intensité de contrainte

Introduit par G.R. Irwin [1] en 1957, les facteurs d'intensité de contraintes correspondent à des cinématiques particulières du mouvement des fissures. Dans le cadre de la mécanique de la rupture, les contraintes et les déformations au voisinage d'une fissure admettent un développement asymptotique dont le terme singulier s'écrit

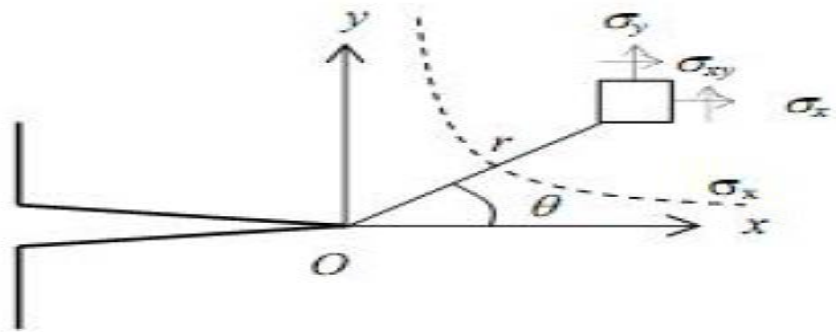


Figure I.18 : Champ des contraintes au voisinage de la fissure.

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = K_{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{\alpha}(\theta) \\ \varepsilon_{ij} = K_{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}^{\alpha}(\theta) \end{cases} \quad \alpha = 1,2,3 \quad (\text{I.7})$$

K_{α} est le Facteur d'Intensité des Contraintes (FIC) en mode α , avec $\alpha = \text{I, II ou III}$. Les fonctions f et g donnent la répartition angulaire. Ainsi que dans plusieurs ouvrages de mécanique de la rupture, lorsqu'on se trouve en mode I pur, l'état des contraintes et de déformations peut être caractérisé à l'aide du paramètre K_I , seul.

Tableau I.1 : Champs de contraintes et de déplacements au voisinage de l'extrémité de fissure pour les Modes I, II III.

Mode I	
$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K_1}{\sqrt{2 \Pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\begin{bmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} U_X \\ U_Y \end{bmatrix} = \frac{K_1}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\Pi}}$	$\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\chi - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\chi + 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \end{bmatrix}$
Mode II	
$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K_2}{\sqrt{2 \Pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} U_X \\ U_Y \end{bmatrix} = \frac{K_2}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\Pi}}$	$\begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\chi + 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \\ -\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\chi - 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \end{bmatrix}$
Mode III	
$U_z = \frac{K_3}{G} \sqrt{\frac{r}{2\Pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	
$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{K_3}{\sqrt{2 \Pi r}} \begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix}$	

Pour un mode donné a, le facteur d'intensité de contrainte est comme suit ;

$$K_a = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{ij} \quad (I.8)$$

Le facteur d'intensité de contrainte est couramment utilisé pour caractériser la singularité du champ de contrainte au voisinage de la tête de la fissure. Une autre alternative permet de calculer ces facteurs. Ces facteurs sont proportionnels à la discontinuité du déplacement des lèvres de la fissure.

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zz} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_z \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right)$$

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zn} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_n \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right) \quad (I.9)$$

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zt} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_t \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right)$$

Où :

(u_i) Représente la discontinuité de déplacement en tête de fissure dans la direction i.

ν : Coefficient de poisson.

1.5.3 Evaluation du F.I.C

Cette section présente en détail les techniques d'évaluation des facteurs d'intensité de contraintes (FIC) selon le principe d'extrapolation des déplacements et celui du taux de relâchement d'énergie potentielle appliqué par l'intégrale J. Ces méthodes ont été choisies et pour leur facilité d'intégration, leur versatilité ou leur précision [14].

L'évaluation des FIC par soustraction de la singularité sera aussi abordée, car de récents résultats ont montré l'efficacité de cette méthode [15].

1.5.3.1 Extrapolation des déplacements

C'est une approche locale de mise en œuvre simple, consiste à exploiter directement les déplacements du nœud le plus proche de la pointe de la fissure, en l'injectant à l'expression asymptotique du saut de déplacement à travers la fissure

Plusieurs techniques d'extrapolation existent et offrent différents avantages tels la rapidité, et la précision. Il est aussi important pour cette méthode, de toujours positionner le système de coordonnées polaires (r, θ) au bout de la fissure et de l'orienter selon son axe afin de valider les équations du champ de déplacement. En d'autres termes, les nœuds juxtaposés définissant les lèvres de la fissure doivent être distribués de façon symétrique par rapport à l'axe des lèvres, afin de déterminer correctement les déplacements des lèvres $U_{(y)}$ et $U_{(x)}$ [2].

a) Cas d'un point

En fait, aucune extrapolation n'est réalisée par cette technique, puisqu'il s'agit de considérer un point très près du bout de la fissure dont le rayon « r » sera suffisamment petit pour être associé au point de singularité. En appliquant les équations du déplacement, puis en isolant les FIC, les expressions suivantes sont obtenues [2] :

$$K_I = \frac{\mu}{\kappa+1} \sqrt{(2\pi/r)} \quad (\text{I.10})$$

$$K_{II} = \frac{\mu}{\kappa+1} \sqrt{(2\pi/r)} \quad (\text{I.11})$$

L'utilisation d'un seul point permet une évaluation très rapide des FIC, mais nécessite un maillage fin pour qu'il soit suffisamment près des nœuds du bout de la fissure. De plus, il est fréquent d'observer une certaine divergence de la solution numérique près de la singularité [16]. Or, avec cette technique, il est impossible de vérifier si le point d'évaluation choisi est divergent ou non.

b) Cas de deux points

Cette méthode est également très simple. Elle consiste à réaliser une extrapolation linéaire à partir de deux points (cas des nœuds des éléments rattachés au bout de la fissure) comme montré sur la Figure I.19

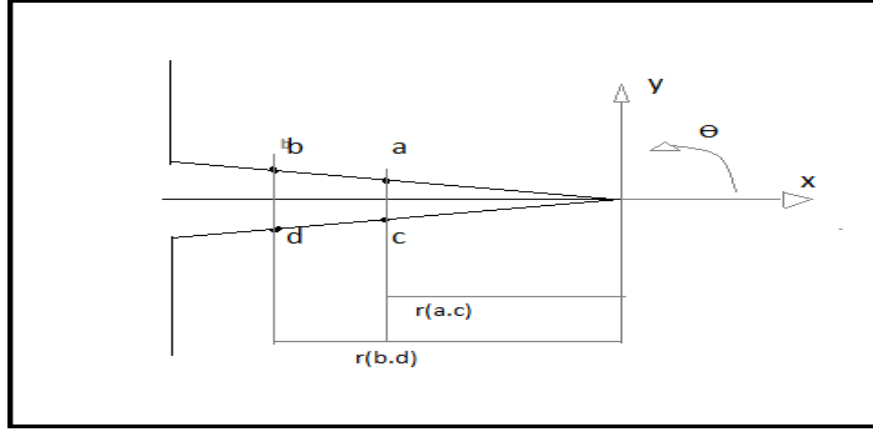


Figure I.19 : Extrapolation des déplacements en deux points.

À partir de la figure I.19 et du principe d'extrapolation, les facteurs K_I et K_{II} sont déterminés pour $r = 0$ par la relation suivante [2]

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}}{\kappa+1(r^{b,d}-r^{a,c})} \left(\frac{(r^{b,d}*\Delta u^{a,c}(y))}{\sqrt{r^{a,c}}} - \frac{(r^{a,c}*\Delta u^{b,d}(y))}{\sqrt{r^{b,d}}} \right) \quad (I.12)$$

$$K_{II} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}}{\kappa+1(r^{b,d}-r^{a,c})} \left(\frac{(r^{b,d}*\Delta u^{a,c}(x))}{\sqrt{r^{a,c}}} - \frac{(r^{a,c}*\Delta u^{b,d}(x))}{\sqrt{r^{b,d}}} \right) \quad (I.13)$$

Cette méthode est utilisée lorsque le modèle comprend des éléments singuliers où l'extrapolation ne peut se faire qu'à l'intérieur de ceux-ci, afin de tenir compte de la singularité qu'ils induisent.

c) Minimisation de l'erreur

Aliabadi[17] a repris la technique de l'extrapolation sur deux points, mais c'est Fedelinski et al. [2] qui l'ont adapté afin d'obtenir une expression minimisant le carré des erreurs entre la relation analytique et le résultat numérique des FIC.

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}}{\kappa+1} \left(\frac{(\sqrt{r^{a,c}}*\Delta u^{a,c}(y)+\sqrt{r^{b,d}}*\Delta u^{b,d}(y))}{(r^{b,d}-r^{a,c})} \right) \quad (I.14)$$

$$K_{II} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}}{\kappa+1} \left(\frac{(\sqrt{r^{a,c}}*\Delta u^{a,c}(x)+\sqrt{r^{b,d}}*\Delta u^{b,d}(x))}{(r^{b,d}-r^{a,c})} \right) \quad (I.15)$$

Très peu d'études ont utilisé cette méthode, mais Fedelinski et al. (1995), Salgado et Aliabadi (1998) ont tout de même prouvé qu'elle pouvait fournir des résultats satisfaisants [17].

I.5.3.2 Intégrale de contour « Intégrale J »

L'intégrale de contour utilisée comme paramètre caractéristique de l'état de contrainte au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans les matériaux dont le comportement est linéaire et non linéaire, a connu un grand succès. Rice (1968) proposa ce paramètre en assimilant le comportement élasto-plastique à un comportement élastique non linéaire [18].

Rice a appliqué la théorie de la déformation pour analyser un solide fissuré. Il a démontré que le taux de restitution d'énergie non linéaire noté, peut-être déterminé à partir d'une intégrale de contour indépendant du contour d'intégration. Hutchinson, Rice et Rose green ont ensuite montré que ce paramètre caractérise de façon unique les champs de contraintes et de déformations au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans un matériau non linéaire. L'intégrale peut donc être considérée à la fois comme un paramètre d'énergie et aussi un paramètre d'intensité des contraintes, comme en mécanique linéaire de rupture où le FIC et l'énergie de Griffith sont deux paramètres qui décrivent de manière équivalente la répartition des contraintes. Le paramètre est défini à partir de l'intégrale de contour suivant :

$$J = \int_{\bar{\Gamma}} \left(w dy - t \cdot \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (\text{I.16})$$

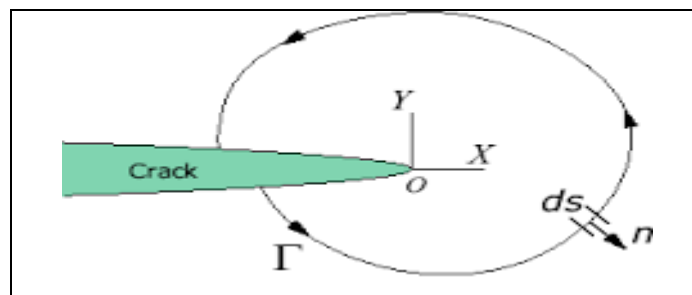


Figure I.20 : Contour indépendant de l'intégrale J.

avec :

$\bar{\Gamma}$: Contour d'intégration entourant l'extrémité de la fissure.

t : vecteur de contrainte.

u : vecteur de déplacement.

ds : élément de contour.

w : densité d'énergie de déformations définie par

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (\text{I.17})$$

où ;

$\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$: Les composantes des tenseurs de contraintes et de déformations au point courant sur le contour Γ .

L'intégrale de contour dite "Intégrale-j", est un concept de la mécanique de la rupture, qui établit une équivalence entre le taux de restitution d'énergie et les FIC. C'est donc une notion très importante, qui justifie l'utilisation des FIC comme critère de propagation [19].

I.5.3 Intégrale d'interaction

Les valeurs des facteurs d'intensité de contrainte sont extraites de l'intégrale J en utilisant la technique des intégrales d'interaction développée par Yau, Wang et Corten [20]. Nous considérons deux états d'équilibre du corps fissuré. Le premier (1) est l'état réel du problème étudié satisfaisant les conditions aux limites et le deuxième (2) est un état auxiliaire fictif.

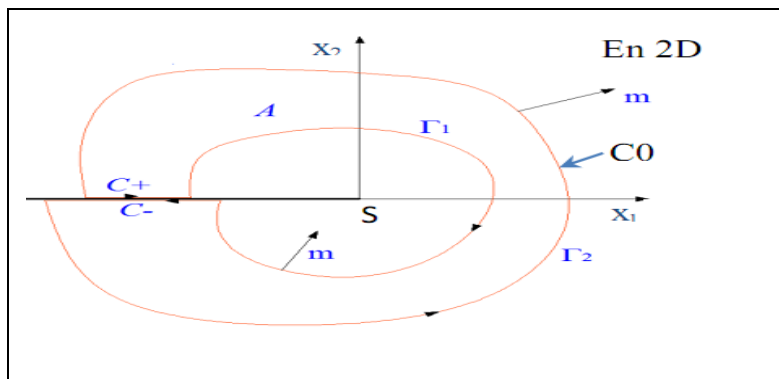


Figure I.21 : Contour indépendant de l'intégrale J.

Les facteurs d'intensité des contraintes sont calculés en utilisant les formulaires du domaine des intégrales d'interaction [21]. Pour les problèmes généraux de mode mixte la relation entre la valeur de l'intégrale et les facteurs d'intensité de contrainte est la suivante

$$J = \frac{K_I^2}{E^*} + \frac{K_{II}^2}{E^*} \quad (\text{I.18})$$

où ; E^* est le module de Young défini en termes de paramètre du matériau.

Deux états d'un corps fissuré sont considérés, Le premier correspond à l'état actuel $(\sigma_{ij}^{(1)}, \varepsilon_{ij}^{(1)}, u_{ij}^{(1)})$, le deuxième $(\sigma_{ij}^{(2)}, \varepsilon_{ij}^{(2)}, u_{ij}^{(2)})$ qui est un état auxiliaire qui sera choisi comme les champs asymptotiques pour les modes I ou II.

L'intégrale J est donnée par la formule suivante ;

$$J_i = \int_{\Gamma} [w n_i - \sigma_{jk} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_k}] d\Gamma \quad (I.19)$$

où ;w est la densité d'énergie de déformation et i désigne la direction d'ouverture des fissures à la pointe, qui est supposée correspondre à la direction globale de x , notée x_1 .

L'équation (I.19) peut-être réécrite sous la forme suivante ;

$$J_1 = \int_{\Gamma} [w \delta_{1j} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}] n_j d\Gamma \quad (I.20)$$

L'intégrale J pour la somme des deux états est ;

$$J^{(1+2)} = \int \frac{1}{2} (\sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)}) (\varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)}) \delta_{1j} (\sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)}) \frac{\partial (u_i^{(1)} + u_i^{(2)})}{\partial x_1} n_j d\Gamma \quad (I.21)$$

Les intégrales pour l'état pur (1) et l'état auxiliaire (2) peuvent être séparées de l'équation (I.21) ce qui laisse un terme d'interaction de telle sorte que

$$J^{(1+2)} = J_1^{(1)} + J_1^{(2)} + I^{(1+2)} \quad (I.22)$$

où ; $I^{(1+2)}$ est le terme d'interaction qui est donnée par

$$I^{(1+2)} = \int_{\Gamma} [W^{(1,2)} \delta_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1}] n_j d\Gamma \quad (I.23)$$

où ; $W^{(1,2)}$ est la densité d'énergie d'interaction souche

$$W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \quad (I.24)$$

Puisque nous sommes à la superposition de deux configurations fissurées alors on peut aussi écrire :

$$\left(K_I^{(1)}K_I^{(2)}\right)^2/E^* + \left(K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)}\right)^2/E^* \quad (I.25)$$

En développant et réarrangeant les termes de l'équation (I.25), on obtient

$$J^{(1+2)} = J_1^{(1)} + J_1^{(2)} + \frac{2(K_I^{(1)}K_I^{(2)})+(K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)})}{E^*} \quad (I.26)$$

De l'équation (I.22) et (I.26) on obtient

$$I^{(1+2)} = \frac{2(K_I^{(1)}K_I^{(2)})+(K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)})}{E^*} \quad (I.27)$$

Le facteur d'intensité de contrainte pour l'état actuel peut être trouvé en séparant les deux modes de rupture. En sélectionnant $K_I^{(2)}=1$ et $K_{II}^{(2)}=0$.

Alors le facteur d'intensité des contraintes en fonction d'intégrale d'interaction est

$$K_I^{(1)} = \frac{I^{(mode I)}E^*}{2} \quad (I.28)$$

Une procédure similaire peut également être suivie pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte en Mode II de telle sorte que $K_{II}^{(2)}$ est donnée par ;

$$K_{II}^{(2)} = \frac{I^{(mode II)}E^*}{2} \quad (I.29)$$

L'intégrale de contour $I^{(1+2)}$ n'est pas dans une forme la mieux adaptée pour les calculs par la méthode des éléments finis. Il est converti en une zone intégrante en utilisant une fonction de lissage. Cette fonction prend une valeur de l'unité sur un ensemble ouvert contenant la pointe de la fissure et s'annule sur un contour extérieur C_0 (figure I.21).

$$q = s \begin{cases} 1 & \text{sur } \Gamma_1 \\ 0 & \text{sur } \Gamma_2 \\ \text{arbitraire} & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (I.30)$$

À tout point de A, la forme linéaire des fonctions de formes est utilisée pour interpoler la valeur de q.

Nous considérons une certaine intégrale sur le contour fermé de la figure (I.21) où l'intégrante est celle de l'intégrale de l'équation (2.16) multiplié par une fonction [22]

$$I^{(1,2)} = \int_{\Gamma} [W^{(1,2)} \delta_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1}] q n_j d\Gamma \quad (\text{I.31})$$

où : n est la normale extérieure au contour fermé qui vaut n sur Γ_1 et $-n$ sur Γ_2 .

Par l'application du théorème de divergence, l'intégrale d'interaction vaudra [15]

$$I^{(1,2)} = \int_A [-W^{(1,2)} \delta_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1}] \frac{\partial q}{\partial x_j} \quad (\text{I.32})$$

D'une part, puisque $q = 0$ sur Γ_2 et que l'intégrante est nulle sur C^+ et C^- , l'intégrale sur le contour fermé se réduit en une intégrale sur Γ_2

$$I^{(1,2)} = \int_A [-W^{(1,2)} \delta_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1}] \frac{\partial q}{\partial x_j} \quad (\text{I.33})$$

Il est souvent souhaitable d'utiliser une forme d'intégrale sur le domaine intérieur d'une courbe que sur la courbe elle-même pour valeur l'intégrale J à partir des champs de contrainte et de déplacement obtenus par une méthode numérique. De cette manière, les oscillations parasites qui affectent cette solution numérique se trouvent lissées et généralement la précision et l'indépendance de l'intégrale J de la solution estimée augmentent. Cette technique est développée par [8,9]

Où par une écriture des éléments finis :

$$I^{(1,2)} = \sum_{e=1}^{e_A} \sum_{p=1}^{p_A} \{ (\sigma_{ij}^{(1)} u_{j,1}^{(2)} + \sigma_{ij}^{(2)} u_{j,1}^{(1)} - \sigma_{jk}^{(1)} \varepsilon_{jk} \delta_{1i}) q_i \} |J|_P W_P \quad (\text{I.34})$$

où :

e_A : Le nombre des éléments du domaine d'intégrations,

p_A : Le nombre de points d'intégration dans un élément, $|J|$ est le déterminant de la matrice jacobienne, W_P sont les poids des points de Gauss.

Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré au CND qui consiste à la mise en œuvre des techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses. Cette technique nous a orienté à la mécanique de la rupture qui présente les bases essentielles de la modélisation des fissures(défauts). Cette dernière nous a permis de déterminer la valeur du facteur d'intensité de contrainte par l'utilisation de l'intégrale d'interaction.Par ailleurs, les problèmes de modélisation feront l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre II

*Formulation du problème par
la méthode des éléments finis
d'un capteur inductif à CF*

Introduction

Avec l'avancement des ordinateurs puissants, rapides en exécution de calculs économiques (coûts réduits), l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des problèmes de champs électromagnétiques devient de plus en plus d'actualité.

Par ailleurs, l'expérimentation, qui est toujours nécessaire, la conception ou l'amélioration des performances d'un dispositif technologique s'appuie sur un modèle de représentation et de simulation de son bon fonctionnement. Il devient ainsi possible de prévoir l'impact du choix de la géométrie ou des matériaux utilisés sur les performances de dispositif à réaliser. Aussi un modèle précis et fiable permet d'éviter la construction d'un grand nombre de prototypes. Le domaine des capteurs comme d'autres domaines, font appel à leur mise au point à la simulation et l'expérimentation comme moyen d'aide à la conception, [17].

Cependant, tout outil de modélisation doit être manipulé en connaissant parfaitement les hypothèses simplificatrices utilisées, la modélisation du problème magnétodynamique dans un système de phénomène de courant de Foucault repose sur la résolution des équations de Maxwell. Les grandeurs électromagnétiques dans le composant varient à la fois dans l'espace et dans le temps. Pour calculer ces grandeurs à tout instant, la méthode la plus précise consiste à intégrer dans le temps des équations régissant le problème.

La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour résoudre des problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. Elle s'avère très bien adaptée à la résolution des problèmes électromagnétiques, d'où son utilisation dans cette partie de notre étude.

L'objectif de ce chapitre dans sa première partie est de résumer les équations mathématiques de base qui décrivent les phénomènes électromagnétiques intervenant dans de contrôle non destructif par Courant de Foucault, la simplification de ces équations, et nous établissons aussi les différentes formulations des configurations de l'impédance et cela en fonction de la grandeur d'état, selon laquelle les équations simplifiées de Maxwell sont résolues.

Ainsi on détermine l'impédance d'un capteur absolu à courant de Foucault par deux méthodes (la méthode d'énergie et la méthode directe), on exprime aussi l'impédance d'un

capteur différentiel. Dans la deuxième partie de ce chapitre on présentera les divers résultats de simulation des modèles élaborées.

II.1 Phénomènes électromagnétiques

II.1.1 Historique

Tout au début, les phénomènes électriques et magnétiques ont été étudiés séparément. Les interactions entre ces deux phénomènes ont été mises en évidence pour la première fois par Ampère (1775-1836), qui a prouvé que la source du magnétique est le courant électrique ; Gauss (1777-1855), a démontré que la source du champ électrique est la charge électrique statique ; et Faraday (1791-1867) qui relie la création de l'un des champs électriques et magnétiques par l'autre et vis vers ça. Le couplage de deux phénomènes qu'on regroupe en mot «Electromagnétisme », on le doit à James Maxwell (1831-1879). Ce génie a exploité les découvertes des précédents, pour donner une formulation plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques [23-25].

II.1.2 Equations de l'électromagnétisme

L'objet fondamental de l'électromagnétisme est de décrire les interactions qui s'exercent à l'intérieur d'un système des particules chargées.

Dans un repère Galiléen, la force qui s'exerce sur une particule de charge q dont la vitesse est v , est donnée par la loi de la force de Lorentz :

$$F = q(E + v \wedge B) \quad (\text{II.1})$$

Cette expression définit des champs physiques E et B appelés champ électromagnétique. Le problème général de l'électromagnétisme est résolu si l'on sait calculer ces champs à partir de la distribution de la charge ρ et de courants J qui les créent. Nous donnons-ci dessous un système de quatre équations locales appelées équations de Maxwell qui, comme nous le montrons ultérieurement, permettent de calculer les champs E et B à partir de leurs sources ρ et J , ce qui complète la théorie électromagnétique [26].

II.1.3 Les équations de Maxwell

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques.

Quatre grandeurs vectorielles caractérisent le champ électromagnétique. Ces grandeurs, qui dépendent de l'espace et du temps sont le champ électrique E , le champ magnétique H , l'induction magnétique B et l'induction électrique D . C'est grâce à Maxwell qu'aujourd'hui nous pouvons modéliser les phénomènes électromagnétiques en se basant sur les quatre équations suivantes

a) Equation du flux magnétique

$$\operatorname{div}(B) = 0 \quad (\text{II.2})$$

b) Equation de Maxwell- Faraday

$$\operatorname{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

c) Equation de Maxwell-Gauss

$$\operatorname{div}(D) = \rho \quad (\text{II.4})$$

d) Equation de Maxwell- Ampère

$$\operatorname{rot}(H) = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

avec ;

J : Vecteur densité de courant ;

ρ : Densité de charge électrique ;

$\frac{\partial D}{\partial t}$: Densité de déplacement.

L'équation (II.2) est une généralisation de la loi d'Ampère, $\operatorname{rot}(H) = J$. Elle constitue avec (II.3) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.2) et (II.3) constituent des équations dites de conservation.

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par des relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II.2, II.5) serait indéterminé.

Des relations supplémentaires caractérisant les différents milieux doivent être ajoutées aux équations précédentes. Pour les milieux isotropes, nous avons les équations suivantes :

a) Caractéristique magnétique

$$B = \mu H \quad (\text{II.6})$$

Pour un milieu magnétique

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II.7})$$

Pour un milieu amagnétique

$$\mu_r = 1 \quad (\text{II.8})$$

où ;

$\mu_0 [H/m] = 4\pi 10^{-7}$: Perméabilité du vide.

μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré.

b) Caractéristique diélectrique

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (\text{II.9})$$

où ;

ε_0 : Permittivité de l'air ;

ε_r : Permittivité relative du milieu considéré.

Pour un milieu conducteur la densité du courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée

$$J = J_s + J_{ind} \quad (\text{II.10})$$

$$J_{ind} = \sigma [E + v \wedge B] \quad (\text{II.11})$$

où :

σ : Conductivité électrique.

v : Vecteur vitesse.

J_s : Densité du courant imposé dans l'inducteur.

J_{ind} : Densité du courant induit.

(σE) : représente le courant de conduction résultant du champ électrique E .

$\sigma(v \wedge B)$: exprime le courant résultant du mouvement à la vitesse v .

I.1.4 Changement de milieu

Si le système est composé de deux milieux différents, il faut ajouter des conditions aux limites lors du passage d'un milieu à un autre qui se résument comme suit :

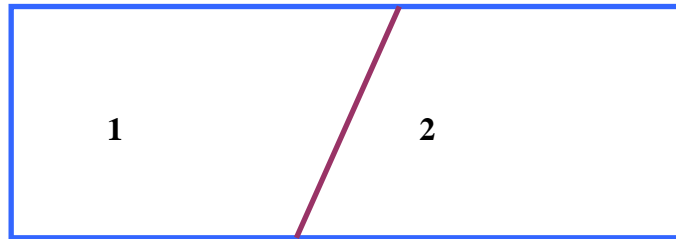


Figure II.1 : Interface entre deux milieux différents.

Il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux, considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 ayant des propriétés physiques différentes séparées par une interface (figure II.1).

Dans notre cas, il y a un changement de milieu représenté par une forte variation de la conductivité entre l'air et la plaque métallique. En appelant (n) le vecteur normal à (Σ) l'interface air/métal.

Les équations précédentes sont valables en tout point d'un milieu continu. À la limite de séparation des deux milieux correspondant respectivement aux indices 1 et 2, pour la simplification du problème :

- ✓ Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique

$$E_1 \wedge n = E_2 \wedge n \quad (\text{II.12})$$

- ✓ Continuité de la composante normale du vecteur induction magnétique B

$$B_1 \wedge n = B_2 \wedge n \quad (\text{II.13})$$

- ✓ Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique H

$$H_1 \wedge n = H_2 \wedge n \quad (\text{II.14})$$

- ✓ Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique D , en présence de charges superficielles ρ_s

$$n(D_1 - D_2) = \rho \quad (\text{II.15})$$

Où :

n : est le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2.

1.1.5 Hypothèses simplificatrices

Toutes les équations présentées précédemment décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais dans la plupart des cas et selon la forme des dispositifs qu'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables ; par conséquent, les équations se simplifient pour donner lieu à des modèles plus simples.

- ✓ La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho = 0$) ;
- ✓ les courants d'alimentation sont supposés créés par un générateur de courant parfait ;
- ✓ l'induction magnétique rémanente est considérée nulle ($B_r = 0$) ;
- ✓ dans le système capteur –cible nous nous intéressons au mouvement.

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre sont

$$J = J_s + \sigma E \quad (\text{II.16})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \text{rot}(H) = J \\ \text{div}(B) = 0 \\ \text{div}(D) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

1.1.6 Résolution des équations de Maxwell

La formulation des équations de Maxwell en équations simples est nécessaire dans le but de réduire le nombre d'inconnues et de simplifier la résolution.

Il existe un grand nombre de formulations des équations de Maxwell, nous nous proposons de présenter simplement celles fréquemment utilisées pour l'étude des dispositifs de capteurs inductifs à courant de Foucault qu'on peut classer en deux groupes [27].

- ✓ Celles qui utilisent des variables (inconnues) de type potentiel.
- ✓ Et celles qui utilisent des variables de type champ.

1.1.6.1 Formulation en termes de potentiel vecteur

A partir de l'équation (II.2), on définit le potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} par l'équation

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A}) \quad (\text{II.18})$$

Dans le cas général, il existe une infinité de vecteurs potentiels \mathbf{A} pouvant satisfaire la relation (II.18) [28].

En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire f est nul, donc, tout vecteur $(\mathbf{A} + \text{grad}(\varphi))$ satisfait la relation (II.18), d'où la nécessité d'imposer une condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de Coulomb

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0 \quad (\text{II.19})$$

L'équation que nous allons établir s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels il y a présence de courant de Foucault provenant de la variation des champs dans le temps. En remplaçant \mathbf{B} par $\text{rot}(\mathbf{A}) = 0$, l'équation (II.3) devient

$$\text{rot} \left\{ \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right\} \quad (\text{II.20})$$

A partir de cette équation, on peut définir un potentiel scalaire électrique φ tel que

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\text{grad}(\varphi) \quad (\text{II.21})$$

La combinaison des équations (II.16) et (II.21) donne

$$\sigma \mathbf{E} = \mathbf{J} - \mathbf{J}_s = \sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}(\varphi) \right\} \quad (\text{II.22})$$

où :

$$\mathbf{J} = - \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}(\varphi) \right\} + \mathbf{J}_s \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant J par son expression (II.23) dans le système d'équations (II.17), on aboutit à l'expression vectorielle condensée du système d'équations (II.17) représentant ainsi l'équation électromagnétique en potentiel vecteur magnétique A , donnée par le système d'équations suivant

$$\begin{cases} \text{rot}(\nu \text{rot}(A)) = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}(\varphi) \right\} + J_s \\ \text{div}(A) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Où :

$\nu = \frac{1}{\mu}$: désigne la réductivité magnétique.

L'équation (II.24) prend différentes formes selon la région d'étude et les caractéristiques des différents milieux.

1.1.7 Modèle en 2D

Le modèle utilisé pour réaliser notre simulation contient le capteur (bobines + matériau amagnétique), la plaque de métal à contrôler une épaisseur de (5mm), et de l'air autour du capteur et la plaque qui à (lift-off), distance entre le capteur et la plaque est de 1mm).

Le capteur est en cuivre, peut-être constitué de deux bobines encerclant le tube ou une sonde à l'intérieur du tube. Le défaut peut être sur la surface latérale externe ou interne du tube ou, peut être situé à l'intérieur de l'épaisseur du tube, [29]. Le défaut provoqué est géométriquement axisymétrique, interne ou externe ou au milieu de l'épaisseur du tube, de profondeur 4 mm, (Figure II.2).

Le modèle étant axisymétrique (il demeure inchangé par rotation autour de l'axe vertical passant par le centre de la plaque), il suffit donc de réaliser un modèle à deux dimensions, [30]. Le modèle présenté est constitué de quatre régions

- ✓ Une boîte d'air ;
- ✓ une pièce conductrice soit électriquement (Aluminium) ou bien conductrice magnétiquement (pièce magnétique) ;
- ✓ une bobine qui assure l'émission et la réception des deux flux de sens opposés.

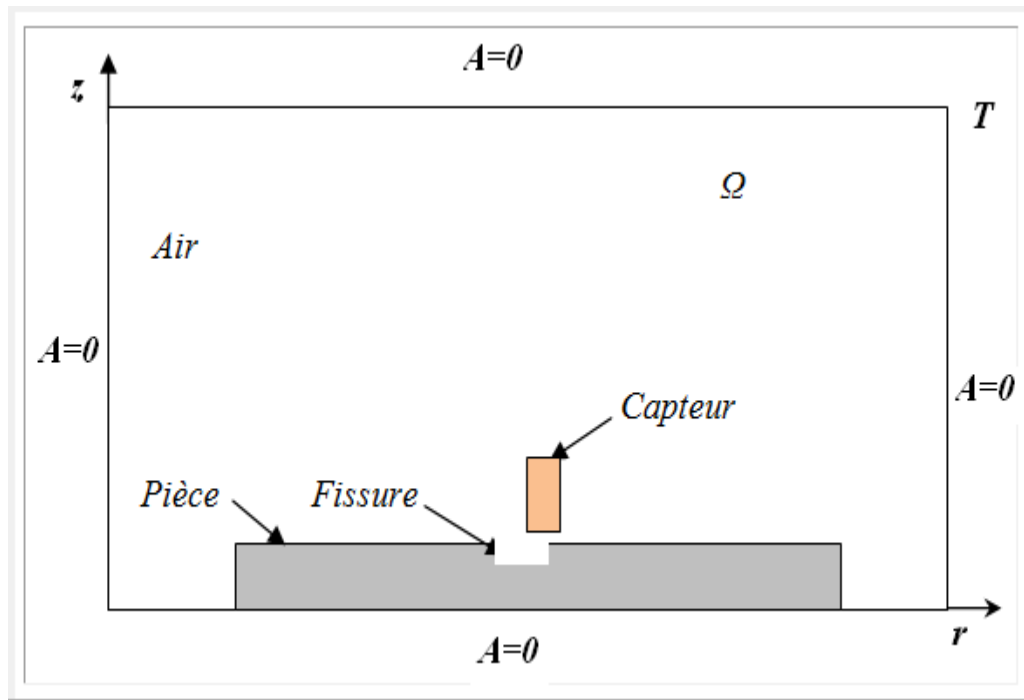


Figure II.2 : Géométrie du dispositif en 2D.

a) Région Inducteur

On considère deux cas

- ✓ L'inducteur est alimenté par une source de tension, dans ce cas le potentiel scalaire φ n'est autre que la tension connue de la source V

$$\text{rot}(\text{vrot}(A)) = -\text{grad}(V) \quad (\text{II.24})$$

- ✓ L'inducteur est alimenté par une source de courant de densité J_s d'amplitude connue, dont la distribution est uniforme dans la section du conducteur, l'équation (II.25) devient

$$\text{rot}(\text{vrot}(A)) = J \quad (\text{II.26})$$

b) Région non conductrice

Dans notre cas cette région est constituée de l'air. On retrouve alors l'équation de Laplace :

$$\text{rot}(\text{vrot}(A)) = 0 \quad (\text{II.27})$$

c) Région conductrice (Pièce)

L'équation régissant dans cette région

$$\text{rot}(\nu \text{rot}(A)) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.28})$$

avec :

$$-\sigma \text{grad}(V) \quad \text{En 2D.}$$

1.1.8 Équation électromagnétique d'un système axisymétrique

Dans une configuration axisymétrique (coordonnées cylindriques (r, z)), la formulation utilisant le potentiel vecteur offre l'intérêt suivant : lorsque le courant d'excitation est orienté suivant le directionnel, le système présente une seule inconnue, la composante ortho radiale (A) du vecteur \mathbf{A} . Dans une telle configuration, les courants sont perpendiculaires au plan d'étude.

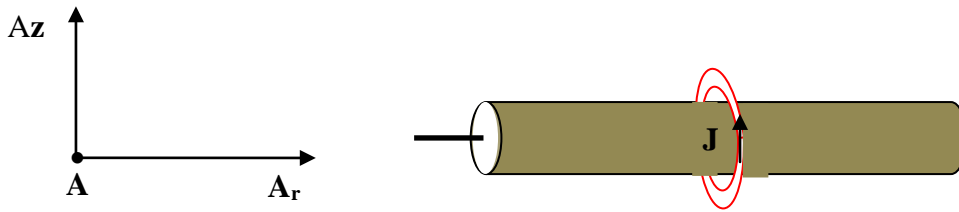


Figure II.3 : Dispositif axisymétrique.

Les différentes grandeurs vectorielles ont les composantes suivantes

$$J = \begin{Bmatrix} 0 \\ J_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad E = \begin{Bmatrix} 0 \\ E_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad A = \begin{Bmatrix} 0 \\ A_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad H = \begin{Bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{Bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Comme le vecteur \mathbf{A} est confondu avec sa composante orthoradiale, sa divergence est donc nulle, avec ces conditions le système d'équation se réduit à

$$\nu(\text{rot}(\text{rot}(A))) = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}(\varphi) \right\} + J \quad (\text{II.30})$$

Or, dans une configuration axisymétrique, le terme $\text{grad}(\varphi)$ est nul. Ainsi l'équation (II.30) prend la forme

$$\nu(\text{rot}(\text{rot}(A))) = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\} + J_s \quad (\text{II.31})$$

Dans un système de coordonnées cylindriques, nous aurons

$$\nu \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial A_\theta}{r^2} - \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} = J_{s\theta} \quad (\text{II.32})$$

$$\text{rot}(A) \begin{cases} -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} & (e_r) \\ 0 & (e_\theta) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) & (e_z) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Ceci réduit la forme vectorielle (II.33) à la relation suivante

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial t} = J_{s\theta} \quad (\text{II.34})$$

Si nous considérons le potentiel vecteur magnétique modifié $A = r A_\theta$. Comme inconnue du problème, et si on prend pour la commodité de l'écriture $J_{s\theta} = J_s$ l'équation (II.34) devient

$$\nu \left(\left(-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A}{\partial t} \right) = J_s \quad (\text{II.35})$$

1.1.9 Méthodes de résolution

Une équation aux dérivées partielles formulées (II.35), cette dernière décrivant les systèmes électromagnétiques.

La résolution de cette équation par des méthodes analytiques est impossible dans le cas général où la géométrie des dispositifs étudiés est complexe, et/ou les matériaux ont des propriétés magnétiques non linéaires. Seules des méthodes numériques peuvent être utilisées, dans ce cas, au lieu de résoudre l'équation de façon continue, on discrétise le potentiel vecteur en un nombre fini de points dans le domaine d'étude [28].

Pour résoudre ce type de problème on utilise des méthodes dites numériques telles que la méthode des intégrales de frontières, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis, méthodes mixtes qui sont une combinaison de deux méthodes numériques (éléments finis+intégrales de frontières par exemple...) dont on donne un aperçu dans les paragraphes suivants

1.1.9.1. Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple on peut citer les travaux de [31] et [32] qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve ;

- ✓ Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents [31].
- ✓ Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques [32].

Les travaux de recherches plus récentes ont permis notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane [33] ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane [33]. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors mettre en œuvre des méthodes numériques.

1.1.9.2 Méthodes numériques

L'évolution rapide de l'informatique et des techniques de calculs numériques a contribué largement à l'évolution de ce type de modélisation. L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles, compte tenu des conditions aux limites à celle d'un système d'équations algébriques dans le domaine d'étude dont la solution conduit à la distribution des champs électromagnétiques. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer ;

- ✓ ***La méthode des différences finies***, historiquement la première, consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes.

- ✓ **La méthode des éléments de frontières** repose sur la méthode la plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse dûe à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée [34]. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques.
- ✓ **La méthode des intégrales de volumes** repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenue, les champs électriques ou magnétiques dûent à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolutions entre ces fonctions de Green et les sources (électriques ou magnétiques) mises en jeu. En pratique, ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments : les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative.
- ✓ **La méthode des éléments finis** [34] [35] est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :
 - a) Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
 - b) Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres ...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local.
 - c) Matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
 - d) Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

Dans ce travail nous avons utilisé la méthode des éléments finis qui est une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaire ou non linéaire, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [28]. Appliquée, il y a 50 ans, aux problèmes de mécanique de structure, cette

méthode a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels.

L'étude par éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques [26]. Cependant elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont : la méthode variationnelle et la méthode des résidus pondérés.

La méthode variationnelle de Ritz consiste à rendre extrémale une fonctionnelle qui est une intégrale qui dépend de la fonction inconnue et de ses dérivées. Souvent, cette fonctionnelle représente l'énergie du système. Par contre la méthode des résidus pondérés permet de traiter directement l'équation aux dérivées partielles sans avoir à passer par un principe variationnel. Elle consiste à projeter l'équation à résoudre sur une base de fonction.

1.9.2.1 Méthode de Galerkin

Cette méthode est un cas particulier où les fonctions de projection ψ_i sont identiques aux fonctions d'interpolation α_i .

$$\psi_i(x, y) = \alpha_i(x, y) \quad (\text{II.36})$$

La fonctionnelle de l'équation (II.36) peut prendre la forme suivante

$$R_i = \iint_{\Omega} \alpha_i(x, y) [\Delta(\sum_{j=1}^{nn} \alpha_j(x, y) f_j) - g] d\Omega \quad (\text{II.37})$$

Les $\alpha_i(x, y)$ sont calculées pour que R_i soit nul. Dans chaque domaine élémentaire désigné par e , R_i est décrit par l'équation suivante

$$R_i^e = \iint_{\Omega_e} \alpha_i(x, y) [\Delta(\sum_{j=1}^{nn} \alpha_j(x, y) f_j) - g] d\Omega^e \quad (\text{II.38})$$

$$R_i = \sum_{e=1}^{ne} \mathbf{R}_i^e \quad (\text{II.39})$$

où :

ne : Correspond au nombre d'élément sur le domaine Ω .

a) Forme matricielle élémentaire

Il s'agit de mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre, dans chaque domaine élémentaire Ω^e . L'équation (II.39) prend alors la forme suivante

$$R^e = [K]^e [f]^e - [F]^e \quad (\text{II.40})$$

b) Assemblage des matrices élémentaires

La forme R étendue au domaine Ω est la somme des formes R^e des domaines élémentaires Ω^e

$$R = \sum_{e=1}^{ne} \mathbf{R}_i^e = 0 \quad (\text{II.41})$$

On aura alors,

$$R = \sum_{e=1}^{ne} [K]^e [f]^e - [F]^e = [K][f] - [F] = 0 \quad (\text{II.42})$$

$[K]$: Est la matrice globale discrétisée, obtenue par la somme des matrices élémentaires étendues. De la même manière on réalise une expansion de $[F]^e$ qui donne le vecteur-source $[F]$.

Ainsi, nous obtenons un système d'équations algébriques de la forme

$$[K][A] = [F] \quad (\text{II.43})$$

La résolution du système (II.43) se fait après introduction des conditions aux limites qui permettent d'évaluer les valeurs nodales du vecteur potentiel magnétique.

1.1.9.3 Conditions aux limites et conditions d'interfaces

Pour que le problème soit complètement défini, il faut déterminer la contribution des conditions aux limites sur les frontières du domaine de l'étude, ainsi que les conditions de passage entre différents milieux constituant ce domaine.

a) Conditions aux limites

On distingue essentiellement deux types de conditions aux limites, dans les problèmes de champ électromagnétique formulés en termes du vecteur potentiel magnétique

- ✓ **Conditions aux limites de Dirichlet** ($A = A_0$): Dans ce cas, le vecteur potentiel magnétique A est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique B est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotentielle. On rencontre cette condition lorsqu'une partie où tout le contour se trouve à une distance suffisamment éloignée des sources d'excitation, pour pouvoir négliger les valeurs du vecteur potentiel magnétique sur cette partie de la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine c'est-à-dire on suppose que ($A = 0$) [28].
- ✓ **Condition aux limites de Neumann homogène** ($\frac{\partial A}{\partial n} = 0$).

On la trouve sur les plans où les axes d'axisymétrique.

b) Conditions d'interfaces

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre chacun des deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction \vec{B} est continue au passage entre deux milieux différents tels que

$$Bn_1 = Bn_2 \quad (\text{II.44})$$

Il est évident que la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} l'est également, en absence des courants surfaciques.

$$Ht_1 = Ht_2 \quad (\text{II.45})$$

I.1.9.3 Résolution du système

C'est la dernière étape qui mène à la détermination des valeurs f_i de la fonction $f(x, y)$ recherchée en chaque nœud; il s'agit de résoudre le système (II.43) mais de plus, il faut tenir compte des conditions aux limites qui, en général sont telles que certains vecteur de f_i où sa dérivée est connue sur les parties du contour du domaine d'étude Ω .

9.3.1 Discrétisation du domaine

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent des petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine. Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués de triangles ou de rectangles. Dans le cas de problèmes tridimensionnels, le domaine peut être subdivisé en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques. Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds..

9.3.2 Maillage en éléments triangulaires linéaires

Étant donné que notre étude est bidimensionnelle (axisymétrique), la résolution triangulaire est la plus indiquée. Les triangles sont constitués de trois nœuds confondus avec leurs trois sommets. Pour affiner des parties du domaine de résolution nous changeons seulement la taille de ces éléments. La numérotation des nœuds est faite de gauche à droite puis de bas en haut. Tandis que pour les éléments, nous numérotions, de gauche à droite, [27].

1.1.10 Formulation éléments finis des équations électromagnétiques

1.10.1 Équation électromagnétique linéaire

a) Formulation intégrale

Nous appliquons la méthode de Galerkin à l'équation. Dans le cas axisymétrique, nous ferons les changements de variables suivants, [28]

$$A = rA_\theta \quad (\text{II.46})$$

$$\psi_i = \frac{\alpha_i}{r} \quad (\text{II.47})$$

Dans le cas des éléments triangulaires du premier ordre, nous avons

$$\alpha_i = \frac{1}{2\Delta^e} (a_i + b_i r + c_i z) \quad i=1, 2, 3 \quad (\text{II.48})$$

a_i, b_i, c_i, Δ^e : sont obtenus par les expressions (II.60) et (II.61) , en remplaçant x par r et y par z.

En introduisant les équations (II.46) et (II.47), on obtient la forme intégrale suivante en régime harmonique $\frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\alpha_i}{r} \left[-\frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + j\omega\sigma \frac{A}{r} - J \right] \right) d\Omega = 0 \quad (\text{II.49})$$

avec ;

$$d\Omega = 2\pi r dr dz \quad (\text{II.50})$$

Ou encore

$$\left\{ - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} j\omega\sigma \frac{A}{r} \right] d\Omega - \Omega \alpha_i j d\Omega = 0 \right. \quad (\text{II.51})$$

L'intégration par parties des termes comportant des dérivées d'ordre deux génère une forme plus simple. Cette forme comporte des intégrales de frontières qui permettent d'explicitier les conditions aux limites naturelles

$$\left\{ v \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right] \frac{dr dz}{r} + v \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(v \int_T \left[\frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{dT}{r} - v T \frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, z) dT r + \Omega j \omega \sigma \alpha_i A dr dz r - \Omega \alpha_i j dr dz = 0 \right. \quad (\text{II.52})$$

$$= \left\{ v \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(\int_T v \left[\frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{dT}{r} - v \int_T \left[\frac{\partial A}{\partial z} \alpha_i \cos(n, z) \right] \frac{dT}{r} \right) + \Omega j \omega \sigma \alpha_i A dr dz r - \Omega \alpha_i j dr dz = 0 \right. \quad (\text{II.53})$$

avec :

$\cos(n, r)$ et $\cos(n, z)$ sont les cosinus directeurs au point considéré de la frontière T du domaine de résolution.

On peut écrire l'équation sous la forme suivante

$$v \int_{\Omega} [\text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(A)] \frac{dr dz}{r} - v \int_T [\text{grad}(A) n] \alpha_i \frac{dT}{r} + \int_{\Omega} [j\omega\sigma \alpha_i A] \frac{dr dz}{r} - \Omega \alpha_i j dr dz = 0 \quad (\text{II.54})$$

n : Vecteur unitaire normal au point considéré de la frontière.

b) Introduction des conditions aux limites

Le terme $v \int_T [\text{grad}(A) n] \alpha_i \frac{dT}{r}$ exprime la condition aux limites naturelle de type Neumann.

Dans le cas de conditions du type Dirichlet ($A = C^{te}$), ou de Neumann homogène, ce terme sur la frontière s'annule.

c) Formulation matricielle

La discrétisation de A à l'aide des fonctions d'interpolation conduit à l'équation suivante

$$\sum_{j=1}^n \mu \left(\int_{\Omega} \left[\text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(\alpha_j A_j) \frac{drdz}{r} \right] + \left[j\omega \sigma \alpha_i \alpha_j A_j \frac{drdz}{r} \right] \right) = \int_{\Omega} \alpha_i J drdz \quad (\text{II.55})$$

$i = 1, 2, \dots, n$ (n étant le nombre de nœuds).

En faisant une extension de l'équation (II.55) pour tous les nœuds du domaine, nous obtenons l'équation algébrique suivante

$$(j\omega[L] + [M])[A] = [F] \quad (\text{II.56})$$

Avec :

$$L_{ij} = \int_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j \frac{1}{r} drdz = \frac{1}{R_{eq}} \int_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j drdz \quad (\text{II.57})$$

$$M_{ij} = \int_{\Omega} \nu \text{grad}(\alpha_i) \frac{1}{R_{eq}} \int_{\Omega} \nu \text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(\alpha_j) drdz \quad (\text{II.58})$$

$$F_i = \int_{\Omega} \alpha_i J drdz \quad (\text{II.59})$$

où :

$\frac{1}{R_{eq}}$: est la valeur moyenne du rayon r dans l'élément

$$R_{eq} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} \quad (\text{II.60})$$

$[A]$: le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel magnétique modifié aux nœuds du maillage. C'est un complexe qui s'écrit sous la forme suivante

$$A = A^{(r)} + jA^{(i)} \quad (\text{II.61})$$

$$J = J^{(r)} + jJ^{(i)} \quad (\text{II.62})$$

$A^{(r)}, J^{(r)}$: Partie réelle ;

$A^{(i)}, J^{(i)}$: Partie imaginaire

Nous avons :

$$(j\omega[L] + [M])\{A^{(r)} + jA^{(i)}\} = [F] \quad (\text{II.63})$$

Après avoir déterminé le potentiel vecteur pour tout le maillage on peut déterminer les autres paramètres, l'induction magnétique, champ magnétique, les courants induits et l'impédance du capteur. Le contrôle par les courants de Foucault dépend du changement de l'impédance du capteur dans la présence d'un défaut, le calcul de cette impédance est fait de deux manières soit à partir du potentiel vecteur où la source est une source de courant comme dans notre cas soit à partir d'une source de tension.

1.1.11 Calcul de l'impédance

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut-être calculée. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode d'énergie.

a) Méthode directe

L'impédance d'une seule spire de bobine (sonde) de rayon r portant un courant alternatif I_s est donnée par

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad (\text{II.64})$$

où :

V : est la tension induite dans la bobine, exprimée en termes de l'intensité du champ électrique E comme

$$V = - \int E dl \quad (\text{II.65})$$

A partir de l'équation (II.21) en régime harmonique

$$E + \frac{\partial A}{\partial t} = -grad(\varphi) \quad (\text{II.66})$$

Nous avons

$$E = -j\omega A - grad(\varphi) \quad (\text{II.67})$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire $grad(\varphi) = 0$, en remplaçant (II.67) dans (II.65), nous aurons

$$V = j\omega \int Adl \quad (II.68)$$

A partir de l'équation (II.65) l'impédance de la bobine est donnée par

$$Z = \frac{j\omega \int Adl}{I_s} \quad (II.69)$$

Qui, pour une seule spire de bobine de rayon r est

$$Z = j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot r \cdot A}{I} \quad (II.70)$$

L'impédance du capteur est composée de deux parties, partie réelle qui est la résistance et une partie imaginaire, la réactance.

Impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petites alors le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale A_{ci} et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale r_{ci} . À partir de l'équation (II.70) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par [36]

$$z = j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci}}{I} \quad (II.71)$$

Si N est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon, N_t est la densité de spire de l'élément, et a_i la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément (i) est donnée par:

$$Z = j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot N_i \cdot a_i}{I} \quad (II.72)$$

Si le nombre d'éléments dans l'échantillon de la bobine est N alors l'impédance totale est donnée par

$$Z = j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot N_t}{I} \sum_{l=1}^{N_c} a_i \cdot A_{ci} \cdot r_{ci} \quad (II.73)$$

L'impédance de la bobine dans un problème 2D ou axisymétrique peut être calculée en utilisant de la méthode expliquée ici. Cette méthode prend la valeur du potentiel vecteur magnétique constante suivant la longueur du dispositif qui est parallèle à la source dans ce cas le plan d'étude est (xoy) ou dans la direction circonférentielle de la bobine (cas axisymétrique). Une autre méthode de calcul de l'impédance est basée sur le calcul des énergies stockées et dissipées est expliquées dans la section suivante, [36].

c) Méthode de l'énergie

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée et l'énergie dissipée dans le système.

On sait que l'impédance est composée de deux parties, une partie réelle exprimée par la résistance et une partie imaginaire exprimée par l'inductance.

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (\text{II.74})$$

Les pertes joules sont données par [2, 6,7]

$$P = \frac{1}{2} \int_V \frac{J^2}{\sigma} dv = \frac{1}{2} \int_V \frac{JJ^*}{\sigma} dv \quad (\text{II.75})$$

Comme $J = \sigma E \Rightarrow -\sigma j\omega A$ (II.76)

$$P = \frac{\omega^2}{2} \int_V \sigma AA^* dv \quad (\text{II.77})$$

La substitution des équations (II.74) et (II.77) donne

$$R = \frac{\omega^2}{2} \int_V \frac{\sigma AA^*}{I^2} dv \quad (\text{II.78})$$

La réactance peut être déterminée à partir de l'énergie électromagnétique stockée sur un volume, telle que

$$X = 2\omega \frac{W_m}{I^2} \quad (\text{II.79})$$

L'énergie électromagnétique stockée est donnée par l'expression

$$w_m = \frac{1}{2} \int_v BH dv \quad (\text{II.80})$$

$$w_m = \frac{1}{2} \int_v \frac{1}{\mu} BB^* dv \quad (\text{II.81})$$

$$w_m = \frac{1}{2} \int_v AJ dv \quad (\text{II.82})$$

Par substitution des deux équations (II.79) et (II.82) on obtient

$$X = \omega \int_v \frac{AJ^*}{I^2} = \omega L \quad (\text{II.83})$$

Où : L est l'inductance de la bobine.

L'impédance du capteur est donnée par

$$Z = R + jX \quad (\text{II.84})$$

Dans cette partie, nous avons utilisé l'analyse par la méthode des éléments finis du modèle magnétodynamique pour le problème qui est l'objet de notre étude. Nous avons établi la formulation de notre modèle pour le cas d'un système axisymétrique sans prendre en considération la saturation du matériau. Ce modèle adopté nous a permis de calculer l'impédance du capteur pour une fissure donnée. Les résultats de simulation ainsi obtenus feront l'objet d'une étude minutieuse dans la partie suivante.

II.2 Applications et simulations

La simulation du contrôle non destructif par courants de Foucault a maintenant atteint une maturité industrielle à travers les produits commerciaux FLUX2D, FLUX3D et CIVA. Ces outils complémentaires permettent de traiter la majorité des configurations de contrôle (planes ou tubulaires).

Après avoir formulé les équations régissant notre modèle d'étude dans la partie précédente, dans ce qui suit, nous présenterons les résultats des simulations effectuées sous environnement MATLAB (utilisant certaines fonctions de sa boîte à outils PDETOOL). Il est à noter que la pièce à étudier présente une symétrie de révolution, c'est ce qui va permettre de

limiter l'étude sur la moitié du domaine, avec des conditions aux limites de Dirichlet sur sa frontière.

Nous avons développé un programme, sous environnement MATLAB pour résoudre le problème formulé précédemment par la méthode des éléments finis, qui nous a permis de visualiser les lignes de champ, le vecteur potentiel A et le calcul de l'impédance lors du balayage de toute la surface des deux pièces à contrôler qui présentent deux fissures de formes différentes (rectangulaire et triangulaire). L'organigramme Figure II.4 représente les différentes étapes pour la résolution de l'équation électromagnétique linéaire donnée dans le chapitre précédent

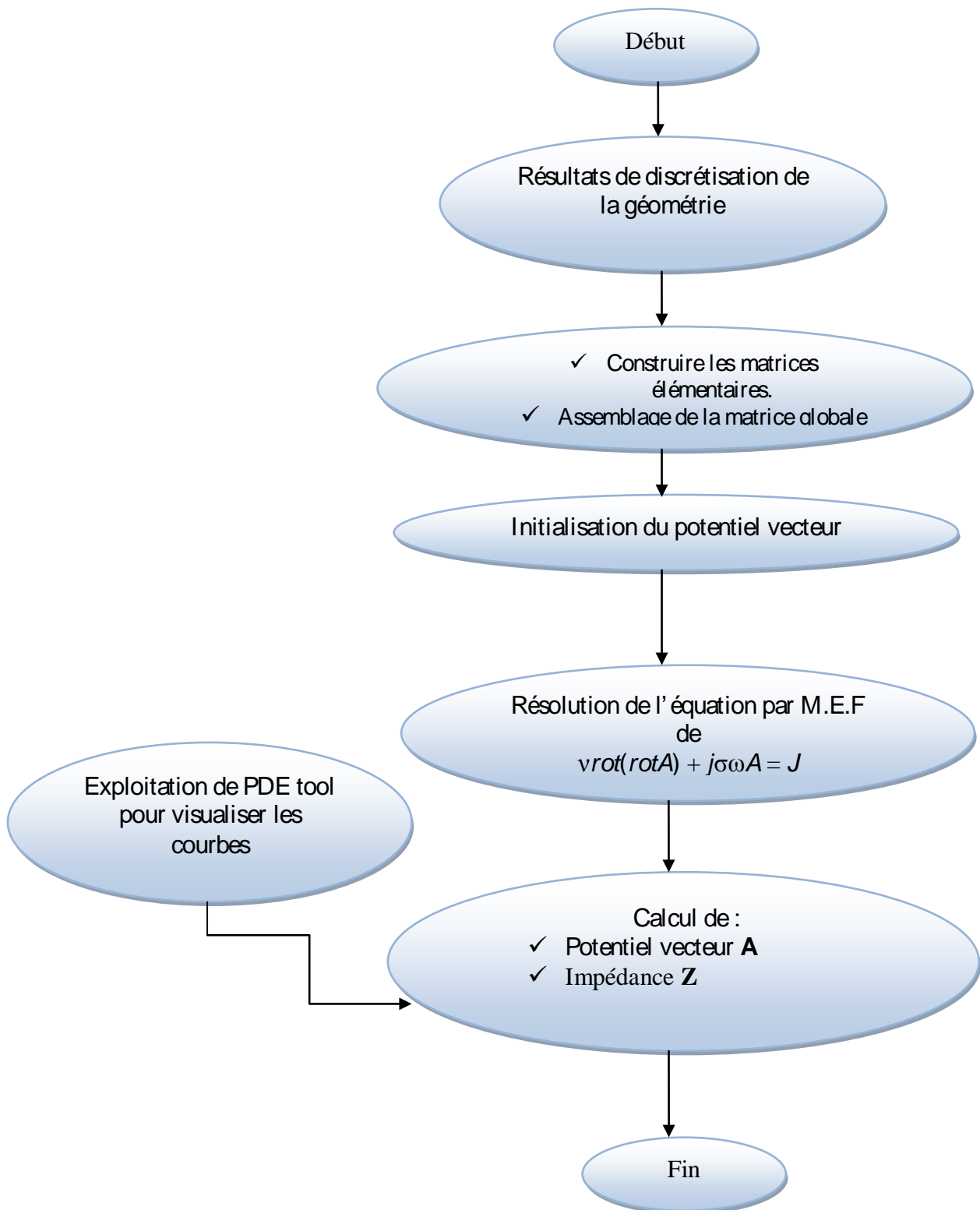


Figure II.4 : Organigramme de la résolution du problème électromagnétique.

II.2.1 Modèle proposé

Théoriquement, le champ magnétique s'étend jusqu'à l'infini ($A = 0$), mais en vue d'une modélisation magnétique, il est nécessaire de ramener les limites théoriques à une distance finie qui peut être aussi grande que l'exigence de la précision. La Figure II.5 montre le quart du dispositif limité par le domaine de résolution, qui se compose d'un inducteur, pièce conductrice et l'air

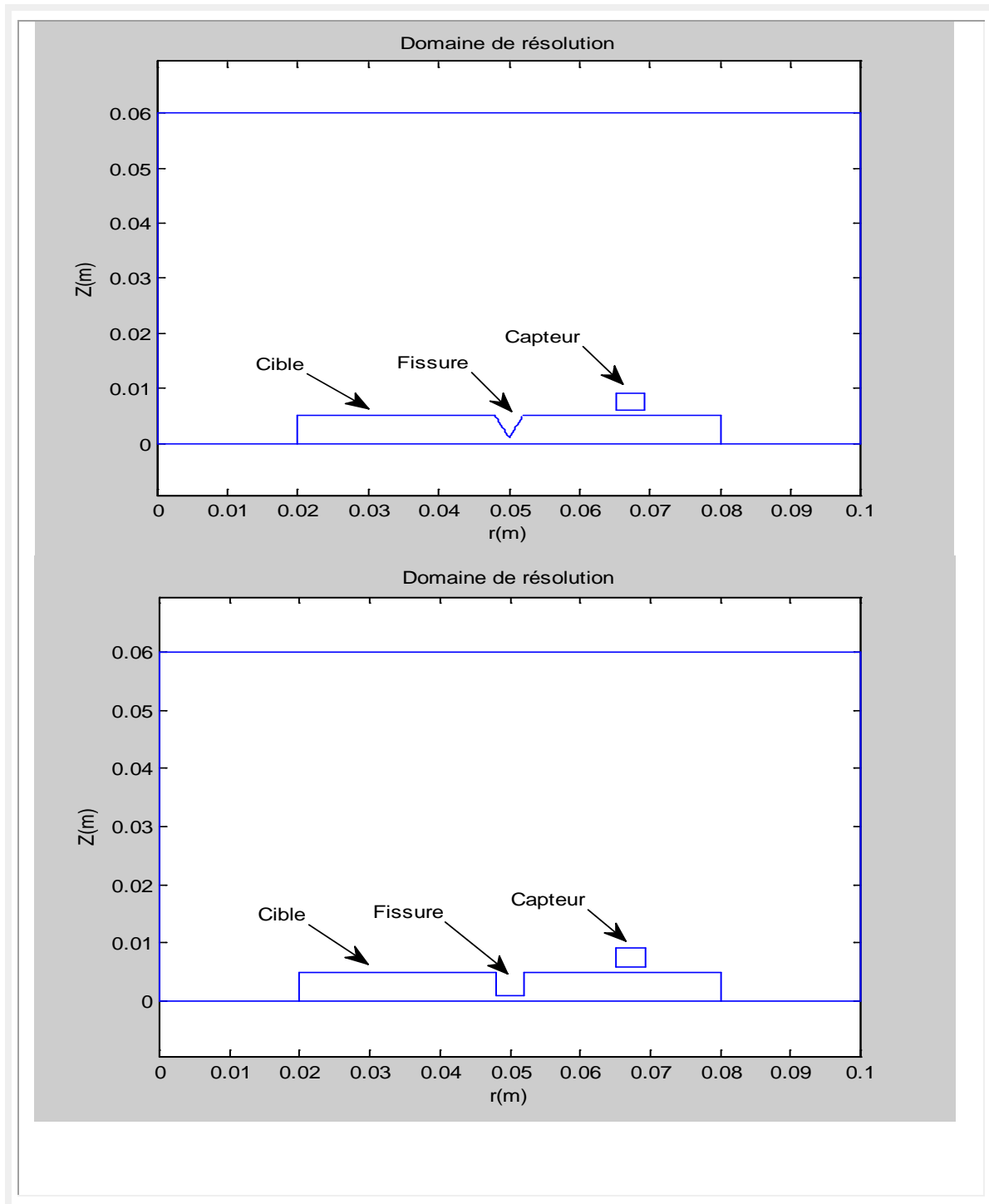


Figure II.5 : Domaines de résolution.

II.2.2 Maillage du domaine d'étude

On utilise le meilleur de Matlab au domaine d'étude présenté par la Figure II.6, il en résulte trois matrices caractéristiques

- ✓ La matrice [p], matrice des points (nœuds), comprend les coordonnées du maillage.

- ✓ La matrice [e], matrice des segments (arrêtes), englobe les indices et les sous-domaines de chaque segment.
- ✓ La matrice [t], matrice des triangles (éléments), contient les indices des points et les sous-domaines de chaque triangle.

II.2.3 Simulation d'un (capteur-tube magnétique) avec défaut externe

Les fissures doivent être présentées à des surfaces internes ou externes des matériaux amagnétiques comme sur les surfaces internes ou externes des matériaux magnétiques, les causes de ces derniers sont multiples (corrosion, humidité, longue durée d'entraînement...).

Dans cette section on s'intéresse à la simulation d'un tube magnétique endommagé par une fissure de profondeur 4mm, caractérisé par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée $36.7 \cdot 10^6$ MS, excité par un courant sinusoïdal de densité de courant $J = 2.67 \cdot 10^6$ A/m et une fréquence de 10 KHz. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :

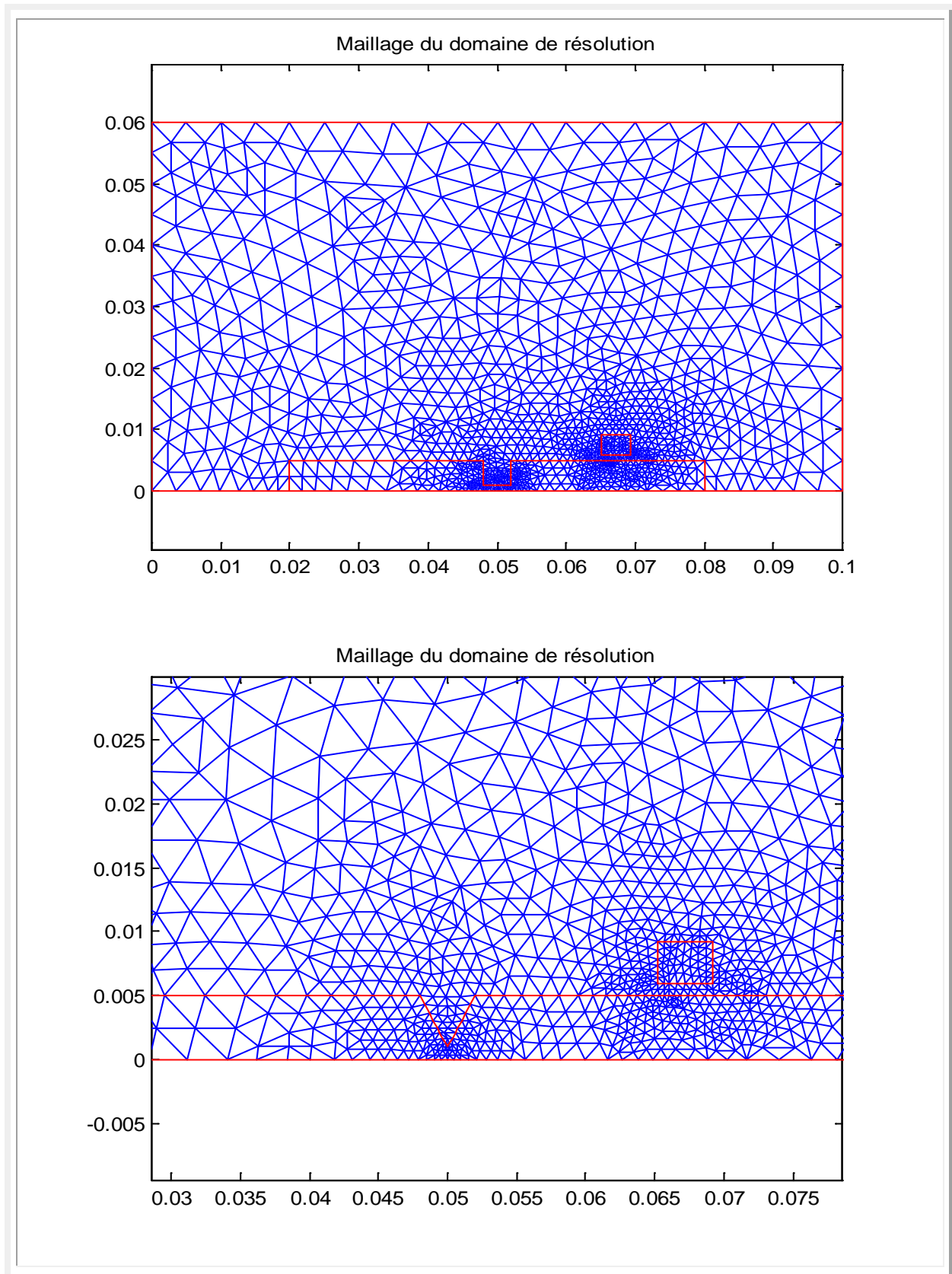


Figure II.6 : Maillage du domaine de résolution.

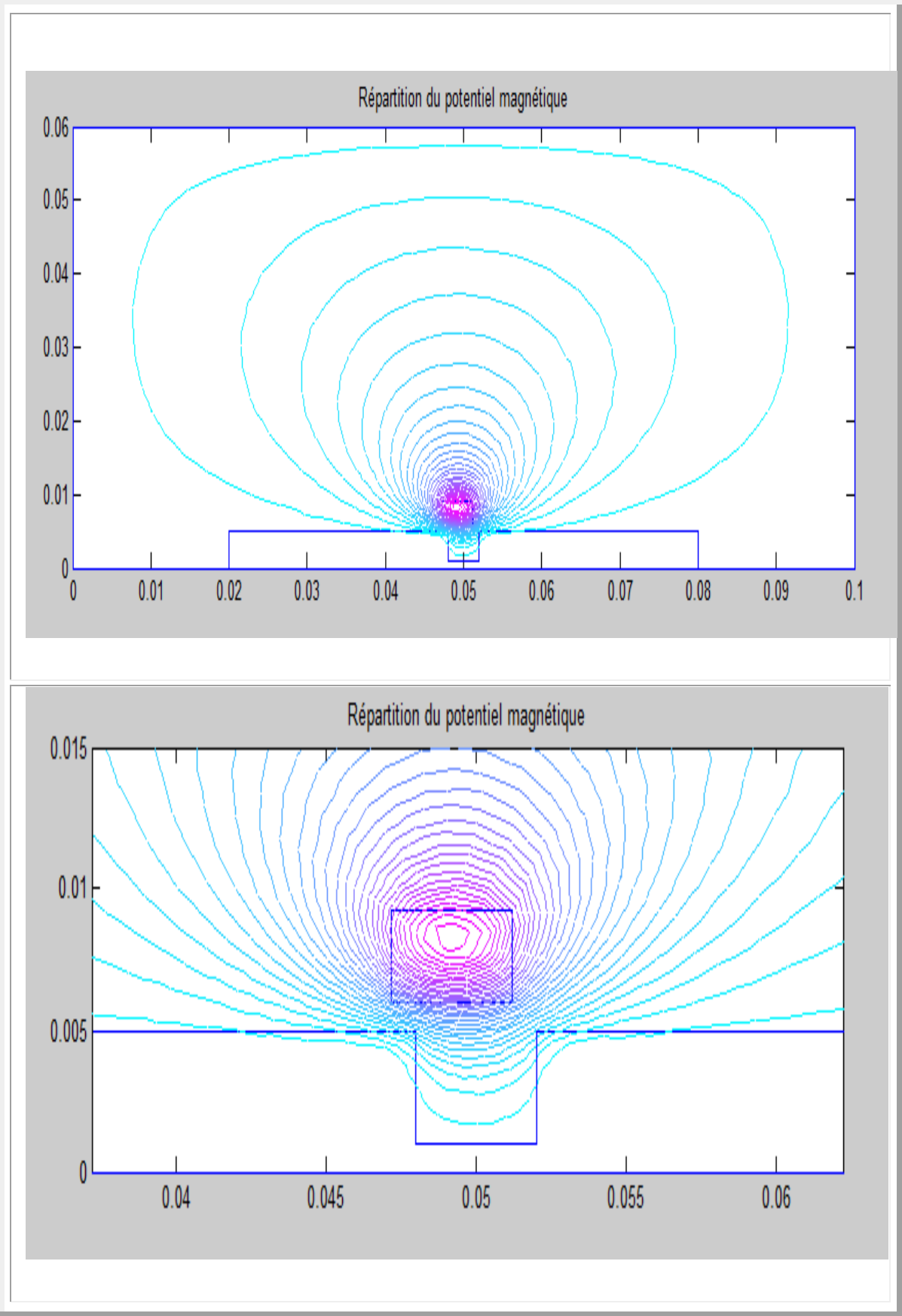


Figure II.7 : Répartition du potentiel magnétique A.

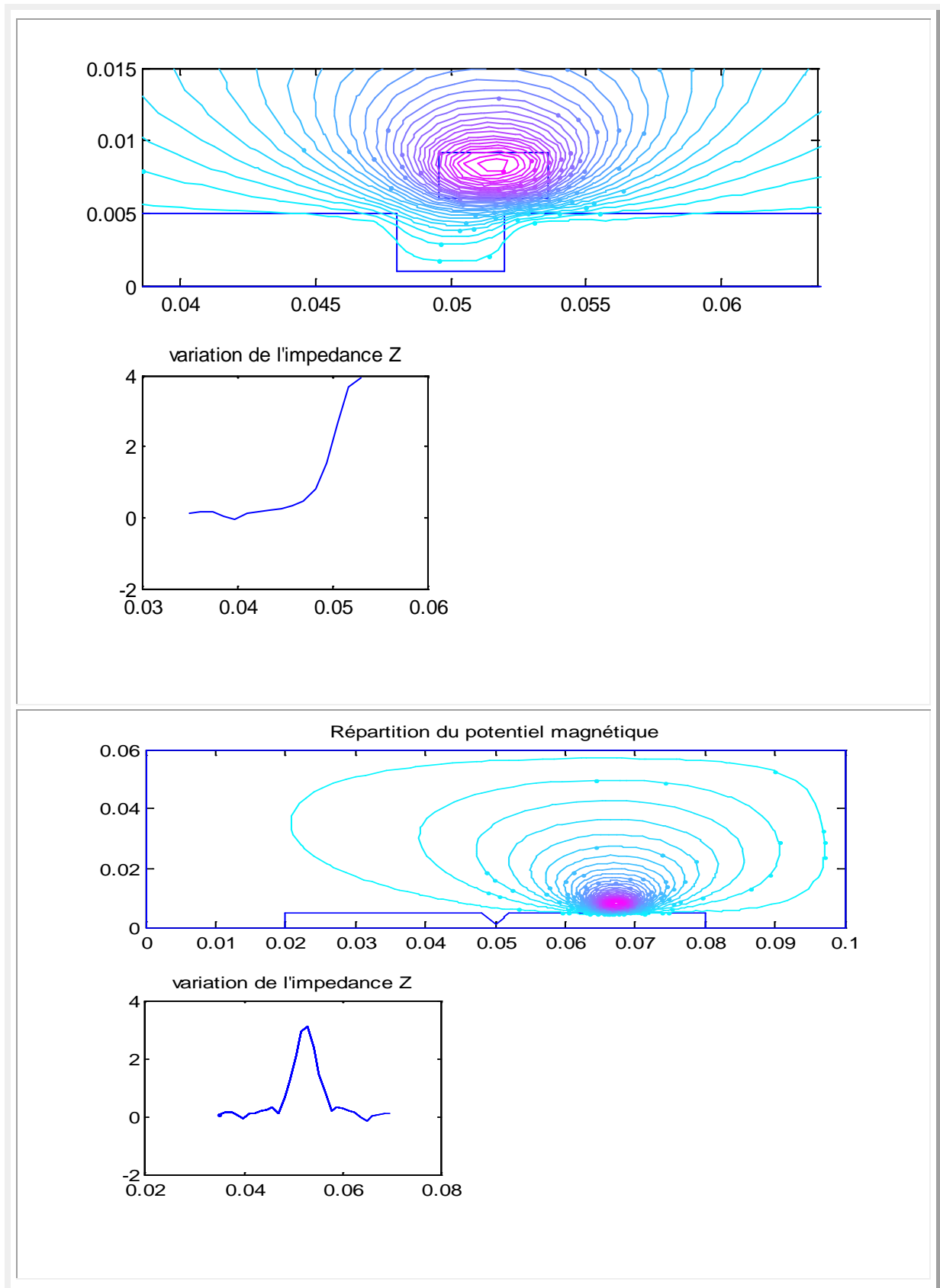


Figure II.8 : Variation de l'impédance Z pour les deux fissures.

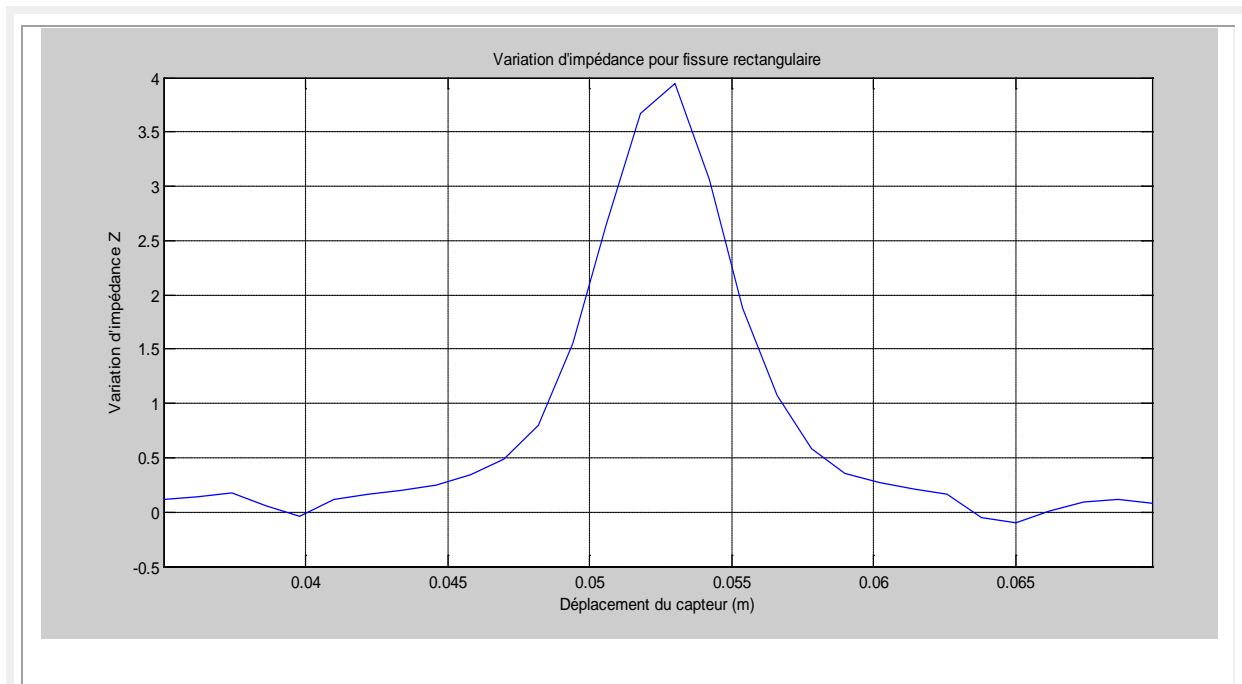


Figure II.9 : Variation de l'impédance Z pour la fissure rectangulaire.

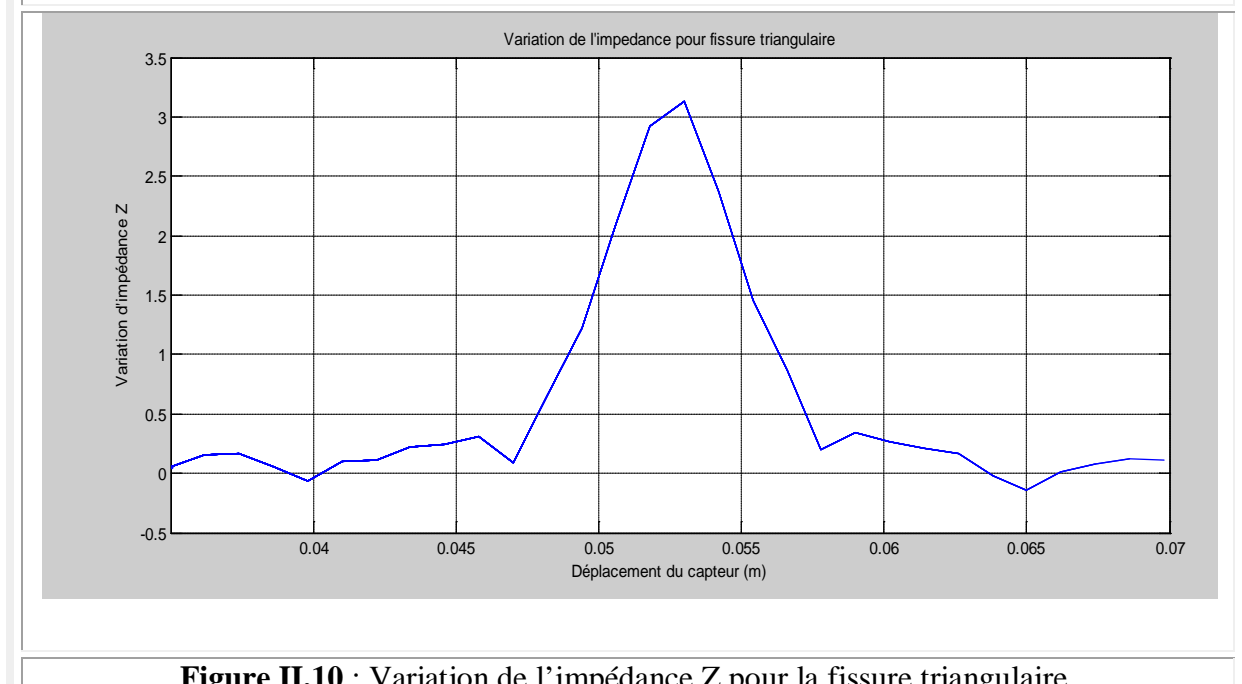


Figure II.10 : Variation de l'impédance Z pour la fissure triangulaire.

II.2.4 Interprétation des résultats

La fissure se traduit soit par une absence de matière ou une anomalie non conductrice. Pour simuler la détection de cette fissure, le capteur est supposé en déplacement le long du tube magnétique.

À chaque pas de déplacement, nous recueillons l'impédance du capteur, pour éviter les effets de coin causés par les extrémités du tube, nous faisons déplacer le capteur à partir d'une position où la plaque est supposée saine et uniforme.

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un tube magnétique avec défaut sont présentés comme suit :

- ✓ La Figure II.7 montre l'orientation des lignes de champ. Ces dernières se concentrent au niveau de la sonde et leur degré de profondeur de pénétration dans la plaque reste très faible, ce qui résulte par l'effet de la profondeur de pénétration, à cause de l'utilisation d'une fréquence élevée, et représente aussi l'allure du module du potentiel vecteur magnétique 'A' pour une pièce présentant une fissure.

Les lignes de champ sur les figures représentent des lignes des iso-valeurs du module du potentiel vecteur magnétique A. Il est enfin utile de signaler que les valeurs maximales atteintes par le potentiel vecteur magnétique A pour les fissures introduites dans la pièce à contrôler, sont assez proches ce qui pose problème pour la caractérisation des fissures.

- ✓ La Figure II.8 représente la variation de l'impédance Z en fonction de la position du capteur, on remarque que l'impédance augmente la présence de fissures dans les cibles, ce qui se traduit par la différence de perméabilité des deux milieux (cible et vise ou fissure).
- ✓ Les Figures II.9 et II.10, représentent la variation de l'impédance Z en fonction du déplacement du capteur le long des deux cibles qui présentent respectivement deux fissures de formes rectangulaire et triangulaire, on remarque que la variation de la profondeur du défaut a une légère influence sur Z, et que cette dernière a une

dépendance avec la largeur du défaut, en effet la largeur du défaut augmente alors Z , à l'opposé quand la largeur diminue (forme triangulaire) Z diminue. Par conséquent la profondeur du défaut n'influe pas sur l'impédance.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème direct qui consistait à construire un modèle mathématique reliant les caractéristiques géométriques de la fissure aux signaux CF. Et nous avons aussi traité le problème d'identification qui consistait à développer un modèle reliant les caractéristiques physiques de la pièce testée aux signaux CF. Les modèles adoptés nous ont permis de calculer l'impédance du capteur pour une fissure donnée. L'objectif de ces modèles est la construction d'une base de données en vue de leur inversion, cette dernière fera l'objet du chapitre prochain.

Chapitre III

Problèmes inverses

Introduction

Les problèmes inverses sont un domaine trop vaste pour que nous puissions en donner un exposé exhaustif. Cette thématique a connu un essor considérable ces dernières décennies, parallèlement au développement de techniques numériques et des moyens de calcul permettant leur résolution. On peut les classer en deux catégories : les problèmes qui visent à déterminer des conditions aux limites ou des sources inconnues, et les problèmes liés à l'estimation de paramètres intrinsèques du système. Le premier type de problème apparaît dès que la mesure directe de la grandeur physique étudiée n'est pas accessible en pratique.

Dans la deuxième catégorie de problèmes inverses, l'objectif est de déterminer à partir d'une connaissance partielle de l'état du système, les paramètres décrivant le modèle physique.

Actuellement il y a une forte demande pour une caractérisation plus quantitative que qualitative des défauts, c'est-à-dire effectuer une évaluation non destructive, afin de reconstruire la forme du défaut. Dans ce cas on parle du problème inverse généralement difficile à résoudre.

La connaissance de la géométrie d'un défaut est très importante pour l'ingénieur, afin de lui permettre de décider de l'avenir de la pièce. La plupart des méthodes CND ne nous donnent pas assez d'informations sur la forme du défaut.

Dans ce chapitre nous allons citer quelques méthodes utilisées pour la résolution des problèmes inverses parmi elles nous citons : la méthode des réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, les algorithmes de fourmis...etc.

III.1 Problèmes inverses

Les chercheurs théoriciens et expérimentateurs sont intéressés de plus en plus par les problèmes inverses vu leur application concrète et les progrès des calculateurs et des méthodes de calcul. La résolution de ces problèmes aide à définir la bonne modélisation mathématique associée aux cas physiques. En effet, l'inconnue d'un problème inverse peut être le domaine géométrique occupé par le système physique, des paramètres intervenant dans le modèle mathématique comme certaines propriétés de la structure, des termes sources, ou des conditions aux limites [37][38].

Dans notre cas les équations qui décrivent les phénomènes électromagnétiques. Le problème direct, les variables d'entrée sont les paramètres physiques du système (géométrie, propriété physique,...etc.) et les paramètres sources (intensité, fréquence), les variables de sortie sont, le champ magnétique, l'impédance,...etc. dans le cas de problème inverse connaissant le résultat qui est la sortie du système dans notre étude c'est l'impédance, l'objectif est de retrouver les paramètres d'entrées telles les propriétés physiques ou géométriques.

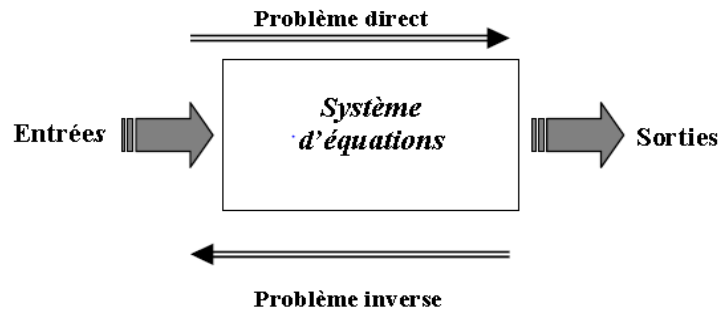


Figure III.1 : Problème direct et inverse.

III.1.1 Inversion itérative

Le processus d'inversion est une continuité d'une boucle d'itération au sein de laquelle se trouve le modèle direct, qui doit être connu, de façon exacte ou approchée. La sortie du modèle direct est comparée aux acquisitions effectuées, et l'erreur ainsi observée est posée en entrée d'un algorithme d'optimisation qui modifie alors les estimations des caractéristiques recherchées. A chaque itération, cette modification a pour but de minimiser l'erreur. L'inversion est supposée correcte et le processus est arrêté lorsque cette erreur devient inférieure à une valeur limite déterminée comme critère d'arrêt des itérations. [39] Si toutes les méthodes d'inversion itératives répondent à ce processus, la différence réside essentiellement dans l'algorithme d'optimisation qui effectue l'estimation des caractéristiques par modifications successives. [40] De tels algorithmes sont relativement nombreux. Parmi les plus utilisés nous avons : les algorithmes génétiques, les algorithmes de colonies de fourmis, la méthode de descente du gradient, la méthode du simplex, ou encore les réseaux de neurones. [39][41]

L'inconvénient de cette inversion est le temps de calcul requis, en particulier si le modèle utilisé est complexe. De plus cette technique est assez sensible à la précision du

modèle direct : un modèle inexact peut aboutir à une solution non satisfaisante tandis qu'un modèle trop précis risque de rendre le processus peu robuste vis-à-vis la perturbation. Le choix de l'initialisation des caractéristiques estimées est aussi important. En effet, ces algorithmes d'optimisations cherchent des minimas, et il arrive que le résultat soit un minimum local et non global. [39] Cependant, des méthodes existent pour pallier ces problèmes, et l'inversion itérative est présentée comme une méthode très efficace et précise lorsqu'elle est correctement mise en œuvre.

III.1.2 Inversion directe

Pour cette inversion on distingue deux cas :

a) Si le modèle direct est connu et inversible

Si le modèle direct est connu inversible, le modèle inverse est alors obtenu par l'inversion du modèle direct. Le processus d'inversion est en suite capable de donner de manière immédiate et systématique une estimation des caractéristiques du défaut inspecté. Cette méthode est donc particulièrement rapide. Il est possible que le modèle ne soit inversible que sur une plage réduite de valeurs, sur lesquelles il aura été préalablement linéaire. [39]

b) Si le modèle direct n'est pas inversible

Si le modèle direct n'est pas inversible, le modèle inverse peut dans ce cas être construit à partir de la correspondance entre paramètres des signaux acquis et caractéristiques recherchés des défauts. Le modèle inverse n'a alors aucun rapport réel avec le modèle direct constitué des équations et lois physiques mises en jeu, mais les transformations qu'ils modélisent sont l'inverse l'une de l'autre, il s'agit d'un modèle uniquement «comportemental», associant les variations des caractéristiques à estimer en fonction des paramètres des signaux. Ce modèle possède des paramètres internes, qui doivent être réglés par une période d'apprentissage. [39][41].

Ces modèles inverses peuvent être établis par plusieurs algorithmes. Les algorithmes de type de réseaux de neurones sont très utilisés, industriellement depuis une trentaine d'années. Inspirés des neurones biologiques, il s'agit d'un outil réputé souple, rapide et susceptible de modéliser des fonctions compliquées, notamment non linéaires.

III.2. Méthodes de résolution des problèmes inverses

De nombreuses méthodes de résolution de problèmes inverses, chacune d'entre elles trouve son application dans un domaine bien déterminé.

III.2.1 Les algorithmes génétiques

La plupart des applications utilisant ce type de résolution l'ont été dans le domaine de l'optimisation. Il s'agit de maximiser ou de minimiser une fonction objective afin de trouver les meilleures solutions à un problème donné.

III.2.1.1 Concepts de base

Un algorithme génétique est un algorithme itératif de recherche d'optimum, il manipule une population de taille constante. Cette population est formée des points candidats appelés *chromosomes*. La taille constante de la population entraîne un phénomène de compétition entre les chromosomes. Chaque chromosome représente le codage d'une solution potentielle au problème à résoudre, il est constitué d'un ensemble appelé gènes, pouvant prendre plusieurs valeurs appartenant à un *alphabet* non forcément numérique [42].

À chaque itération, appelée *génération*, est créée une nouvelle population avec le même nombre de chromosomes. Cette génération consiste en des chromosomes mieux adaptés à leur environnement tel qu'il est représenté par la fonction sélective. Au fur et à mesure des générations, des chromosomes vont tendre vers l'optimum de la fonction sélective. La création d'une nouvelle population à partir de la précédente se fait par application des opérateurs génétiques que sont : la sélection, le croisement et la mutation. Ces opérateurs sont *stochastiques* [37,43]. La sélection des meilleurs chromosomes est la première opération dans l'algorithme génétique. Au cours de cette opération l'algorithme sélectionne les éléments pertinents qui optimisent mieux la fonction. Le croisement permet de générer deux chromosomes nouveaux «enfants» à partir de deux chromosomes sélectionnés «parents» (figure III.2), tandis que la mutation réalise l'inversion d'un ou plusieurs gènes d'un chromosome (figure III.3)[41,43].

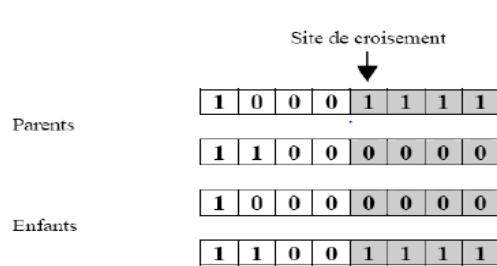


Figure III.2 : Opérateur de croisement.

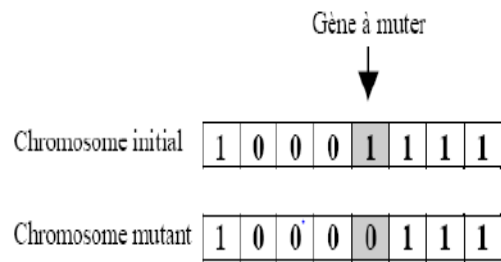


Figure III.3 : Opérateur de mutation.

Alors le principe de base est de mimer ces deux mécanismes pour faire évoluer une population de solutions (représentant des individus) afin d'obtenir des solutions de qualité de plus en plus meilleure. Un algorithme génétique est simple à mettre en œuvre et se décrit par les points suivants :

1) Génération d'une population initiale de taille «n» chromosomes, puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome (le codage).

2) On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de réduire sa valeur d'aptitude.

3) le cycle de génération des populations commence alors, chaque nouvelle population remplaçant la précédente. Le nombre x de générations est déterminé au départ. Dans chaque génération, on choisit n chromosomes auxquels on va appliquer les différents opérateurs génétiques. Après chaque génération, les n nouveaux chromosomes créés remplacent la génération précédente. Après la xième génération, les chromosomes auront évolué de telle façon que cette dernière génération contient des chromosomes meilleurs que ceux des générations précédentes.

III.2.2 Les algorithmes de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis inspirés du comportement des stratégies de recherche de nourriture des fourmis réelles pour résoudre divers problèmes d'optimisation. Initialement proposés par Marco-Dorigo et al dans les années 1990, pour la recherche de chemins optimaux dans un graphe.

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des algorithmes itératifs à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet de guider leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des directions à suivre ou au contraire à éviter. Fortement

inspirés du déplacement des groupes de fourmis, cette méthode a pour but de construire les meilleures solutions à partir des éléments qui ont été explorés par d'autres individus. À chaque fois qu'un individu découvre une solution au problème, bonne ou mauvaise, il enrichit la connaissance collective de la colonie. Ainsi, chaque fois qu'un nouvel individu aura à faire des choix, il pourra s'appuyer sur la connaissance collective pour pondérer ses choix. L'idée originale s'est diversifiée depuis pour résoudre une classe plus large de problèmes et plusieurs algorithmes ont vu le jour.[41]

III.2.3 Méthodes de descente

Les méthodes de descente sont des méthodes itératives qui utilisent l'équivalence entre les problèmes suivants :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Trouver } X \in \mathbb{R}^n \text{ tel que } AX=B \\ \text{et Trouver } X \in \mathbb{R}^n \text{ (III.1)} \\ \text{tel que } J(X) = \frac{1}{2} (AX, X) - (B, X) \text{ soit minimal} \end{array} \right\}$$

La matrice A est symétrique définie positive.

Les méthodes de descente sont basées sur le calcul de la solution comme limite d'une suite qui minimise la forme quadratique J.

Cette suite est construite comme une suite récurrente :

$$\left. \begin{array}{l} X^{(0)} \\ X^{(k+1)} = X^{(k)} + \alpha_K d^{(k)} \end{array} \right\} \text{Donné} \quad \text{(III.2)}$$

avec :

$d^{(k)} \in \mathbb{R}^n$: Vecteur donnant la direction de la descente à l'étape k.

α_K : Pas de descente (coefficient déterminé de manière à minimiser J dans la direction $d^{(k)}$)

$$J(X^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}) \leq J(X^{(k)} + \alpha d^{(k)})$$

Après développement, on obtient α_k comme valeur annulant la dérivée de J par rapport à α , soit :

$$\alpha_k = - \frac{(G^{(k)}, d^{(k)})}{(Ad^{(k)}, d^{(k)})} \quad \text{(III.3)}$$

$$G^{(k)} = \text{grad} (J(X^{(k)})) = AX^{(k)} - B$$

III.2.3.1 Méthodes du gradient

Dans cette méthode, on choisit comme direction de descente la direction du vecteur gradient de J au point $X(k)$. Cette direction est la direction maximale de J . On dit que encore direction de plus profonde descente [44].

$$\begin{cases} X(0) & \text{donné} \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k G^{(k)} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

avec :

$$\alpha_k = - \frac{\|G^{(k)}\|^2}{(AG^{(k)}, G^{(k)})} \quad (\text{III.5})$$

III.2.3.2 Méthodes du gradient conjugué

La méthode du gradient conjugué est une variante améliorée de la méthode de la plus grande pente. Comme son nom l'indique, elle utilise, le gradient de la fonction pour déterminer la direction de la recherche du minimum locale. C'est une méthode itérative tout comme la méthode du gradient, mais elle utilise un algorithme pour que la direction soit optimisée. Cette direction est déterminée en fonction du gradient au point $X^{(k)}$ mais aussi en fonction du gradient du point précédent $X^{(k-1)}$, c'est pour cette raison que l'on parle de gradient conjugué [43,45], mais cela ralentit la convergence de l'algorithme. La méthode de Fletcher et Reeves résoud ce problème en déterminant la nouvelle direction de recherche à partir du gradient aux pas courant et précédent.

III.2.4 Essaims particuliers

Inventée par Russel Eberhat (ingénieur en électricité) et James Kenndy (socio-psychologue) en 1995. L'optimisation par essaims particuliers (OEP) est une métaheuristique d'optimisation, Cet algorithme s'appuie notamment sur un modèle développé par le biologiste Craig Reynolds à la fin des années 1980, permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux. Une autre source d'inspiration, revendiquée par les auteurs, est la socio-psychologie.

Cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux. D'ailleurs elle a des similarités avec les algorithmes de colonies de fourmis, qui s'appuient eux aussi sur

le concept d'auto-organisation. L'idée, un groupe d'individus individuellement intelligents puissent posséder une organisation globale complexe. Ainsi grâce à des règles de déplacement très simples (dans l'espace des solutions), les particules peuvent converger progressivement vers un minimum local.

III.2.5 Algorithme du simplexe

L'algorithme d'optimisation type déterministe simplexe a été introduit par Nelder et Mead dans les années 1960, c'est une méthode d'optimisation locale, elle est dite directe car elle tente de résoudre le problème en utilisant directement la valeur de la fonction objective, sans faire appel à ses dérivées. Cette méthode est surtout appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation de mémoire et son faible temps de calcul. Contrairement aux autres méthodes qui démarrent à partir d'un point initial, la méthode de Nelder-Mead utilise un *simplexe* de départ. Un simplexe est une figure géométrique, le but d'une itération de l'algorithme du simplexe est de générer un nouveau simplexe qui se rapproche de l'optimum en éliminant le point de plus forte valeur de la fonction objective.

Les opérations de base de l'algorithme sont : Réflexion, Expansion, Contraction externe, Contraction interne, et la plus importante est le rétrécissement.[41]

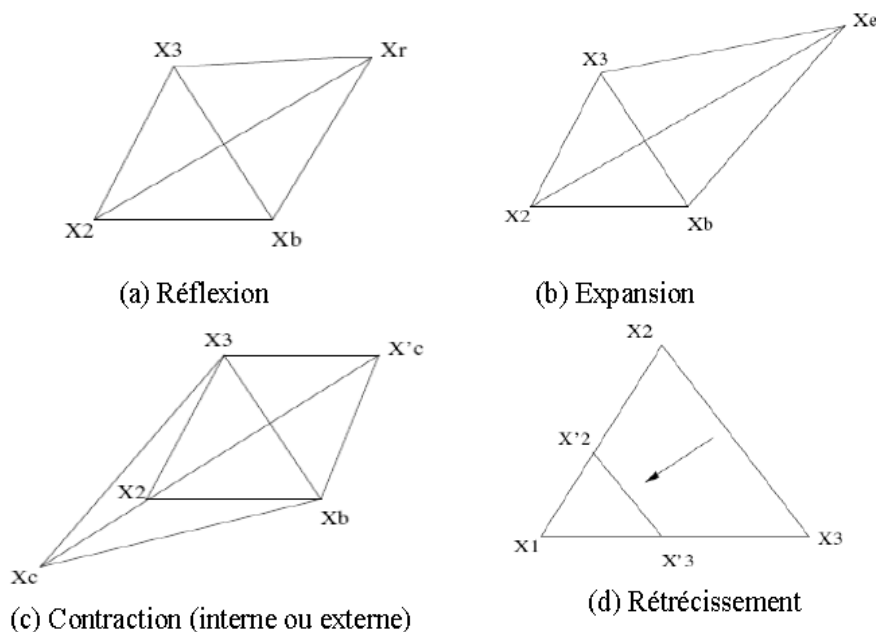


Figure III.4 : Opérations de base des algorithmes du simplexe.

III.2.6 Recherche tabou

L'idée de la recherche est la suivante : à partir d'une position donnée, on explore le voisinage et on choisit la position dans ce voisinage qui minimise la fonction objective. Il est essentiel de noter que cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction : c'est le cas lorsque tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée. C'est à partir de ce mécanisme que l'on échappe aux minima locaux. Le risque cependant n'est qu'à l'étape suivante, on retombe dans le minimum local auquel on vient d'échapper. C'est pourquoi, il faut que l'heuristique ait de la mémoire : le mécanisme consiste à interdire, d'où le nom de tabou, de revenir sur les dernières positions explorées. Les positions déjà explorées sont conservées dans une file FIFO (first in first out) appelées souvent liste tabou d'une taille donnée, qui set un paramètre ajustable de l'heuristique. Cette file doit conserver des positions complètes, ce qui, dans certains types de problèmes, peut nécessiter l'archivage d'une grande quantité d'informations. Cette difficulté d'archivage peut être contournée en ne gardant en mémoire que les mouvements précédents.[37,41]

III.2.7 Méthode des réseaux de neurones

Les études sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) datent depuis les années 1940. Grâce aux développements des recherches sur le cerveau et la disponibilité des outils de simulation, les chercheurs étudièrent des ensembles de neurones formels interconnectés. Ces réseaux, déjà développés à l'époque, permettaient d'effectuer quelques opérations logiques simples. Jusqu'aux années 1980, la recherche était freinée par la limitation théorique du perceptron. Peu après cette époque, Hopfield lança du nouveau en 1982 la recherche dans ce domaine après avoir montré l'analogie entre les RNA et les systèmes physiques.

III.2.7.1 Cerveau et neurones biologiques

Les réseaux de neurones artificiels s'inspirent des réseaux de neurones naturels. Aussi, avant d'introduire les premiers allons-nous présenter les seconds. Le cerveau humain est constitué d'un gigantesque et complexe réseau de cellules nerveuses ou *neurones*. On compte environ 10 milliards. Chacun d'eux est connecté à d'autres neurones par 10000 synapses en moyenne [Hay99]. Le réseau de neurones du cerveau constitue un système de traitement massivement parallèle de l'information, a contrario des ordinateurs classiques dans

lesquels un seul processeur exécute les instructions en série (une ou plusieurs séries pouvant néanmoins être exécutées en même temps). Si les neurones ne fonctionnent qu'à une fréquence maximale d'environ 100 Hz, ils fonctionnent simultanément (en parallèle), tandis qu'un processeur conventionnel est capable de réaliser une série de plusieurs centaines de millions d'opérations par seconde.

Outre celle d'effectuer des calculs massivement parallèles avec une efficacité extrême, les réseaux de neurones cérébraux ont la particularité de se réorganiser en tenant compte de l'expérience. De plus, les neurones en bonne santé ont la faculté d'apprendre à prendre en charge les fonctions précédemment exercées par des parties endommagées du cerveau. Autre singularité qui différencie le cerveau d'un ordinateur : son réseau de neurones est le siège de la conscience de soi, capacité qui reste jusqu'à présent inexplicée.

Quant à la structure des neurones biologiques, elle comporte ,

- ✓ les *dendrites* : constituent les entrées,
- ✓ le *soma* : constitue le corps,
- ✓ l'*axone* : constitue la sortie, qui est connectée à un autre neurone du réseau.

Le corps du neurone (soma) est grossièrement sphérique. Les signaux qui y sont générés sont transmis à d'autres neurones grâce à une extension du corps de cellule appelée *axone*, ou fibre nerveuse. Autour du corps cellulaire, se trouvent d'autres extensions, les *dendrites*, qui sont chargées de recevoir les signaux entrants générés par d'autres neurones.

La longueur d'un axone varie dans le corps humain d'une fraction de millimètre à un mètre, et se prolonge à partir d'un point du soma appelé *butte d'axone*. L'autre extrémité de l'axone se divise en plusieurs branches au bout desquelles se trouvent les *boutons terminaux*. Ces derniers sont placés au sein de structures particulières appelées *synapses*, jonctions permettant de transmettre les signaux d'un neurone à l'autre. Chaque neurone contrôle généralement de 10^3 à 10^4 jonctions synaptiques. Par ses dendrites, un neurone est connecté à un millier de neurones voisins. Ainsi, chaque neurone possède des milliers d'entrées.

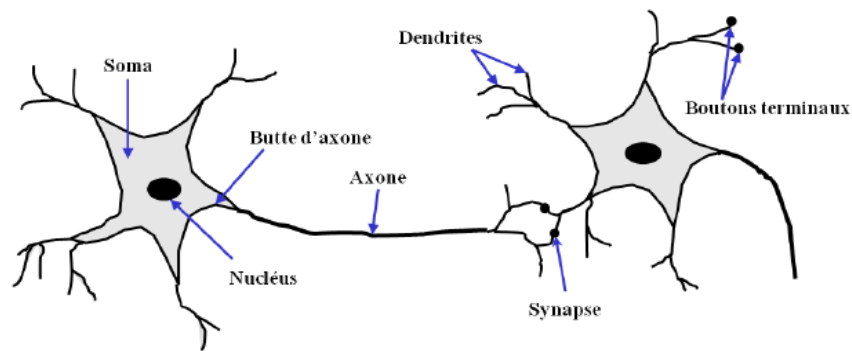


Figure III.5 : Neurone biologique.

Un neurone fonctionne de la manière suivante : lorsque l'un des neurones voisins exerce une tension, une charge positive ou négative est reçue par l'une des dendrites du neurone considéré. Les valeurs de toutes les charges reçues à toutes les dendrites du neurone sont additionnées et le total est ensuite transmis au soma. Ni celui-ci, ni le nucléus (noyau) ne jouent un rôle significatif dans le traitement des données entrantes et sortantes. Leur fonction principale est d'effectuer les maintenances nécessaires pour maintenir les fonctions du neurone. La partie du soma qui participe à l'élaboration des signaux entrants est la *butte d'axone* : lorsque la somme des signaux d'entrée dépasse le seuil de la butte d'axone, le neurone se met à exercer une tension (il devient actif, alors qu'en deçà du seuil il reste inactif) et un signal de sortie est transmis long de l'axone. En d'autres termes, une fois que l'entrée dépasse le seuil, le neurone envoie une décharge électrique - impulsion qui part du corps, traverse l'axone, et elle est transmise à d'autres neurones (ou d'autres récepteurs).

D'après ce que nous savons sur les structures neurales, nous pouvons affirmer que le cerveau apprend en modifiant les forces de connexions entre neurones et en ajoutant ou supprimant des connexions entre eux. Autrement dit, l'apprentissage se fait en *changeant l'efficacité des synapses*, ce qui change l'influence d'un neurone sur les autres.

De nombreuses tentatives ont été faites pour imiter le comportement du cerveau au moyen de ce que l'on appelle les réseaux de neurones artificiels (RNA) (*modélisation mathématique du cerveau humain*). Nous allons en présenter brièvement quelques modèles à la section suivante. Dans ce qui suit, le terme *réseau de neurones* sous-entendra réseau de neurones artificiels.

IV.2.7.2 Neurone artificiel (formel)

Un neurone artificiel est un modèle simplifié de neurone biologique, ce modèle imite quelques fonctions du neurone biologique, comme la mémorisation associative, l'apprentissage et le travail en parallèle. [46]. Par analogie avec la biologie, un neurone artificiel, reçoit l'information provenant des entrées x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) par l'intermédiaire des connexions auxquelles sont associées des poids (w_1, w_2, \dots, w_n) pondérant l'information, et aussi représentatif de la force de la connexion.

Le neurone artificiel fonctionne en deux étapes :

- ✓ La première phase représente les prétraitements des données reçus en calculant le potentiel v_j des neurones j par la fonction suivante :

$$v_j = b_j + \sum_{i=1}^n w_{j,i} x_i \quad (\text{III.6})$$

où ;

$w_{j,i}$: désigne le poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée i ;

b_j : Terme constant appelé *biais*, il est considéré comme le poids d'une entrée x_0 égal à 1.

D'où (III.6) s'écrit comme suit :

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{j,i} x_i \quad (\text{III.7})$$

- ✓ Dans la deuxième phase, une fonction de transfert g appelée également *fonction d'activation*, calcule la valeur de l'état interne S_j du neurone j à partir de la valeur du potentiel v_j . Cette valeur désignera la sortie du neurone :

$$S_j = g(v_j) = g\left(\sum_{i=0}^n w_{j,i} x_i\right) \quad (\text{III.8})$$

Le choix de la fonction d'activation se révèle dans certains cas être un élément constitutif important des réseaux de neurones. Ainsi, le neurone peut être défini mathématiquement comme étant une fonction algébrique, à priori non linéaire (suivant g) et bornée, des entrées x_i et paramétrée par les poids $w_{j,i}$: [47]

$$S_j = g(x_i, w_{j,i}) = g_{w_{j,i}}(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{III.9})$$

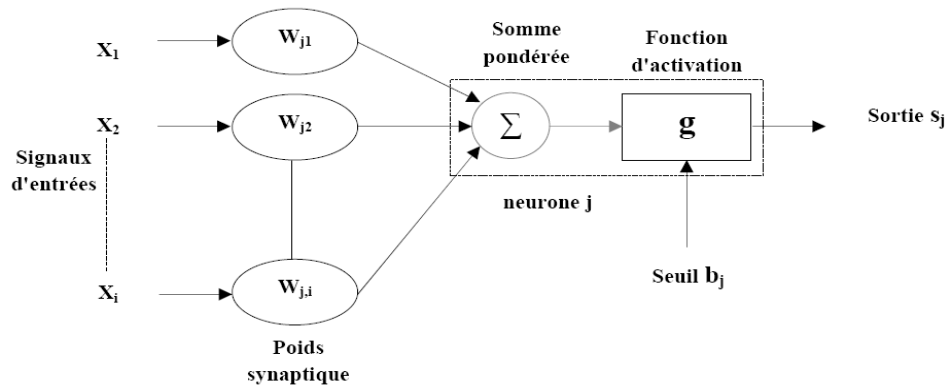


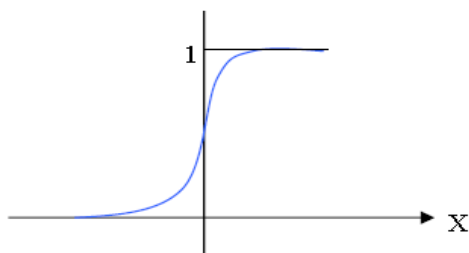
Figure III.6 : Représentation d'un neurone artificiel.

III.2.7.3 Fonction d'activation

La fonction d'activation définit le potentiel de sortie d'un neurone en termes de niveaux d'activité de ses entrées.

Le choix de la fonction d'activation est d'une grande importance. Il dépend de l'application à étudier, les plus utilisées sont :

✓ Fonction Sigmoide

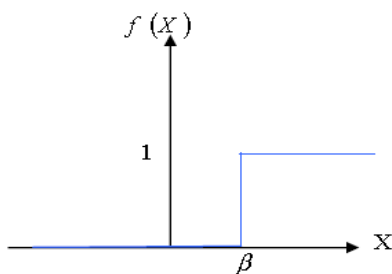


$$Y = \frac{1}{1 + e^{-bX}}$$

b: Gain de la fonction d'activation.

Figure III.7 : Fonction sigmoïde.

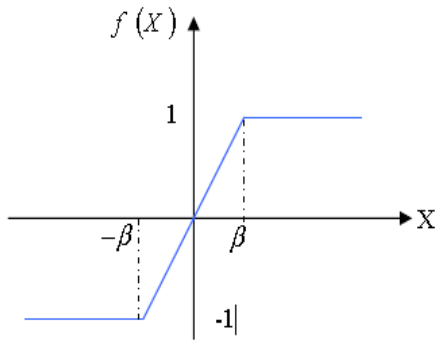
✓ Fonction seuil asymétrique (hard limite)



$$f(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X > \beta \\ 0 & \text{si } X \leq \beta \end{cases}$$

Figure III.8 : Fonction seuil.

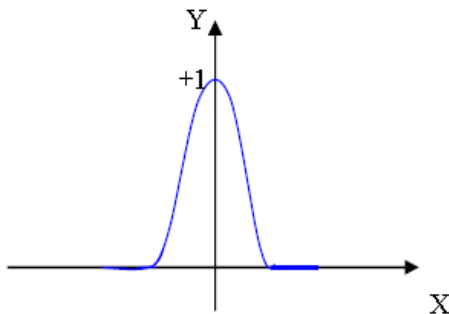
✓ Fonction saturation



$$f(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X > \beta \\ X & \text{si } -\beta < X < \beta \\ 0 & \text{si } -\beta < X \end{cases}$$

Figure III.9 :Fonction saturation.

✓ *Fonction gaussienne centrée*



$$Y = \exp\left(-\frac{1X^2}{2\sigma^2}\right)$$

σ : L'écart type de la gaussienne.

Figure III.10 :Fonction gaussienne.

III.2.7.4 Composition d'un réseau de neurones

Généralement un RN se compose de trois couches :

- ✓ **Une couche d'entrée** : elle est constituée de l'ensemble des neurones du réseau qui reçoivent les données du problème. Sa taille est donc déterminée directement par le nombre de variables d'entrée.
- ✓ **Une couche de sortie** : elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche qui fournit les résultats du problème.
- ✓ **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau. En général, les fonctions d'activation sont non-linéaires sur ses couches.

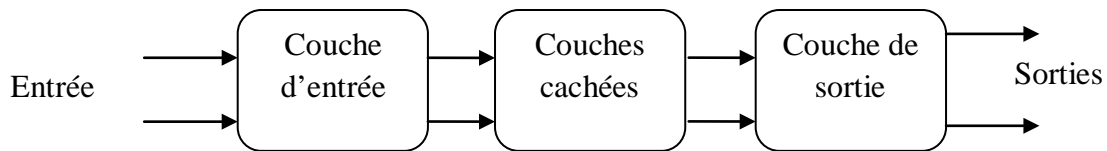


Figure III.11 :Composition d'un réseau de neurones.

III.2.7.5 Architecture d'un réseau de neurones

Il existe principalement deux catégories de RN : les réseaux non bouclés (statiques) et les réseaux bouclés (dynamiques).

✓ Réseau de neurones non bouclé (*feed-forward*)

Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux. L'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. C'est-à-dire si l'on se déplace dans le réseau à partir d'un neurone quelconque en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ. Les réseaux de neurones non bouclés sont des outils statiques, utilisés principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonctions non linéaires, de modélisation de processus statiques non linéaires [48,49].

✓ Réseau de neurones bouclé (*feed-back*)

Ce sont des réseaux qui ont une ou plusieurs boucles internes, leurs sorties à un instant t dépendront des entrées aux mêmes instants, et aux instants antérieurs. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation. Les boucles rajoutent donc un effet de mémorisation du passé. Ces réseaux de neurones bouclés constituent un système dynamique "à temps discret", régi par une (ou plusieurs) équation(s) aux différences non linéaires, résultant de la composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions. Ils sont utilisés pour effectuer des tâches de modélisation et d'adaptation de systèmes dynamiques, de commande de processus, ou de filtrage [48]

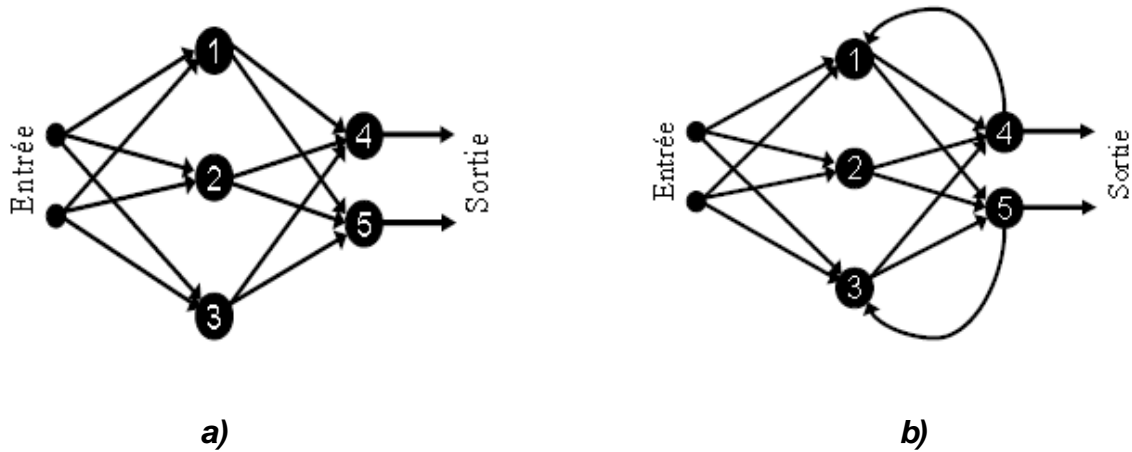


Figure III.12 :Exemples de RN : a) non bouclé, b) bouclé.

III.2.7.6 Apprentissage d'un réseau de neurones

La plupart des RN étudiés à ce jour sont des réseaux susceptibles de subir un apprentissage. On appelle apprentissage la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones (poids et biais) du réseau afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée. Le plus souvent, il s'agit d'un apprentissage supervisé, utilisant une base de données appelée base d'apprentissage. Cette base est constituée d'un ensemble d'exemples. Chaque exemple se compose de deux parties : la première est constituée d'un vecteur d'entrée et la seconde contient le vecteur de sortie correspondante. Lors de la phase d'apprentissage, on ajuste les poids et les biais afin de minimiser l'écart entre la sortie désirée et la sortie donnée par le RN (figure III.13).

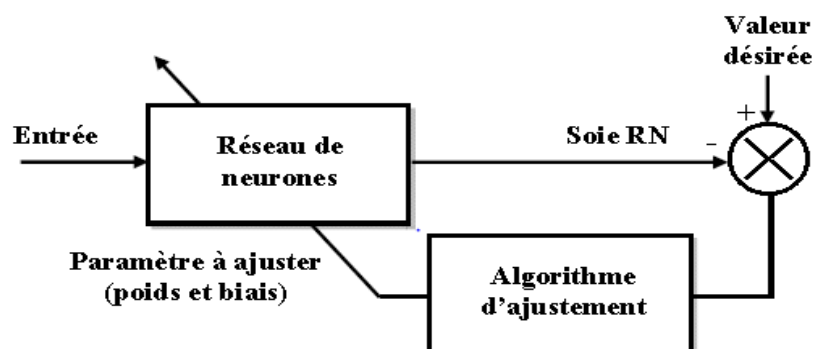


Figure III.13 :Schéma général de l'apprentissage d'un RN.

III.2.7.6.1 Type d'apprentissage

On distingue deux types d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

✓ *Apprentissage supervisé*

Ce type d'apprentissage consiste à présenter au RN un ensemble d'entrées et de sorties (i.e. des exemples) qui est obtenu soit à partir d'un modèle direct soit à partir des mesures.

Cependant, la génération d'exemples à partir des mesures pour chaque configuration du système d'étude peut être une tâche laborieuse et coûteuse. Par exemple, pour la caractérisation de matériaux, il faut avoir en sa possession plusieurs matériaux de permittivités différentes et connues. Pour éviter ce problème, la meilleure solution est de passer par une modélisation, qui constitue le modèle direct du système d'étude. Par ce moyen, on peut facilement faire varier la taille du domaine d'étude en modélisant autant de matériaux que nécessaires.

Les exemples, en nombre fini, pour lesquels l'entrée et la sortie désirée sont connues, sont contenus dans une base qu'on appelle *base d'apprentissage*. La tâche du RN est de minimiser un critère d'erreur sur cette base d'apprentissage. En ce sens du terme, on dit que l'apprentissage est « supervisé », c'est-à-dire qu'on fournit au réseau des exemples de ce qu'il doit faire.

Le réglage des poids se fait de manière itérative. Les exemples de la base d'apprentissage sont présentés une première fois au RN. Ensuite la sortie du RN est comparée avec celle contenue dans la base pour tous ces exemples. Le critère d'erreur entre ces deux sorties est par la suite minimisé de façon itérative par un algorithme de minimisation ajustant les paramètres internes du RN. Ce principe d'apprentissage est illustré (Figure III.14)

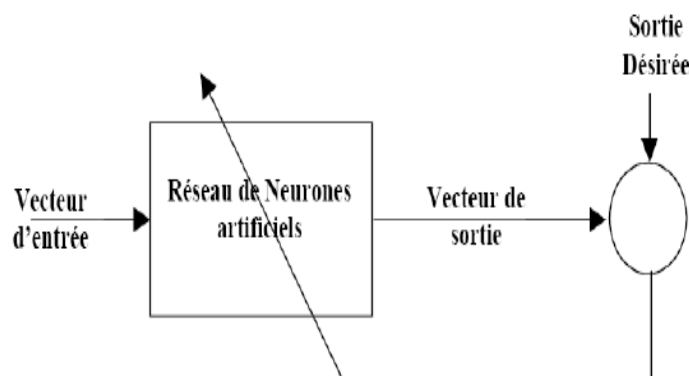


Figure III.14 : Apprentissage supervisé.

✓ *Apprentissage non supervisé*

Cette méthode se distingue de l'apprentissage supervisé par le fait qu'il n'y a pas de sortie *au préalable* connue pour l'apprentissage. Dans l'apprentissage non-supervisé, il y a en entrée un ensemble de données collectées qui est traité par le RN comme des variables aléatoires et le réseau construit un modèle de densité pour les regrouper selon des critères de ressemblance qui sont inconnus *à priori*. Cet apprentissage est surtout utilisé dans un but de visualisation ou d'analyse de données. Ce type d'apprentissage n'est pas utilisé dans ce travail de mémoire, puisque ce qu'on désire réaliser est l'approximation de fonction et non pas l'analyse ou l'organisation de données inexploitable telles quelles.

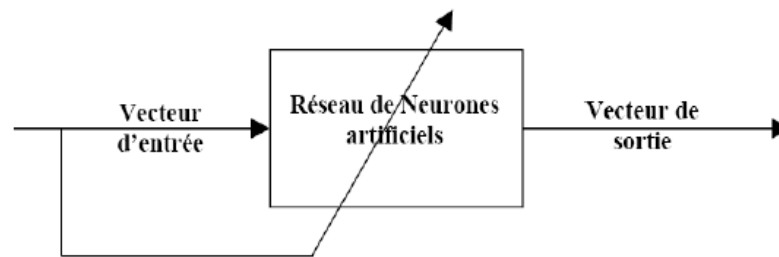


Figure III.15 : Apprentissage non supervisé.

III .2.7.7 Différents types de réseaux

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, nous citons principalement

III .2.7.7.1 Réseaux à une seule couche

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par des poids modifiables.

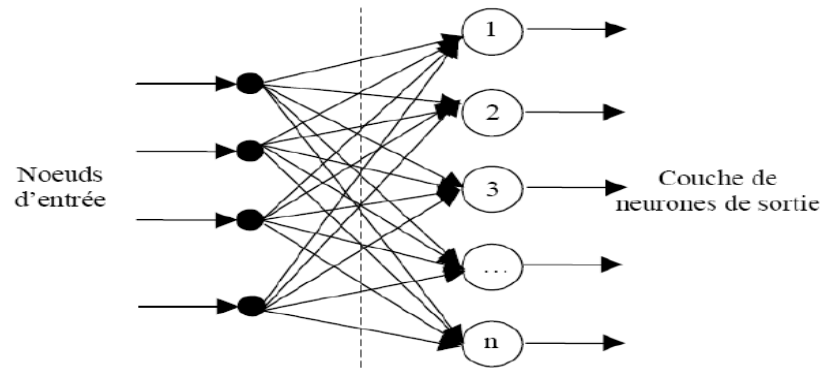


Figure III.16 : Réseau à une seule couche.

1) Perceptron [46]

Le perceptron est le premier réseau de neurones mis au point, il a été conçu par Rosenblatt en 1958, il est linéaire et monocouche, avec une fonction d'activation seuil. Le schéma de la Figure III.16 présente un Perceptron avec deux entrées X_1 , X_2 , un biais b , les poids synaptiques w_1 , w_2 et la sortie y .

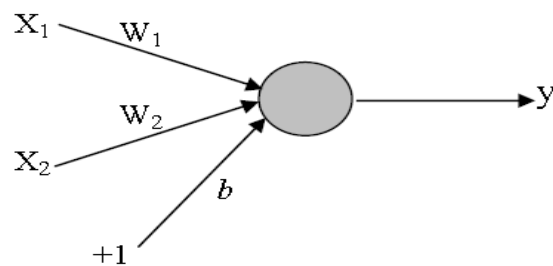


Figure III.17 : Schéma du Perceptron.

$$y = F\left(\sum_{i=1}^2 w_i x_i + \theta\right) \quad (\text{III.10})$$

La fonction d'activation F choisie pour cette section est une fonction d'activation à seuil symétrique définie comme suit :

$$F(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \geq 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Ce type de fonctions d'activations confère au perceptron des aptitudes de classification. En effet, lorsque la somme pondérée des composantes du vecteur d'entrée est positive, ce dernier est assigné à la classe +1, sinon il est assigné à la classe -1. La séparation entre ces deux classes est une ligne droite, appelée frontière de décision, donnée par l'équation :

$$w_1x_1 + w_2x_2 + b = 0 \quad (\text{III.12})$$

Le biais θ qui intervient dans l'expression (III-10) sert à translater la fonction de décision parallèlement à elle-même. De même, les deux poids symétriques w_1 et w_2 font tourner la droite de décision, durant la phase d'apprentissage, pour la ramener au point de fonctionnement du réseau. Durant le processus d'apprentissage, le mouvement de la droite de décision dans le cas d'un perceptron monocouche, est régi par la règle de correction de l'erreur plus généralement appelée règle d'apprentissage du perceptron.

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \alpha(d_i - y_i(k))X_j \quad (\text{III.13})$$

avec:

α : constante positive.

y_i : Sortie du $i^{\text{ème}}$ neurone

d_i : $i^{\text{ème}}$ sortie désirée

k : $k^{\text{ème}}$ itération

w_{ij} : Poids reliant la $j^{\text{ème}}$ composante du vecteur d'entrée au $i^{\text{ème}}$ neurone

Si $d_i = y_i(k)$, les poids ne sont pas modifiés.

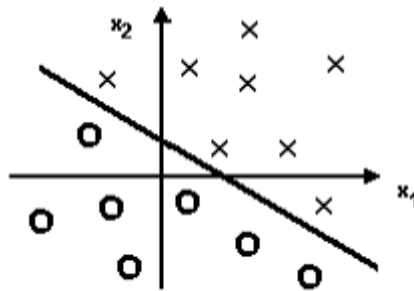


Figure III.18 : Schéma de classification.

2) Le réseau ADALINE

En 1960 Widrow a développé l'ADALINE (ADAPtiveLINearElement), qui est un réseau à une seule couche, de même structure que le perceptron de Roseblatt avec une fonction d'activation linéaire et une règle d'apprentissage des moindres carrés aussi connue

comme la règle Delta. Le réseau ADALINE trouve son application en classification de problème linéairement séparable ou l'approximation linéaire des fonctions.

III.2.7.7.2 Limitation des réseaux à une seule couche

Les réseaux à une seule couche ont ouvert la voie à plusieurs d'applications. Ces réseaux peuvent par exemple représenter les fonctions : AND, ET, OR mais ils sont incapables de représenter la fonction XOR, ces limitations ont été mises en évidence par Minsky et Papert en 1969.

La figure suivante montre l'incapacité du réseau à couche unique de reproduire la fonction XOR

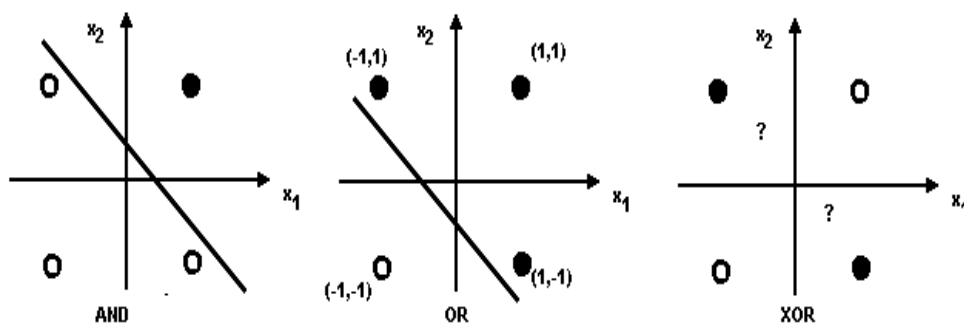


Figure III.19 : Représentation géométrique du problème XOR.

Ce problème pourra être résolu avec l'apparition des réseaux multicouches.

III.2.7.7.3 Réseaux Multicouches

Les problèmes rencontrés avec les réseaux à couche unique, ont poussé les chercheurs à développer d'autres réseaux, à savoir le réseau de Kohonen en 1981, le réseau d'Hopfield 1982 et le perceptron multicouches. Ce dernier avait un problème majeur qui était l'impossibilité de faire l'apprentissage des couches cachées jusqu'à 1985 avec l'introduction de l'algorithme de rétro-propagation.

1) Réseau de Kohonen

Les réseaux de type auto organisateur (auto-adaptatif) de Kohonen, appelé aussi SOM « Self Organised Maps » sont des réseaux compétitifs et dynamiques, dans le sens où ils ont tendance à élire un neurone vainqueur et à le favoriser, d'une part, et à créer ou détruire des neurones, d'autre part. Le processus, l'apprentissage n'est donc plus supervisé on parle d'apprentissage non supervisé ou bien compétitif [50]. Voici un exemple de réseau avec un espace d'entrée à deux dimensions et 5 neurones concurrents.

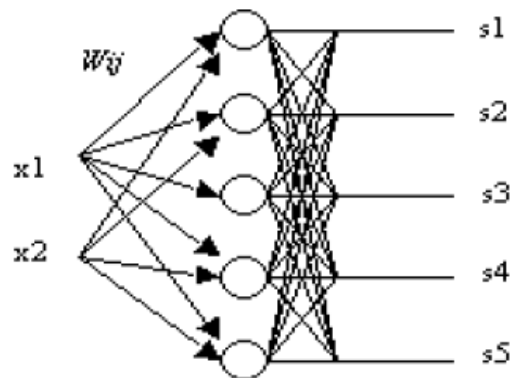


Figure III.20 : Structure d'un réseau de Kohonen à 2 entrées et 5 neurones concurrents.

2) Réseau d'Hopfield

Les réseaux d'Hopfield sont donc des réseaux récurrents et entièrement connectés. Dans ce type de réseau, chaque neurone est connecté à chaque autre neurone et il n'y a aucune différenciation entre les neurones d'entrée et de sortie. Ils fonctionnent comme une mémoire associative non linéaire.

L'application principale des réseaux de Hopfield est l'entrepôt de connaissances mais aussi la résolution de problèmes d'optimisation. Le mode d'apprentissage utilisé ici est le mode non supervisé [44].

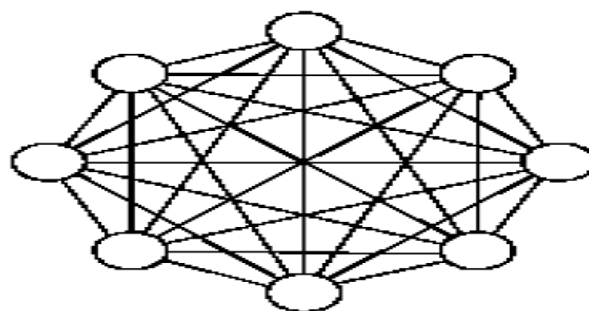


Figure III.21 : Structure d'un réseau de Hopfield.

3) *Perceptron Multi Couches*

Le perceptron Multi Couches PMC ou MLP (Multi Layer Perceptron) en anglais est une extension du perceptron monocouche, avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie. L'idée principale est de grouper des neurones dans une couche. En place ensuite bout à bout plusieurs couches et on connecte complètement les neurones de deux couches adjacentes Figure III.21. Les entrées des neurones de la deuxième couche sont donc en fait les sorties des neurones de la première couche. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent tous le même vecteur d'entrée. Ils calculent alors leur sorties qui sont transmises aux neurones de la deuxième couche, etc. Les sorties des neurones de la dernière couche forment la sortie du réseau [44].

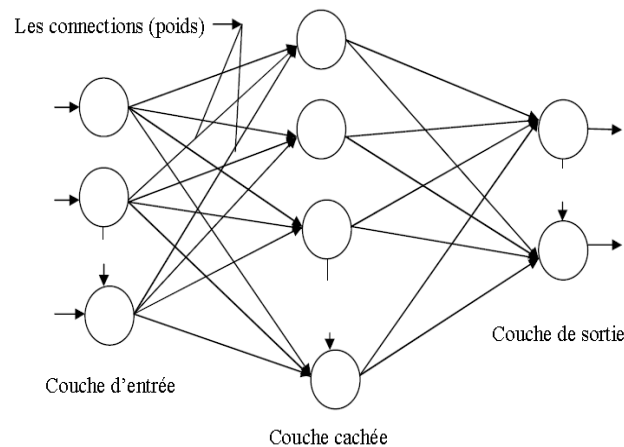


Figure III.22: Architecture du perceptron multicouche.

Une fois l'architecture du réseau est définie (nombre de couches, de neurones par couche, leur inter-connectivité), le réseau passe par une phase d'apprentissage. Pour cela, il utilise un nombre suffisamment conséquent de paires entrée/cible, appelée base d'apprentissage. Son fonctionnement, est basé sur un apprentissage supervisé, c'est-à-dire qu'à chaque nouvelle entrée, le réseau modifie les poids et les biais de façon à ajuster toutes les sorties (valeurs calculées) aux cibles (valeurs des données) et à minimiser les écarts quadratiques entre ces valeurs de sortie simulées et ces valeurs cibles.

L'efficacité de l'apprentissage dépend, en effet, d'un grand nombre de paramètres que doit fixer l'utilisateur: le pas du gradient, l'architecture du réseau, le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, l'initialisation des poids...etc.

III.2.7.8 Algorithmes d'apprentissage du perceptron multicouche

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage du PMC, parmi les plus utilisés on cite :

✓ L'algorithme de la rétro-propagation du gradient

L'algorithme de la rétro-propagation du gradient est un algorithme itératif conçu pour minimiser un critère quadratique d'erreur entre la sortie obtenue d'un réseau multicouche et la sortie désirée. Cette minimisation est réalisée par une configuration des poids adéquate. L'erreur est la différence entre la valeur désirée pour le neurone de sortie et sa valeur calculée par propagation. En effet, l'algorithme nécessite une fonction continue, non-linéaire et différentiable comme fonction de transfert du neurone. [50]

L'algorithme de la rétro-propagation du gradient de l'erreur se résume aux étapes suivantes :

- 1)- Initialisation des poids de connexions à des valeurs aléatoires de faible grandeur;
- 2)- Présentation d'un couple (entrée, sortie désirée) de la base d'apprentissage ;
- 3)- Présentation de la forme d'entrée sur la couche d'entrée du réseau ;
- 4)- Calcul par propagation de la sortie;
- 5)- Calcul des différents signaux d'erreur des différentes couches ;
- 6)- Mise à jour des matrices de connexions ;
- 7)- Tant que l'erreur est trop importante, retourner à la deuxième étape.

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t(k) - a(k))^2 \quad (\text{III.14})$$

avec ;

E_m : Représente l'erreur quadratique commise au niveau de la couche de sortie du réseau ; N :

N : Le nombre d'exemple dans la base d'apprentissage ;

$e(k)$: L'erreur quadratique commise à la sortie du réseau ;

$t(k)$: Le vecteur cible (sortie désirée) ;

$a(k)$: Le vecteur de sortie élaboré par le réseau ;

Le mécanisme de recherche des poids optimaux du réseau est basé sur la minimisation de l'erreur E dans l'espace des poids synaptiques du réseau de neurones. Ce qui conduit à l'équation de mise à jour du j ième poids et du i ième neurone suivante :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \left(\frac{\partial E_m}{\partial w_{ij}(t)} \right) \quad (\text{III.15})$$

avec :

η :Le taux d'apprentissage ;

$w_{ij}(t+1)$:Nouveau poids ;

$w_{ij}(t)$:Ancien poids ;

✓ *L'algorithme de Levenberg-Marquardt*

C'est un algorithme itératif de minimisation, qui appartient à la classe des méthodes quasi-Newtoniennes, il obéit à la formule suivante de mise à jour des paramètres :

$$w^{k+1} = w^k - [H(w^k) + \mu_{k+1}I]^{-1} \nabla E(w^k) \quad (\text{III.16})$$

où :

$H(w^k)$:la matrice Hessienne d'une fonction de coût appelé E ;

I : la matrice identité ;

μ_{k+1} : un scalaire appelé pas.

Pour de petites valeurs du pas μ_{k+1} , cette méthode s'approche de celle de Newton, tandis que pour de grandes valeurs du pas, la méthode tend vers celle du gradient simple. En choisissant judicieusement la valeur du pas au cours de l'algorithme, il est donc possible de s'affranchir de la mise en œuvre préalable d'une méthode de gradient simple pour s'approcher du minimum.

Le calcul de l'inverse de la matrice $H(w^k) + \mu_{k+1}I$ peut s'effectuer par des méthodes d'inversion directe. Néanmoins, compte tenu de la fonction de coût des moindres carrés E , il est préférable de mettre en œuvre une méthode d'inversion itérative.

III.2.7.9 Capacité de généralisation

L'élaboration d'un bon modèle de réseau de neurones revient au choix de la structure et aussi aux nombres de neurones dans la couche cachée. Concernant les couches d'entrées et de sorties d'un réseau de neurones, elles doivent incorporer autant de neurones que le nombre d'entrées et de sorties du système à modéliser. À l'inverse le choix du nombre de neurones dans la couche cachée n'est pas imposé par le système à modéliser. Le nombre de neurones à

incorporer dans la couche cachée devrait être choisi afin de fournir de bonnes possibilités de généralisation pour l'estimateur neuronaux.

La capacité de généralisation est l'une des raisons qui motive l'étude et le développement des réseaux de neurones artificiels. Elle peut être définie par la capacité d'élargir les connaissances acquises après apprentissage à des données nouvellement rencontrées par le réseau. On parle de sur-apprentissage (over-fitting) quand le réseau a trop parfaitement appris les exemples proposés. Il sera donc incapable de généraliser. Une solution à ce problème consiste à utiliser un critère d'arrêt basé sur une technique dite validation croisée (cross-validation). Cette technique consiste alors à stopper l'apprentissage lorsque l'indice de performance calculé sur les données de validation cesse de s'améliorer pendant plusieurs périodes d'entraînement. La Figure III.23 illustre le critère de la validation croisée dans le cas d'un indice de performance que l'on cherche à minimiser.

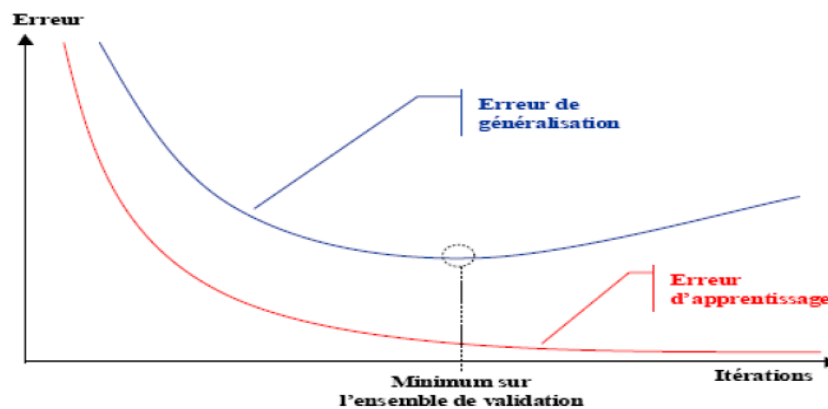


Figure III.23 : Illustration de la validation croisée.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à se familiariser avec les problèmes inverses, ensuite nous avons présenté les différentes techniques pour leurs résolutions. Parmi eux nous avons opté pour la technique des réseaux de neurones artificiels (RNA) que nous avons utilisée dans ce travail de mémoire ainsi que leurs propriétés y sont détaillées. Sa mise en œuvre est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Application des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mettre en œuvre les réseaux de neurones artificiels dans le but de reconstituer des défauts à partir des résultats obtenus lors d'un contrôle non destructif.

L'application considérée concernera l'évaluation de deux formes de défaut à l'intérieur de charges cylindriques inspectées par un capteur.

Les réseaux de neurones utilisés pour l'évaluation de ces défauts sont implémentés sous le logiciel MATLAB.

Les différentes étapes suivies seront détaillées ci-après.

IV.1 Mise en application des réseaux de neurones

Afin de développer une structure optimale du réseau neuronal, nous avons effectué plusieurs apprentissages en variant les paramètres du réseau tel que la fonction d'activation, le nombre de neurones de la couche cachée, l'algorithme d'apprentissage, ainsi que le pas d'apprentissage. Finalement nos choix sont orientés de la sorte

IV.1.1 Le choix de type de réseau de neurones

Comme nous l'avons vu auparavant, il existe plusieurs types de RNA, dans notre étude nous avons adopté le **Perceptron Multi Couches (PMC)**. En effet, ces dernières années, plusieurs techniques à base de PMC ont prouvé leur efficacité en termes d'erreurs de corrélation [51].

Durant toute cette partie nous considérerons un PMC contenant seulement une seule couche cachée ayant des neurones à fonction d'activation type tangente sigmoïde et une couche de sortie contenant un seul neurone à fonction d'activation linéaire.

Cependant la seule différence concernera le nombre de neurones dans la couche cachée qui va être différent d'un cas à l'autre illustré dans la Figure IV.1.

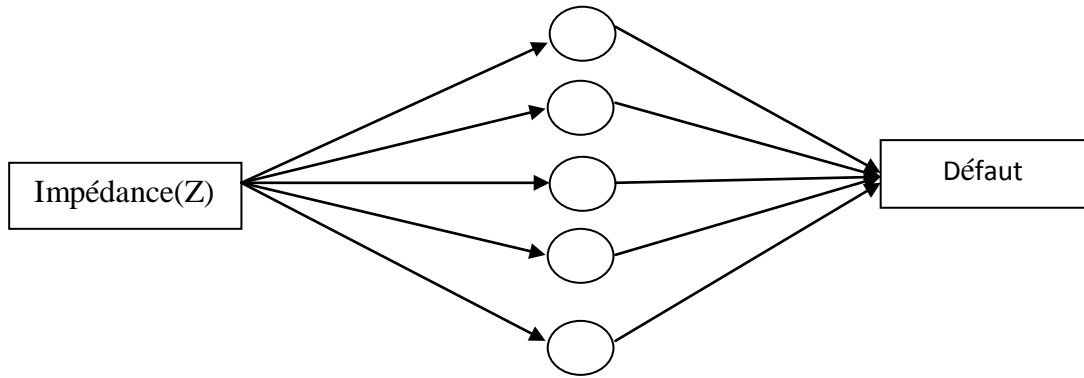


Figure IV.1 : Type du réseau de neurones.

IV.1.2 Le choix de la stratégie d'apprentissage

L'apprentissage est une propriété très importante des réseaux de neurones, dans notre cas nous avons choisi l'apprentissage supervisé, rappelons que l'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Le réseau doit alors s'adapter en calculant ses poids afin que sa sortie corresponde bien à la sortie désirée. Aussi nous avons choisi le mode 'batch training' qui veut dire par paquets, dans ce cas les poids synaptiques ne seront adaptés qu'après la présentation de tous les exemples de la base d'apprentissage.

Actuellement, plusieurs algorithmes d'apprentissage sont développés, notre choix s'est orienté vers une méthode du second ordre qui est l'algorithme de Levenberg-Marquardt, ce dernier assure une convergence plus rapide que celle des méthodes du premier ordre pour les réseaux d'apprentissage par paquets [52].

IV.1.3 Le choix de la fonction coût

La fonction coût choisie est l'erreur quadratique moyenne, MSE en anglais (Mean Square Error), reflétant l'écart entre la sortie du réseau et la sortie désirée, elle est définie comme suit

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t(k) - a(k))^2 \quad (IV.1)$$

avec

N : le nombre d'exemples dans la base d'apprentissage ;

$e(k)$: L'erreur quadratique commise à la sortie du réseau ;

$t(k)$: Le vecteur cible (sortie désirée) ;

$a(k)$: Le vecteur de sortie élaboré par le réseau ;

IV.1.4 Elaboration de la base de données pour l'apprentissage

Le choix de la base d'apprentissage est une étape très importante qu'il ne faut pas négliger et qui influe directement sur les résultats obtenus par le réseau de neurones. [51]

La base d'apprentissage utilisée dans notre travail a été élaborée à partir des résultats de simulations par élément finis (chapitre II), relative à un capteur qui permet la détection d'un défaut de formes différentes pour des différentes positions du capteur.

Nous avons construit une base d'apprentissage (entrées, sorties désirées), tel que les entrées sont l'impédance du capteur et les sorties désirées représentent les profondeurs du défaut ou la hauteur du défaut.

IV.2 Reconstitution d'un défaut

Dans cette partie, nous avons élaboré une base de données à partir des résultats du problème direct calculé par la méthode des éléments finis cette base est constituée, des valeurs de l'impédance et des dimensions du défaut.

L'impédance de capteur en fonction du déplacement du capteur pour les deux formes du défaut est donnée dans le chapitre II.

A cet effet, au lieu d'utiliser une seule mesure correspondant à une seule position, nous utilisons un ensemble de mesures correspondant à une multitude de positions. Il est évident que cette signature représente complètement la fissure (Figure II.9 et 10). Un vecteur composé de 334 mesures numériques de l'impédance Z correspondant à des positions différentes du capteur le long de la fissure constitue le vecteur d'entrée du RN.

IV.2.1 Validation et tests

Une fois le réseau de neurones développé, des tests s'imposent afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal. Cette dernière étape doit permettre d'estimer la qualité du réseau obtenu en lui présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Une validation rigoureuse du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de validation, [51]. Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit de modifier la base d'apprentissage, [52], comme le montre l'organigramme suivant:

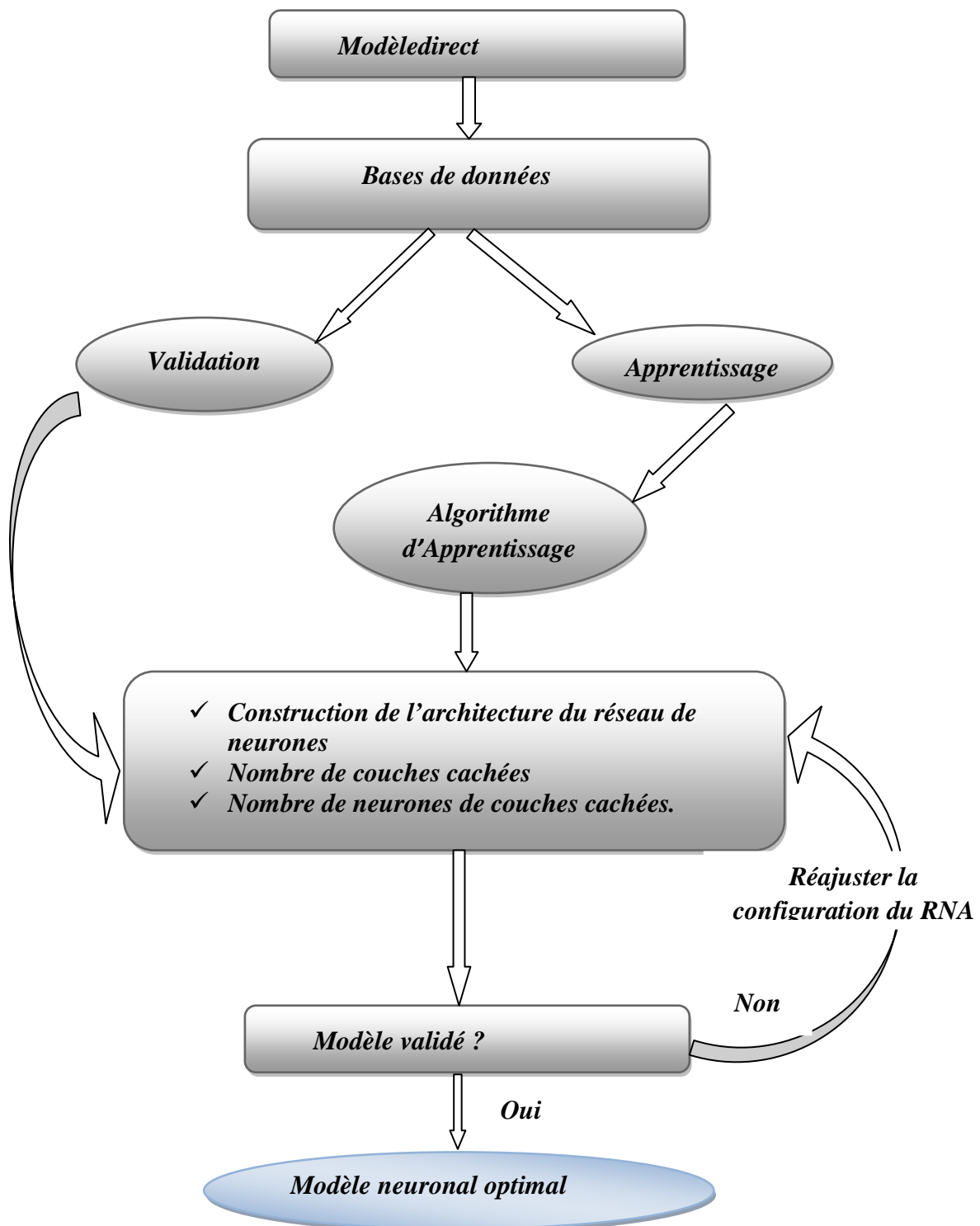


Figure IV.2 : Organigramme de l'entraînement d'un réseau de neurones.

IV.2.2 Application

Ils'agit d'une application de réseaux de neurones dans le domaine de (CND-CF), qui vise à caractériser les grandeurs géométriques d'un défaut axisymétrique. Nous avons rappelé dans les sections précédentes que

la procédure d'inversion par RNA passe par plusieurs étapes, à savoir :

- ✓ Construction d'une base de données en utilisant le modèle développé dans le chapitre précédent;
- ✓ Apprentissage du réseau de neurone (RNA);
- ✓ Test de la performance du RN sur un échantillon donné.

La procédure d'apprentissage du RNA consiste à choisir une configuration optimale de celui-ci: le nombre de neurones, en vérifiant les critères d'arrêt que nous imposons tels que la fonction coût qui est EQM (erreur quadratique moyenne).

IV.2.2.1 Estimation du défaut : Mise en œuvre de méthodes d'inversion

Nous nous intéressons à la mise en œuvre de méthodes d'inversion dans le but d'estimer des paramètres physiques ou géométriques de pièces à contrôler.

L'application étudiée consiste en la mise en œuvre de modèles inverses susceptibles d'estimer simultanément les deux paramètres de la fissure : profondeur et longueur. Dans cette application, un modèle neuronal est traité. La réponse du capteur constituant la base de données du RN est simulée à l'aide d'un modèle numérique élément finis.

1.1 Bases de données

L'inversion consiste à remonter à partir de la réponse du capteur aux paramètres de la fissure (profondeur, longueur). L'entrée du RN est constituée des parties réelles ou imaginaires de l'impédance du capteur (vecteur constituant la signature de la fissure) et la sortie est constituée des grandeurs estimées de la profondeur et de la longueur de la fissure.

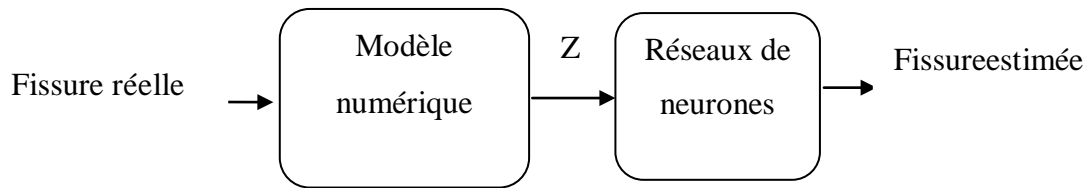


Figure IV.3: Inversion par RN.

Pour le RN, le problème crucial réside dans le choix de la structure et l'ajustement des paramètres internes du réseau. Afin de surmonter ce problème, deux bases de données seront utilisées pour l'inversion. Chaque base de données contient des exemples d'entrée-sortie de RN. Ces bases sont les bases d'apprentissage, validation et test. Pour cette application, les bases sont constituées respectivement de 70%, 30% et 30% des données.

1.2 Inversion par RN MLP

Il n'existe pas de méthode générale permettant de fixer une architecture du réseau (nombre de neurones dans la couche cachée) pour un problème donné. Dans ce contexte, on est amené à étudier un certain nombre d'architectures neuronales.

Pour chaque architecture, on fait plusieurs initialisations des paramètres synaptiques pour s'assurer que lors de l'apprentissage, le RN converge vers le minimum global du critère d'erreur. Pour chaque structure, on calcule l'erreur quadratique moyenne (EQM) sur la base d'apprentissage et la base de validation. Le réseau adéquat correspond à la structure qui a l'erreur quadratique la plus faible sur la base de validation.

Pour estimer la fissure, nous avons fait varier le nombre de neurones de la couche cachée, et pour chaque structure, on a effectué trois initialisations différentes des paramètres synaptiques. La Figure IV.4 montre l'évolution de l'erreur quadratique moyenne sur les bases d'apprentissage et de validation en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée.

Laprocédured'apprentissage du RNA est atteinte après 30 itérations, car l'erreur quadratique moyenne (EQM) a atteint l'optimum imposé, qui est de 10^{-7} .

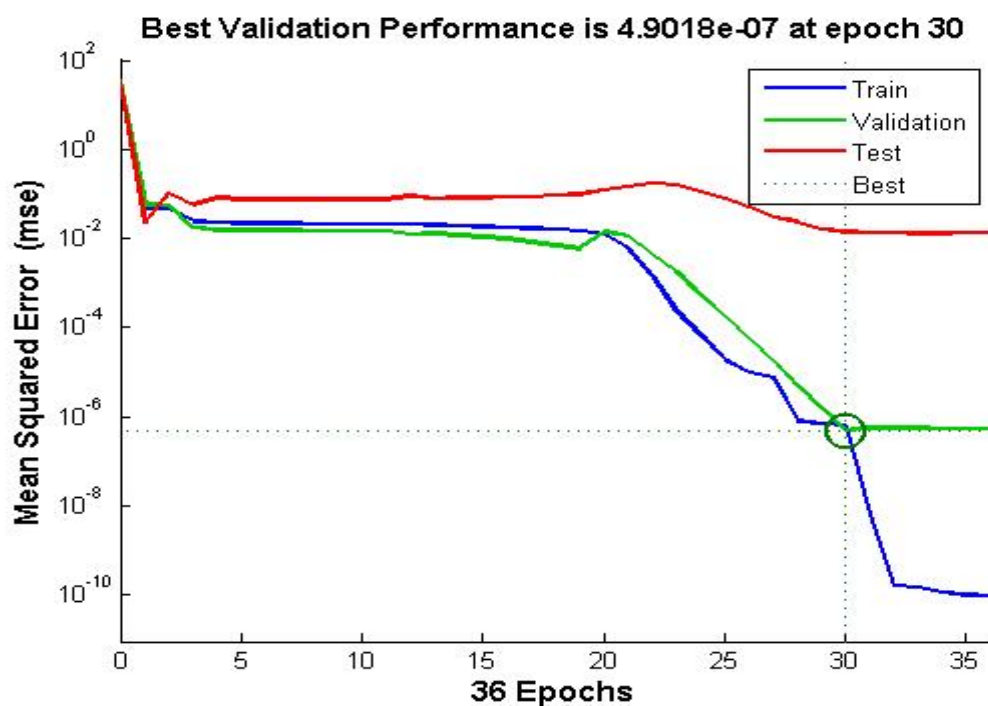


Figure IV.4 : EQM sur les bases d'apprentissage et de validation

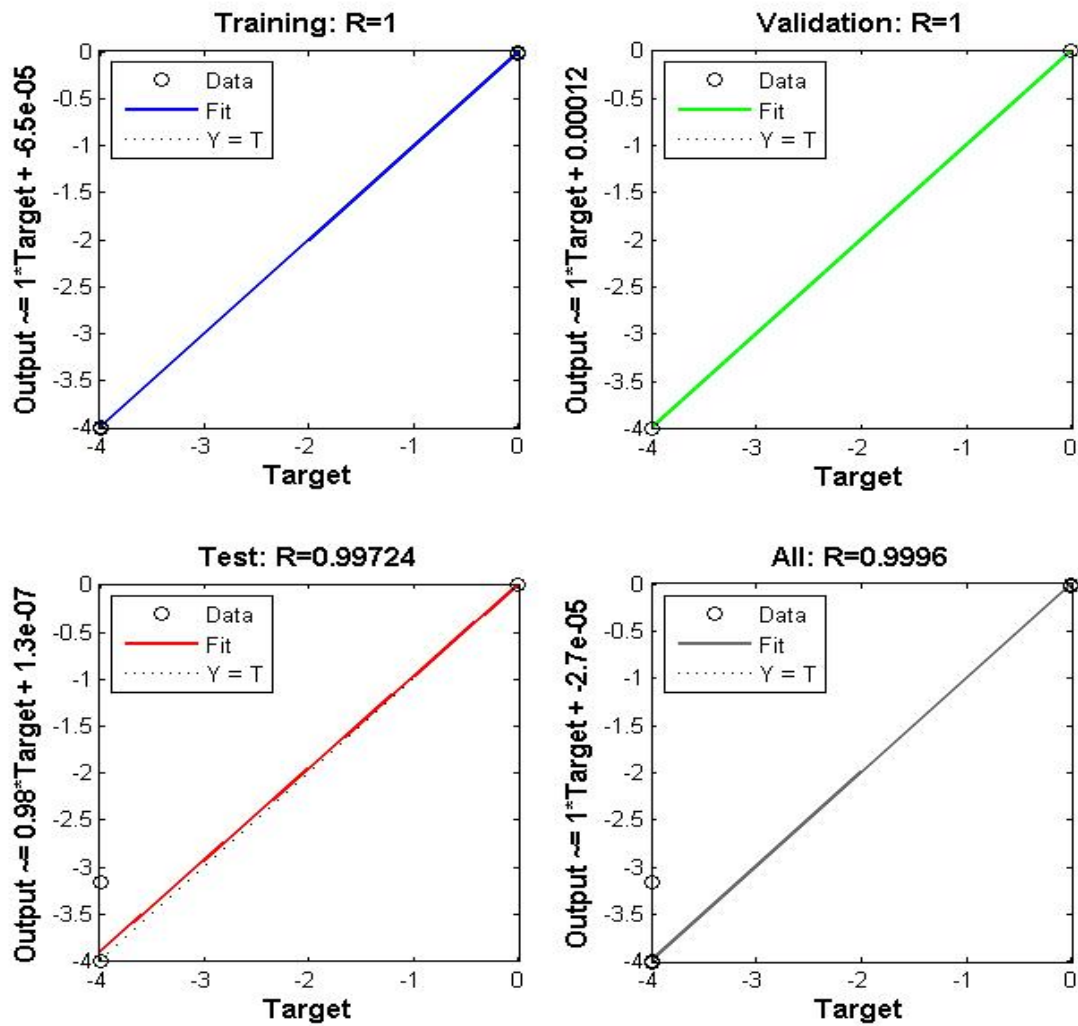


Figure IV.5 : Corrélation entre la sortie désirée et la sortie du réseau.

La Figure IV.5 représente la régression linéaire entre la sortie désirée et la sortie du réseau, nous remarquons qu'il y a une très bonne corrélation entre les valeurs réelles de la fissure et celles estimées par le réseau.

Finalement on a abouti à la forme géométrique globale du défaut, avec l'entraînement du réseau (MLP) imposé (l'erreur quadratique moyenne (EQM) a atteint l'optimum de 10^{-7}).

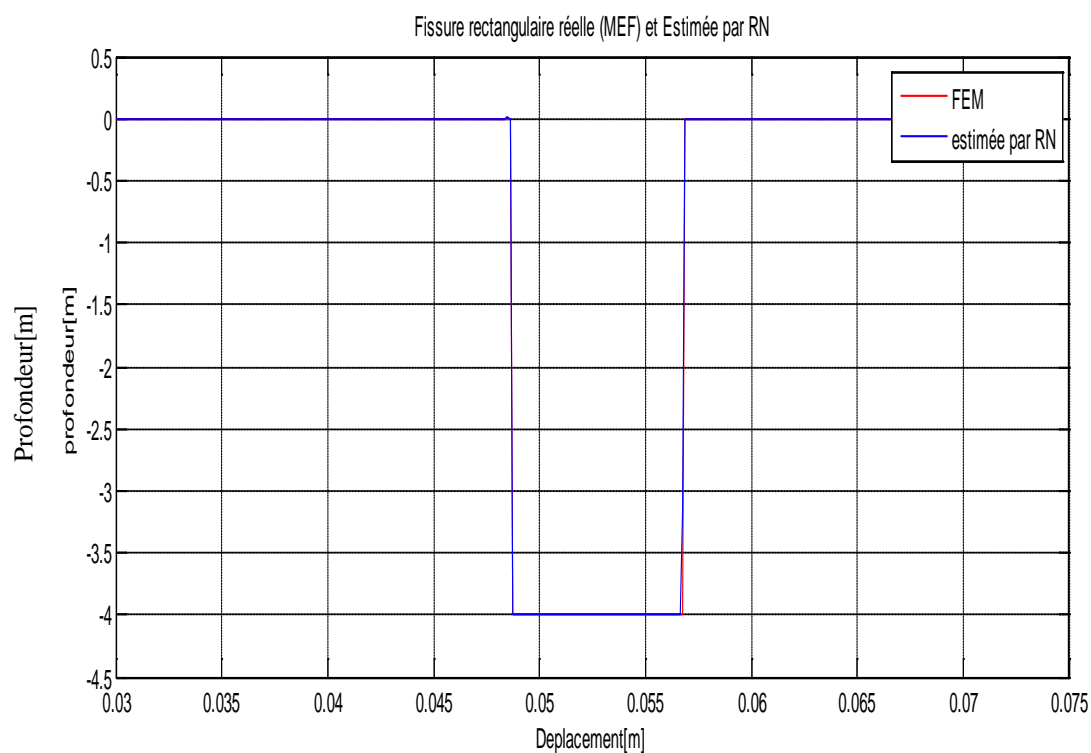


Figure IV.6 : Profil d'un défaut réel et celui estimé par RN.

Conclusion

Dans ce chapitre, une application par réseaux de neurones dans le domaine de (CND-CF) a été élaborée. Ils'agit de reconstituer la forme géométrique d'un défaut de type manqué de matière. Pour ce faire un problème inverse a été résolu par un réseau de neurones de type MLP. Les résultats obtenus montrent une similitude exemplaire entre ceux du modèle direct et du modèle par RNA, ce qui prouve qu'on peut atteindre des objectifs plus importants comme la caractérisation des défauts, chose qui n'était pas accessible par le biais du modèle direct.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans l'industrie, lors de la fabrication, l'assemblage ou l'utilisation de pièces industrielles, des défauts sont susceptibles d'apparaître et peuvent engendrer de graves conséquences. Les techniques de contrôle non destructif permettent de résoudre ce genre de problème.

Afin de détecter au plutôt un défaut, de nombreuses techniques de Contrôle Non Destructif (CND) ont été développées en fonction du type de matériau ou du type de défaut.

Dans ce travail, un état de l'art a été établi du point de vue méthodologique et technologique sur les différentes techniques de Contrôle non Destructif (CND).

L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des milieux conducteurs. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse ont rendu cette technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies. Dans la seconde, nous avons présenté un aperçu sur les différents capteurs et sondes utilisées dans le domaine de CND-CF. Par ailleurs, un historique sur la mécanique de la rupture ainsi que les méthodes anciennes concernant le calcul des facteurs d'intensité K_I

Afin d'avoir un outil de modélisation capable de couvrir un grand nombre de configurations, les méthodes numériques reposant sur la méthode des éléments finis prennent l'avantage devant les méthodes analytiques qui ne s'appliquent que dans quelques cas spécifiques. Un accent particulier a été mis sur le modèle éléments finis axisymétrique. Ce dernier s'avère très rapide même en comparaison au modèle analytique.

La détection d'un défaut est une phase très importante, qui intéresse les chercheurs théoriciens et praticiens, pour cela une modélisation par éléments finis a été attribuée, pour la détection de deux défauts de géométries différentes rectangulaires et triangulaires.

La connaissance de la géométrie du défaut et les caractéristiques physiques (conductivité, perméabilité) de la cible, dans le domaine du CND-CF est très importante car il n'existe pas une relation directe entre par exemple l'impédance du capteur et celle du défaut. Ce qui rend la résolution des problèmes directs limitée, alors un passage aux problèmes inverses devient une nécessité. Ce qui nous a conduit à résoudre ce problème à travers les techniques de l'intelligence artificielle ; telle que celle des réseaux de neurones, dont l'objectif est la caractérisation géométrique d'un défaut axisymétrique.

Le développement de cette approche a été fondé sur deux étapes, dans la première il s'agissait de proposer une architecture optimale des réseaux, et de régler les paramètres du réseau à savoir, le nombre de neurones dans la couche cachée ainsi que les fonctions d'activation de ces derniers, cette étape devrait se faire soigneusement. La deuxième, le choix de l'algorithme d'apprentissage, ainsi que le taux d'apprentissage. Enfin nous avons mis en œuvre le réseau, ensuite nous avons procédé au test et à la généralisation.

Le travail effectué dans le contexte de ce mémoire a permis d'acquérir une base solide dans la mise au point d'outils logiciels et matériels pour l'étude du contrôle non destructif par courants de Foucault. Les algorithmes mis en place et les méthodes utilisées sont suffisamment généraux pour pouvoir être réutilisés dans des études ultérieures. Cependant, il y a encore un vaste champ de travail pour améliorer le traitement des problèmes de CND par CF. En termes de perspectives à ce travail, de multiples améliorations pourront être opérées pour cette approche. Les suggestions que nous pouvons faire portent sur :

- Elaboration d'une modélisation de la propagation dynamique de la fissure par introduction des contraintes mécaniques.
- Étendre l'étude des défauts soit manque de matière et/ou conducteur à une étude en 3D.
- Introduction des nouveaux capteurs magnétiques se caractérisent par leurs sensibilités et leurs grandes bandes passantes en faible fréquence pour l'inspection des pièces que se soit magnétiques ou amagnétiques.
- Passage à une réalisation d'un prototype de l'ensemble capteur/cible qui nous permet de valider les différents résultats obtenus.
- Étendre l'étude pour la détection de défauts profonds en utilisant la technique des courants de Foucault pulsée.
- Création d'une interface pour un problème de (CND) traité par les techniques de l'intelligence artificielles et élargir la base de données pour des systèmes plus complexes.
- Optimisation de différentes grandeurs de défauts soit manque de matière ou conducteur utilisant les algorithmes génétiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] C.Gardin, Introduction à la mécanique de la rupture, ENSMA, Poitiers, France, 2005.
 - [2] S.Lalonde, Modélisation de la propagation des fissures dans les engrenages par la méthode des éléments frontières, Mémoire de magister, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, 2008
 - [3] S.Pommier, Mécanique des matériaux, Université Pierre et Marie Curie, 2009-2010.
 - [4] H.D.Bui, Mécanique de la rupture fragile, Edition Masson, 1978.
 - [5] J. DUMONT-FILLON : « contrôle non destructive (CND). » Technique de l'ingénieur,R1400, 2003.
 - [6] A.ABOU: « Contrôle non destructive par courant de Foucault, étude et réalisation d'un capteur inductif. », Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2006.
 - [7] M. WANIN : « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux (partie1) » Technique de l'ingénieur, M4130, 2003.
 - [8] W. SLIMANE : « conception d'un système multi-capteurs à courant de Foucault pour lecontrôle non destructif. », Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2008.
 - [9] FRANK A. IDDINGS, PETER J. SHULL :« liquide pénétrant, Non destructive Evaluation,theory, technique, and applications ». L'université de Louisiana et de Pennsylvania, 2002.
 - [10] N. BENHADDA : « Modélisation des capteurs inductifs à courant de Foucault », Mémoire de Magistère de l'université de Batna, 2006.
 - [11] G. FOURNET « Electromagnétisme. » Technique de l'ingénieur, D1020, 2003.
 - [12] Peter J. Shull, « Non destructive Evaluation, theory, technique, and applications, Eddy Current ».Université, de l'état de La Pennsylvanie, 2002.
 - [13] N.YASA , W. Cheng , T. Uchimoto, K. Miya, « Profile reconstruction of simulatednatural cracks from eddy current signals » NDT& International 35,9-18, 2002.
 - [14] N. K. Mukhopadhyay, S. K. Maitiand A. Kakodkar, «Review of SIF evaluation and modeling of singularities in BEM», Journal of Computational Mechanics, Vol. 25, 4, pp.358-375, 2000.
 - [15] P. F.P. De Matos, M.G.P. Moreira, A. Portela andS. T. De Castro, «Dual boundary element analysis of cracked plates: Post-processing implementation of the singularity subtraction technique», International Conference in Computational Mechanics in Portugal, April 17-19 2003, Vol. 82, pp. 1443-1449, Elsevier Ltd, Oxford, United Kingdom, 2004.
 - [16] T.L. Anderson,« Fracture mechanics: fundamentals and applications», 3rd.Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 621 p, 2005.
-

Références bibliographiques

- [17] M. H. Aliabadi, «Boundary element formulations in fracture mechanics», AppliedMechanics Reviews, Vol. 50, n° 2, p. 83-96, 1997.
- [18] A.Zeghloul, « Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture », édité par University de METZ, (2003-2004).
- [19] 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
- [20] G. Ventura, B. Moran, T. Belytschko, « Dislocations by partition of unity». Int J NumerMath.Eng; 62: 1463–87 (2005).
- [21] Matthew J. Pais and Nam-Ho Kim,« Modeling Failure in Composite Materials with the Extended Finite Element and Level Set Methods», University of Florida, Gainesville, FL 32611.
- [22] Dréau.K, Chevaugeon.N, Moës.N, «Studied X-FEM enrichment to handle material interfaces with higher order finite element», 1922–1936,«Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering»,Vol. 199, 2010.
- [23] E. Durand, «Magnétostatique», Université de Paris-VI (1969).
- [24] P. Lorrain, D.P. Corson, F. Lorrain, «Electromagnetic fields and Waves», W.H. Freeman and Co. New York, 1988.
- [25] R. Petit, « Ondes électromagnétiques », Masson, Paris, 1989.
- [26] S. ZERGUINI, « Résolution du Problème du Chauffage par Induction Axisymétrique 2D par la Méthode des Éléments Finis », Thèse de magister, Université de Bejaia, soutenue le 26/07/1997.
- [27] KH. CHATRI, «Étude des Phénomènes Magnétothermiques des Dispositifs de Chauffage par Induction par la Méthode des Éléments Finis », Thèse de magister, Université de Batna, soutenue 2000.
- [28] W. LONG, « Contribution à la Modélisation de Systèmes Electromagnétiques à L'aide des Équations des Circuits Magnétiques et Électrique », Thèse de doctorat, spécialité sciences physiques (électrotechnique), Université Paris, Soutenue le 26/10/1990.
- [29] Y. Lebyhen, « Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault approche basée sur la méthode des éléments finis », Université Pierre et Marie Curie
- [30] THOMAS KINCAID, Member, IEEE, and V. MADABUSHI, K. CHARI, Member, IEEE, «The Application of Finite Element Method Analysis to Eddy Current Non-Destructive Evaluation», IEEE Transaction on Magnetics, Vol, Mag-15, N° 6, November 1979.
-

- [31] J.W. Luquire, W.E. Deeds, et C.V. Dodd, «Alternating current distribution between planar conductors», *Journal of Applied Physics*, Vol. 41, pp. 3981–3991, 1970.
- [32] C.V. Dodd et W. E. Deeds, «Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems», *Journal of Applied Physics*, Vol. 39, pp. 2829–2832, 1968.
- [33] P. Theodoulidis, «Model of ferrite-cored probe for eddy current non-destructive evaluation», *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 5, pp. 3071–3078, 2003.
- [34] G. Dhatt, G. Touzot, et E. Lefrançois, «Une présentation de la méthode des éléments finis», Presses Université Laval, 1981.
- [35] N. Ida et J. P. A. Bastos, «Electromagnetic and Calculation of Fields». Springer, 1997.
- [36] S. N. Rajesh, «Probability of Detection Models for Eddy Current NDE Methods», Thesis submitted to Iowa State University, Prepared for the U Department of Energy, April 30, 1993
- [37] J. FONTACHASTAGNER, «Résolution du problème inverse de conception d'actionneurs électromagnétiques par association de méthodes déterministes d'optimisation globale avec des modèles analytiques et numériques », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [38] G. DEMOMENT, J. IDIER, J.F. VANNELLI, A.M, DJAFARI, « Problèmes inverses en traitement de signal et de l'image », *Technique de l'ingénieur*, TE 5235, 2003.
- [39] C. RAVAT, « Conception de multicapteurs à courant de Foucault et inversion des signaux associées pour le contrôle non destructif », thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, 2008.
- [40] F. Cau, A. Fanni, A. Montisci, P. Testoni, M. Usai, « Artificial Neural Networks for Non-Destructive Evaluation with Ultrasonic Waves in not Accessible Pipes », 0-7803-9208, p685-692/ IEEE Mai 2005.
- [41] W. TFAILI, « Conception d'un algorithme de colonies de fourmis pour l'optimisation continue dynamique », Thèse de Doctorat, Université Paris 12- Val de MARE, 2007.
- [42] A.ZAOUI, « Contribution à la modélisation du CND par matrice de capteurs à courant de Foucault ». Thèse de Doctorat en cotutelle, EMP Alger, Université de Nantes, 2008.
- [43] O. HAJJI, « Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques », Thèse de Doctorat, université de LILLE, 2003.
- [44] J. Freeman, D. Skapura, « Neural Networks. Algorithms, Applications and Programming Techniques », University of Houston at Clear Lake, 1995.
-

Références bibliographiques

- [45] A. Nouicer, M. Elhadi Latreche, « A Hybrid Algorithm to Solve Large Scale Electromagnetic Problems », *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 58, NO. 4, 220–223, 2007.
- [46] J. Rude, « Développement d'un modèle statistique neuronal pour la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote : application à la région parisienne », Thèse de Doctorat, l'Université Paris XII, 2008.
- [47] Y. Le Bihan, J. Pavo, C. Marchand, « Characterization of small cracks in Eddy Current Testing », *Eur. Phys. J. Appl. Phys*, 43, 231-237, 2008.
- [48] G. Dreyfus, J. M. Martinez, M. Samuelides M. B. Gordon, F. Badran, S. Thiria, L. Hérault, « Réseaux de neurones : Méthodologie et applications », Edition EYROLLES, 2004.
- [49] M. R. ZEMOURI, « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la maintenance », Thèse de Doctorat, l'Université de Franche-Comté, 2003.
- [50] M. WEINFELD, « Réseaux de neurones », *Technique de l'ingénieur*, H1990, 2003
- [51] M. Wrzuszczak, J. Wrzuszczak, « Eddy current flaw detection with neural network applications », *Measurement*, Science Direct, Vol 38, p132–136, 2005.
- [52] N. YASA, W. Cheng, Z. Chen, K. Miya, « Generalized Neural Network approach to Eddy Current Inversion for real Cracks », *NDT & International* 35, 609-614, 2002.
-