



Department: Civil Engineering

Order N° : / 2024
Defence authorization N°/2024

DOCTORAL THESIS

Doctoral Of Science

Presented by

Mustapha AMOR

With a view to obtaining the doctoral diploma in Doctoral of Science

Branch : Civil Engineering

Specialty : Structure

Topic

Contrôle non destructif par courant de Foucault en utilisant des investigations par MEF , problèmes inverses et expérimentaux pour l'analyse des propagations des fissures

Supported, on **18 / 01 / 2024**, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr. Abdellah KOUZOU	Professeur	Djelfa University	President
Mr Salaheddine HARZALLAH	MCA	Djelfa University	Supervisor
Mr Benchikh BOUBAKER	MCA	Djelfa University	Co-Supervisor
Mr Mohamed CHABAAT	Professeur	USTHB	Examiner
Mr Chikh BENZAOUZ	MCA	ENSTP	Examiner
Mr Mohamed OMRANE	MCA	Djelfa University	Examiner
Mr Lazhar HARICHE	MCA	Djelfa University	Invited

Remerciements

Nous remercions DIEU qui nous à donner la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements :

A nos parents pour leur contribution pour chaque travail que nous avons effectué.

A mon enseignant et directeur de thèse Monsieur HARZALLAH SALAHEDDINE, Professeur à la faculté de génie civil de l'Université Ziane Achour de Djelfa, pour son aide précieuse, ses nombreux conseils et surtout sa compréhension durant l'élaboration de cette thèse. Ses compétences scientifiques sont inégalables et m'ont beaucoup aidé à mener à bien ce travail de recherche.

Un très grand merci à notre Co-promoteur Dr. BENCHEIKH Boubakeur pour ses conseils et orientations et d'avoir dirigé ce travail.

Nous remercions tous les enseignants à la faculté de génie civil de l'Université Ziane Achour de Djelfa.

Je tiens à remercier Pr. KOUZOU Abdellah, Professeur à la faculté de génie électrique de l'Université de Djelfa qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

Je désire aussi remercier Pr. CHABAAT Mohamed, Professeur à la faculté de génie civil de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB qui m'a fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail.

Je remercie Messieurs Dr. OMRANE Mohamed, Maître de Conférences à la faculté de génie civil de l'Université de Djelfa qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Je remercie Messieurs Dr. BENAZOUC Chikh, Maître de Conférences à L'ecole national de travaux Public ENSTP pour faire partie de ce jury et accepter d'examiner ce travail.

Je remercie aussi Dr. HARICHE Larhar, Maître de Conférences à la faculté de génie civil de l'Université de Djelfa qui m'a honoré de sa présence pour examiner mon travail.

Merci à tout le monde et que dieu vous garde.

AMOR MUSTAPHA



Table des Matières

Remerciements.....	I
Résumé	II
Liste des Figures	III
Liste des Tableaux	IV
Liste des Symboles.....	V
Introduction Générale	1

Chapitre 1

Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

1.1 Introduction.....	4
1.2 Divers techniques de contrôle non destructif et conceptions généraux.....	4
1.2.1 Procédés optiques.....	5
1.2.2 Ressuage	6
1.2.2.1 Champ d'application.....	6
1.2.2.2 Avantages et inconvénients.....	7
1.2.3 Flux de fuite magnétique.....	7
1.2.3.1 Champ d'application.....	8
1.2.3.2 Avantages et inconvénients.....	8
1.2.4 Radiographie	8
1.2.4.1 Champ d'application.....	9
1.2.4.2 Avantages et inconvénients.....	9
1.2.5 Thermographie.....	10
1.2.5.1 Champ d'application.....	10
1.2.5.2 Avantages et inconvénients.....	10
1.2.6 Ultrasons.....	11
1.2.6.1 Champ d'application.....	11
1.2.6.2 Avantages et inconvénients.....	11
1.2.7 CND par courants de Foucault.....	12

1.2.7.1 Effet de peau	14
1.2.7.2 Différents modèles de sondes	15
1.2.8 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault.....	17
1.2.8.1 Définition d'un capteur.....	17
1.2.8.2 Classification des capteurs	17
1.2.8.3 Exemples de capteurs	19
1.2.9 Plan d'impédance normalisée.....	20
1.2.10 Différents modes d'excitations.....	22
1.2.11 Avantages du CND par courants de Foucault.....	23
1.2.12 Approche modélisation	23
1.3 Conclusion.....	24

Chapitre 2

L'analyse des propagations de fissures et calcul du

Facteur d'Intensité de Contrainte

2.1 Introduction	25
2.2 Mécanique linéaire et non-linéaire de la rupture	27
2.2.1 Types élémentaires de rupture.....	27
2.2.2 Modes de rupture	28
2.3 Approche globale de la mécanique linéaire de la rupture	29
2.4 Facteurs d'intensité de contrainte.....	29
2.4.1 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture	30
2.4.2 Champs de contrainte et déplacement.....	31
2.4.2.1 Champs de contraintes au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode I	32
2.4.2.2 Champs de déplacements au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode I ...	32
2.4.2.3 Champs de contraintes au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode II.....	33
2.4.2.4 Champs de déplacements au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode II .	33
2.5 Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes.....	34
2.5.1 La méthode du principe de superposition.....	34
2.5.2 La méthode d'extrapolation des déplacements	34
2.5.3 La méthode des éléments finis.....	34
2.6 Différents régimes de propagation	35
2.6.1 Modèles de propagation des fissures de fatigue	36
2.6.1.1 Loi de Paris	36
2.6.1.2 Loi de Forman	37

2.7 Taux de restitution d'énergie	37
2.8 Intégrale de contour « Intégrale J »	37
2.9 Conclusion	39

Chapitre 3

Méthodes de Résolution des Problèmes CND-CF par la méthode des éléments finis

3.1 Introduction.....	41
3.2 Modélisation du dispositif de CND par CF.....	41
3.3 Mise en équations.....	42
3.3.1 Equations de Maxwell.....	42
3.3.2 Lois constitutives	43
3.3.3 Conditions aux limites	44
3.3.4 Conditions de continuité.....	44
3.3.5 Conditions de Jauge	45
3.3.6 Hypothèses simplificatrices	45
3.3.7 Champs et potentiels.....	46
3.4 Résolution des équations de Maxwell.....	46
3.4.1 Formulations magnétodynamiques	46
3.4.2 Formulations de type électrique.....	46
3.4.2.1 Formulation en champ électrique	47
3.4.2.2 Formulation en potentiels : vecteur électrique et scalaire magnétique.....	47
3.4.3 Formulation magnétodynamique en termes de potentiels vecteur magnétique.....	47
3.5 Modèle en 2D.....	49
3.6 Choix d'une formulation	50
3.7 Méthodes de résolution	51
3.7.1 Méthodes analytiques.....	51
3.7.2 Méthodes numériques.....	52
3.7.2.1 La méthode des éléments de frontières	52
3.7.2.2 La méthode des intégrales de volumes.....	52
3.7.2.3 La méthode des volumes finis	52
3.7.2.4 La méthode des éléments finis.....	53
3.8 Approximation par la méthode des éléments finis	53
3.8.1 Subdivision du domaine (discrétisation)	55
3.8.2 Sélection des fonctions d'interpolation.....	55

3.8.3	Formulation du système d'équations.....	56
3.8.3.1	Méthode variationnelle.....	56
3.8.3.2	Méthode des résidus pondérés.....	57
3.8.3.3	Méthode de Galerkin.....	57
3.8.3.4	Résolution de l'équation électromagnétique par la MEF.....	58
3.8.4	Résolution du système.....	59
3.9	Calcul de la variation d'impédance.....	61
3.9.1	Méthode directe.....	61
3.9.2	Méthode de l'énergie.....	62
3.10	Applications et simulations.....	63
3.10.1	Modèle proposé.....	64
3.10.1.1	Techniques de maillage.....	65
3.10.1.2	Méthode de la bande géométrique.....	66
3.10.1.3	Benchmark TEAM Workshop N°15-1.....	67
3.10.1.4	Effet de l'épaisseur de la fissure sur le signal CF.....	69
3.10.2	Développement du modèle direct.....	70
3.10.3	Impédance normalisée.....	70
3.10	Conclusion.....	72

Chapitre 4

Problème inverse des systèmes (CND-CF) Optimisé par essaim de particules (PSO)

4.1	Introduction.....	73
4.2	Problème Inverse.....	74
4.2.1	Problème à caractère mal posé.....	75
4.2.2	Stratégie de traitement du problème inverse.....	76
4.2.3	Estimation d'une grandeur par la méthode du problème inverse.....	77
4.2.4	Inversion basée sur le modèle direct.....	78
4.3	Classification des méthodes d'optimisation.....	79
4.3.1	Méthodes déterministes.....	79
4.3.2	Méthodes stochastiques.....	80
4.4	Les réseaux de neurones.....	81
4.4.1	Historique sur les réseaux de neurones.....	81
4.4.2	Fonctionnement d'un neurone formel.....	82
4.4.3	Composition d'un réseau de neurones Multicouches.....	83

4.4.4 Validation et Tests.....	84
4.5 La méthode de Nelder-Mead.....	84
4.5.1 Principe.....	85
4.5.2 Avantages et Inconvénients de la méthode de Nelder Mead.....	86
4.6 L'optimisation par essaim de particules (PSO).....	86
4.6.1 Principe de l'optimisation (PSO).....	87
4.6.2 La solution et Avantage de PSO.....	87
4.6.3 Formulation de PSO.....	87
4.6.4 Configuration des paramètres.....	88
4.6.4.1 Nombre de particules.....	88
4.6.4.2 Taille et topologie de voisinage.....	88
4.6.4.3 Coefficients de confiance et coefficient d'inertie.....	89
4.6.5 Amélioration des algorithmes PSO.....	89
4.6.5.1 Confinement des particules.....	90
4.6.5.2 Coefficient de constriction.....	91
4.6.5.3 Coefficient d'inertie.....	91
4.6.6 Stratégie Entièrement informée l'essaim particule (FIPS).....	92
4.7 Algorithme TRIBES.....	92
4.8 Optimisation par essaim de particules à convergence rapides FC-PSO.....	93
4.8.1 Hybridation de PSO avec algorithme génétique.....	93
4.9 Algorithme génétique.....	94
4.9.1 Algorithme GA-PSO.....	95
4.10 Cas d'application (pièce avec défaut).....	96
4.10.1 Description du système étudié.....	96
4.10.2 Résultats et simulation du problème direct.....	97
4.10.3 Résolution du problème inverse (capteur et pièce avec défaut).....	98
4.10.4 Évaluation Facteurs d'intensité de contrainte.....	100
Conclusion.....	101

Chapitre V

Applications et Discussion des Résultats

5.1 Introduction.....	103
5.2 Cas d'application.....	103

<u>Partie I</u>	
5.2.1	Evaluation vecteur magnétique potentiel avec MEF.....104
5.2.2	Interprétation de résultats.....106
5.2.3	Evaluation l'orientation de la fissure:.....108
5.2.4	Évaluation Facteurs d'intensité de contrainte FIC.....110
<u>Partie II</u>	
5.2.5	Application de l'optimisation de l'essaim de particules (PSO).....113
5.2.6	Description du problème.....114
5.2.7	Interprétation de résultats.....117
5.3	Conclusion.....123
Conclusion Générale125	
Références bibliographiques128	

RESUME

RÉSUMÉ

Nous présentons une nouvelle méthode pour calculer les paramètres de la mécanique de la rupture tels que le Facteur d'intensité de contraint (FIC) et le taux de restitution d'énergie (J) en mesurant et en examinant les courants de Foucault relatifs. La deuxième partie de ce travail représenter une nouvelle méthode est basée sur la variation de l'impédance concerne une nouvelle approche tel que l'optimisation par Essaim des Particules (PSO) et l'utilisation du Technique de Eddy Curent de l'analyse par la Méthode des Eléments Finis (MEF) pour résoudre le problème inverse rencontré dans la détection des fissures. L'approche est utilisée pour identifier les objets métalliques inconnus et détecter les fissures afin que l'étude de leur propagation par la détermination des paramètres des fissures (**FIC, J- intégral**).

Mots Clés : Contrôle non Destructif (CND), Courants de Foucault (CF), Impédance Complexe, Facteur d'Intensité de Contraintes, Intégrale -J, Optimisation par Essaim de Particules (PSO),

ABSTRACT

We present a new method to calculate fracture mechanics parameters such as Stress Intensity Factor (SIF) and energy release rate (J) by measuring and examining relative eddy currents. The second part of this work represents a new method is based on the variation of the impedance concerns a new approach such as Particle Swarm Optimization (PSO) and the use of the Eddy Curent Technique of analysis by the Finite Element Method (FEM) to solve the inverse problem encountered in crack detection. The approach is used to identify unknown metallic objects and detect cracks so that the study of their propagation by determining the crack parameters (FIC, J-integral).

Key words: Non-Destructive Testing (NDT), Eddy Current (CF), Complex Impedance, Stress Intensity Factor, J-Integral, Particle Swarm Optimization (PSO).

المخلص

نقدم طريقة جديدة لحساب معاملات ميكانيكا الكسر مثل عامل شدة الإجهاد (FIC) ومعدل إطلاق الطاقة (J) عن طريق قياس وفحص التيارات الدوامية النسبية. يمثل الجزء الثاني من هذا العمل طريقة جديدة تعتمد على تباين المعاوقة المتعلقة بنهج جديد مثل تحسين حشد الجسيمات (PSO) واستخدام تقنية إيدي للتحليل بواسطة طريقة العناصر المنتهية (FEM) وهذا من أجل إيجاد حل للمشكلة العكسية التي تمت مواجهتها في شقوق الكشف. يستخدم هذا النهج لتحديد الأجسام المعدنية غير المعروفة والكشف عن الشقوق بحيث يتم دراسة انتشارها من خلال تحديد معاملات الشقوق (FIC)، (J-Integral)

الكلمات المفتاحية: ، الاختبار غير المدمر (CND) ، التيارات الدوامية (CF)، المعاوقة المعقدة ، عامل شدة الإجهاد ، -J-

Integral ، تحسين سرب الجسيمات (PSO)

Liste des figures

Chapitre 1 : Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

Figure 1. 1: L'examen visuel.....	5
Figure 1.2 :Principe de la méthode de ressuage	6
Figure 1.3 : Contrôle par magnétoscopie	7
Figure 1.4 : Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut	9
Figure 1.5 : Principe thermographie.....	10
Figure 1.6 : Principe des ultrasons.....	11
Figure 1.7 : Jean Bernard Léon Foucault.....	12
Figure 1.8 : Principe CND.....	12
Figure 1.9 : Principe CND par courants de Foucault.....	13
Figure 1.10 : Chemin des courants de Foucault.....	13
Figure 1.11 : répartition des courants de Foucault pour une pièce.....	15
Figure 1.12 : Effet de peau.....	15
Figure 1.13: sonde à double fonctions.....	16
Figure 1.14 : sonde à fonction séparées.....	16
Figure 1.15: sonde différentielle.....	17
Figure 1. 17- Capteur encerclant.....	17
Figure 1.18- Bobine interne glissante avec noyau.....	18
Figure 1. 19 - Bobine plate.....	18
Figure 1. 20-Capteur interne tournant.....	18
Figure 1. 21 -Capteur à double fonction.....	19
Figure 1.22: Modes de fonctionnements	19
Figure 1.23- Quelques exemples de capteurs.....	20
Figure 1.24 Mesure de la variation d'impédance du capteur.....	21
Figure 1.25: Plan d'impédance normalisée.....	21
Figure 1.26– Approches en Contrôle Non Destructif (CND).....	23

Chapitre 2 : L'analyse des propagations de fissures et calcul du Facteur d'Intensité de Contrainte

Figure 2.1 : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure	28
Figure 2.2 Modes d'ouvertures des fissures.	28
Figure 2.3. Courbe contrainte/déformation.....	29
Figure 2.4 : Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure.....	29
Figure 2.5 : Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord.....	30
Figure 2.6 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure.....	31
Figure 2.7 : Différents modes élémentaires de fissuration.....	32
Figure 2.8 – (a) élément isoparamétrique à 8 nœuds dans le repère local,(b)élément isoparamétrique à 8 nœuds dans le repère global,(c) élément triangulaire formé par effondrement des noeuds 4, 8,1 en seul point.....	35

Liste des figures

Figure 2.9 : Différent régimes de propagation (François et al. 1992).....	36
Figure 2.10 Contour indépendant de l'intégrale J.....	38

Chapitre 3 : Méthodes de Résolution des Problèmes CND-CF par la méthode des éléments finis

Figure 3.1 : Système capteur-fissure.....	42
Figure 3.2 – Problème magnétodynamique type.....	42
Figure 3.3 : Interface entre deux milieux.....	44
Figure 3.4 : Géométrie du dispositif en 2D.....	49
Figure 3.5 Coupe 2D du maillage.....	55
Figure 3.6 – Mise en oeuvre de la simulation MEF.....	60
Figure 3.7 : Organigramme du bloc électromagnétique [1].....	64
Figure 3.8 : Modèle complet en coupe et en perspective, [2].....	65
Figure 3.9 : Signature de la fissure : Tracé des variations de la résistance et de la réactance de l'impédance du système en fonction de la distance balayée par le capteur.....	65
Figures 3.10 – Illustration de la méthode de la bande géométrique pour un scan transversalement à la fissure (suivant l'axe Oy).....	66
Figures 3.11 – Illustration de la méthode de la bande géométrique pour un scan le long de la fissure (suivant l'axe Ox).....	67
Figure 3.12 - Zoom du maillage dans la zone de la fissure.....	67
Figure 3.13 – Module du potentiel vecteur magnétique.....	68
Figure 3.14 – Variations de la résistance.....	68
Figure 3.15 – Variations de la réactance.....	69
Figures 3.16 - Signatures CF pour trois fissures de 0,30 mm, 0,25 mm et 0,15 mm d'épaisseurs ayant les mêmes profondeurs et les mêmes longueurs.....	69
Figure 3.17 – Système axisymétrique bobine – pièce	70
Figure 3.18 – Iso-valeurs du potentiel vecteur magnétique.....	70
Figure 3.19- Diagramme d'impédance normalisée.....	71
Figure 3.20 - Diagramme d'impédance normalisée pour deux épaisseurs de revêtements.....	71
Figure 3.21 - Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré.....	72

Chapitre 4: Problème inverse des systèmes (CND-CF) Optimisé par essaim de particules (PSO)

Figure 4.1 – Schéma d'étude général d'un problème inverse.....	75
Figure 4.2 – Schéma fonctionnel d'un système de CND.....	77
Figure 4.3 - Algorithme itératif de minimisation de fonction objectif.....	77

Liste des figures

Figure 4.4 – Inversion du modèle direct.....	78
Figure 4.5 – Schéma d'un processus itératif d'inversion.....	78
Figure 4.6 Principales méthodes déterministes.....	80
Figure 4.7 Principales méthodes stochastiques.....	80
Figure 4.8 Classification de la méthode métaheuristiques.....	81
Figure 4.9 Cartographie entre neurones biologiques et formels.....	82
Figure. 4.10 :Architecture d'un neurone formel [57].....	82
Figure 4.11 :Exemple de fonctions d'activations [58].....	83
Figure 4.12 Réseau MLP avec deux couches cachées.....	83
Figure 4.13 Organigramme de l'entraînement du réseau de neurones.....	84
Figure 4.14 Schéma du principe de la méthode de Nelder Mead.....	85
Figure 4.15 : Topologies de voisinage.....	89
Figure 4.16 : Organigramme de l'algorithme à essaim de particules.....	90
Figure 4.17 : Calcul de la dimension particulière moyenne pour N particules [8].	93
Figure 4.18 : Modèle d'étude.....	96
Figure 4.19 Maillage du domaine de résolution.....	96
Figure 4.20 Lignes du potentiel vecteur magnétique.....	97
Figure 4.21 Densité de puissance dans la pièce.....	97
Figure 4.22 Lignes du potentiel vecteur magnétique.....	97
Figure 4.23 Densité de puissance dans la pièce.....	97
Figure 4.24 La chute de la fonction objectif avec les itérations.....	98
Figure 4.25 L'évolution de la conductivité électrique avec les itérations.....	98
Figure 4.26 La chute de la fonction objectif avec les itérations.....	99
Figure 4.27 L'évolution de l'épaisseur de la pièce avec les itérations.....	99
Figure 4.28 La chute de la fonction objectif avec les itérations.....	99
Figure 4.29 L'évolution de largeur de la pièce avec les itérations.....	99
Figure 4.30. Evaluation de ΔZ en fonction de déplacement.....	100
Figure 4.31 . Évaluation le Fic obtenu par PSO et celui obtenu par méthode analytique.	101

Chapitre 5: Applications et Discussion des Résultats

Figure5.1. System tube avec une fissure	105
Figure 5.2 Modèle de présentation	105
Figure 5.3 Maillage en 3D de tube cylindrique.....	105
Figure 5.4 Représentation du potentiel vecteur magnétique.....	105
Figure 5.5 Le champ magnétique	105
Figure 5.6 La densité de courant résultante JX	106
Figure 5.7 La densité de courant résultante JY	106
Figure 5.8 La densité de courant résultante JZ	106
Figure 5.9 La densité de courant résultante N.....	106
Figure 5.10 La densité vs fissure	106
Figure 5.11 Le champ magnétique vs fissure	106

Liste des figures

Figure 5.12 La densité vs Propagation de fissure.....	107
Figure 5.13 Le champ magnétique vs Propagation de fissure.....	107
Figure 5.14 Impédance Z vs largeur de fissure	108
Figure 5.15 Impédance Z vs profondeur de fissure.....	108
Figure 5.16.a : Variation des contraintes en fonction de la longueur de la fissure.	108
Figure 5.16 .b: Variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la variation d'angle de propagation.....	108
Figure 5.17.a : Variation des contraintes en fonction de l'angle de propagation..	109
Figure 5.17 .b: Variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la variation d'angle de propagation.....	109
Figure 5.18.a : Variation des contraintes en fonction d'angle... ..	110
Figure 5.18 .b: Variation de facteur de concentration de contraintes en fonction d'angle.....	110
Figure 5.19 Calcul de FIC à largeur de la fissure en Mode I.....	111
Figure 5.20 : FIC par variation de l'impédance, J-Intégral et méthode théorique ($\sigma = 230\text{N/mm}$).....	111
Figure 5.21 Le champ de déplacement U_{xx} au bord fissure.....	112
Figure 5.22 Le champ de déplacement U_{yy} au bord fissure	112
Figure 5.23 Représentation le champs des contraintes σ_{xx} (N/mm^2).....	112
Figure 5.24 Représentation le champs des contraintes σ_{yy} (N/mm^2).....	112
Figure 5.25 Déplacement et vitesse d'un particule (i)	113
Figure 5.26 Application de courants de Foucault FC.....	115
Figure 5.27 Modèle axisymétrique du pipe testé utilisant un capteur absolu.....	115
Figure 5.28 Les graphes de la fonction objectif en fonction de nombre de génération.....	117
Figure 5.29 Résultat global du PSO pour chaque itération.....	118
Figure 5.30 : Fitness personnel des particules pour chaque itération.....	120
Figure 5.31 : Estimation de Angle de fissure des particules pour chaque itération	120
Figure 5.32 Effet du nombre d'itérations sur la fonction d'objectif.....	121

Liste des Tableaux

Chapitre 1 : Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

Tableau 1.1 - Comparaison des procédés de CND les plus connus 14

Chapitre 3 : Méthodes de Résolution des Problèmes CND-CF par la méthode des éléments finis

Tableau 3.1 – Avantages et inconvénients des formulations en potentiels 51

Chapitre 4: Problème inverse des systèmes (CND-CF) Optimisé par essaim de particules (PSO)

Tableau (4.1) : Variation de Z..... 98

Tableau (4.2) : Résultats obtenus par l'identification de la conductivité électrique 98

Tableau (4.3) : Résultats obtenus par l'identification de l'épaisseur de la pièce. 99

Tableau (4.4) : Résultats obtenus par l'identification de largeur de la pièce..... 100

Tableau (4.5). FIC obtenu par Intégral – J et celui obtenu par RN et méthode analytique 101

Chapitre 5: Applications et Discussion des Résultats

Tableau (5.1) : Les propriétés mécaniques et électriques du tube..... 104

Tableau (5.2) : Calcul de FIC par MN et Eddy current et par intégral de J..... 111

Tableau (5.3) : Attitude personnel des particules à chaque itération 119

Tableau (5.4) Attitude personnel pour meilleure solution des particules à chaque itération..... 119

Liste des Symboles

f	Fréquence
n	Nombre de spires
r	Rayon
s	Section
w	Energie des courants de Foucault
(x, Y, z)	Coordonnées cartésiennes
(r, z, θ)	Coordonnées cylindriques
A	Potentiel vecteur magnétique
B	Vecteur induction magnétique
E	Vecteur champ électrique
I	Intensité des courants
H	Vecteur champ magnétique
J	Vecteur densité de courant
J_s	Densité de courant imposé dans l'inducteur.
J_{ind}	Densité du courant induit.
R	Résistance électrique
P	Puissance active
T	Période
X	Réactance
Z	Impédance
V	Potentiel scalaire électrique
Δ	Profondeur de pénétration des courants de Foucault
φ	Potentiel magnétique total scalaire
Φ	Potentiel scalaire électrique
μ	Perméabilité absolue des matériaux
μ_0	Perméabilité du vide.
μ^r	Perméabilité relative du milieu considéré.
ρ	Résistivité des matériaux
σ	Conductivité des matériaux
ω	Pulsation des grandeurs électriques
ϵ_0	Permittivité de l'air.
ϵ_r	Permittivité relative du milieu considéré.
K_I	Facteur d'intensité de contrainte en mode I
K_{II}	Facteur d'intensité de contrainte en mode II
σ_{ij}	Tenseur de contraintes et de déformations
ϵ_{ij}	Tenseur de déformations
W	Densité d'énergie de déformations
E^*	Module de Young
ν	Coefficient de Poisson
J	Intégrale de contour
κ	Constante de Kolosov
λ, μ	Coefficients de Lamé

INTRUDUCTION GENERALE

La conception de nouvelles configurations et l'optimisation de ces nouveaux dispositifs de CND par courants de Foucault demande une modélisation fine des phénomènes physiques mis en jeu tant au sein de l'échantillon étudié qu'à sa surface. La simulation du CND permet ainsi de répondre aux exigences industrielles croissantes en intervenant lors des phases de conception, de qualification et d'utilisation d'une méthode de CND [1-2]. Tout l'intérêt du contrôle par courant de Foucault est la simplicité de sa mise en œuvre, sa robustesse et sa sensibilité aux défauts type manque de matière (fissures, inclusion, corrosion....), en effet les capteurs utilisés pour ce genre de contrôle sont de simples bobines qui génèrent un champ magnétique pour induire des courants dans les pièces à contrôler, ce qui s'avère idéale pour des pièces métalliques conductrices d'électricité même dans le cas où elles présentent une géométrie complexe [9 - 13].

Dans ce travail de recherche, nous proposons la technique non destructive comme moyen de contrôle des fissures ou des défauts dans les matériaux. Pour cela, une simulation par une approche numérique telle que les éléments finis du contrôle non destructif en utilisant les courants de Foucault est la mieux indiquée pour la détection des fissures et éventuellement l'étude de leur propagation. Cette approche concernant le contrôle des fissures est principalement utilisée dans l'industrie aéronautique. Elle permet de mettre en évidence les défauts de pièces tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Elle met en évidence la fiabilité du contrôle des défauts et donne des résultats probants pour l'amélioration de la qualité et de la sécurité des matériaux [5 - 6].

L'objectif de ce travail est basé sur l'utilisation de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) et l'analyse par la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre le problème inverse rencontré dans la détection des fissures. L'approche est utilisée pour identifier les objets métalliques inconnus et détecter les fissures internes et externes. La méthodologie en elle-même consiste à simuler les signaux de réponse du détecteur sur l'influence des variations des paramètres physiques et géométriques des objets métalliques enfouis par la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus sont utilisés pour générer une base d'apprentissage d'une technique de Eddy Current et l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) [13 - 18].

INTRUDUCTION GENERALE

Le PSO est basée sur une recherche probabiliste d'une population de particules, inspirée du comportement social d'une volée d'oiseaux ; PSO recherche la solution optimale au moyen de générations MAJ . Le PSO est une méthode de calcul qui optimise un problème en améliorant les solutions candidates.

Divers domaines englobent l'optimisation car son objectif est d'améliorer le fonctionnement en gérant plus efficacement les ressources. La réalisation de l'optimisation jusqu'à son achèvement est encouragée, mais elle peut survenir à tout moment. Aujourd'hui, l'optimisation dispose d'une vaste application dans différentes branches de la science, par exemple : contrôle, robotique, aérodynamisme, consommation d'énergie,etc. Proposés pour résoudre des problèmes complexes et hautement non linéaires, les algorithmes métaheuristiques sont établis comme des algorithmes standards qui n'exigent pas de modifications substantielles pour chaque problème spécifique.

Les métaheuristiques ont de nombreux avantages mais aussi des inconvénients. [13 - 18].

Les caractéristiques distinctives de ces techniques sont résumées ci-dessous :

- Il est possible d'appliquer ces techniques à une variété de problèmes..
- Résolution efficace de nombreux problèmes.
- Il est possible d'équilibrer la qualité des solutions et le temps de calcul.
- Les paramètres doivent être ajustés.
- Prévoir les performances est une tâche difficile.

Elle est basée sur la façon d'un PSO se déplace pour trouver de la nourriture. Elle produit un essaim de particules dont chaque composant peut être utilisé comme solution potentielle au problème d'optimisation.

Ainsi, chaque particule possède une mémoire contenant des informations sur son vol (meilleure solution au problème t.q position, et vitesse), et elle possède également la capacité de communiquer (ou socialiser) avec son environnement. [10]

Cette thèse est structurée principalement en cinq chapitres afin de faciliter l'accès du lecteur aux informations présentées dans le manuscrit.

Le premier chapitre sera dédié à une présentation des différentes techniques de contrôle non destructif, leurs avantages et inconvénients, où la technique des courants de Foucault sera utilisée à cause de sa simplicité et de son coût réduit, ainsi qu'un aperçu sur les différents capteurs utilisés.

INTRUDUCTION GENERALE

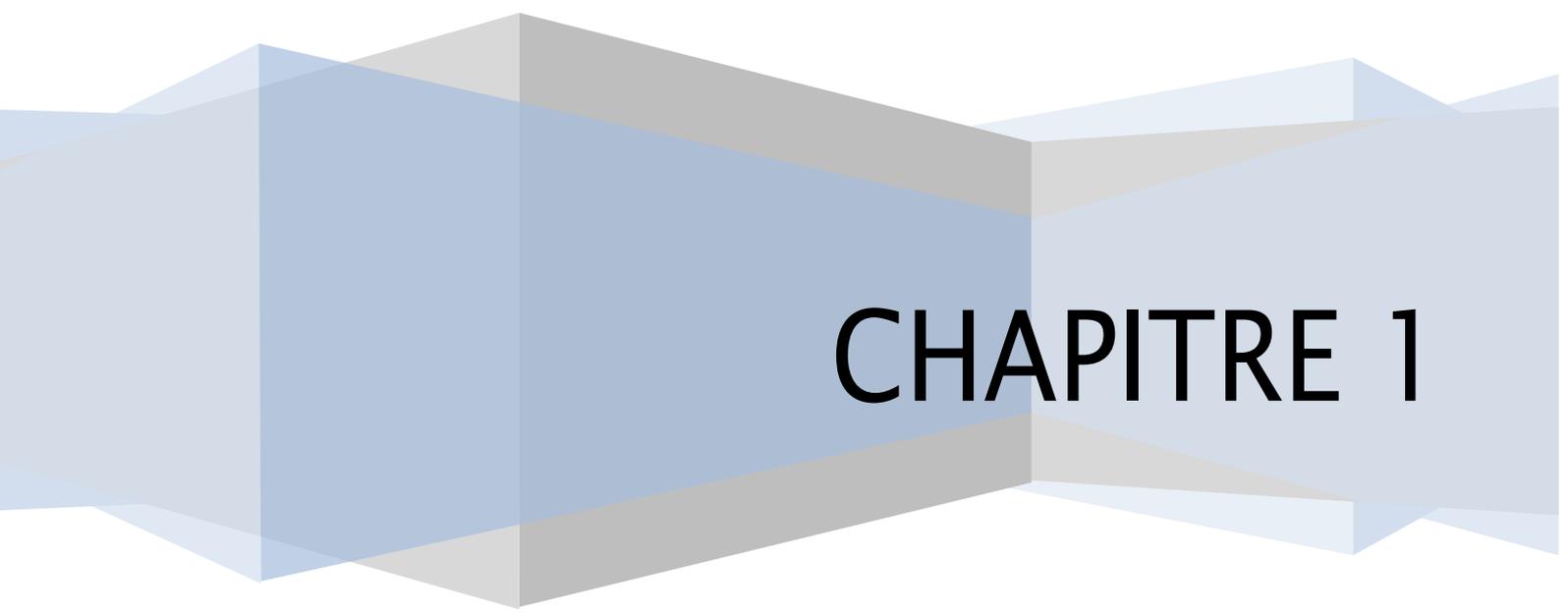
Le deuxième chapitre dédié aux principes les plus importants de la mécanique de la rupture tout en se concentrant sur l'importance de l'orientation des fissures. MDR et au FIC par les méthodes de l'extrapolation de déplacement et de l'intégral d'interaction.

Le troisième chapitre dédié aux principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équations de Maxwell) et fera l'objet d'un exposé sur les méthodes des résolutions des équations différentielles. Cette dernière est utilisée dans cette thèse pour résoudre les problèmes CND-CF par la méthode des éléments finis sous l'environnement MATLAB.

Le quatrième chapitre est destiné principalement aux simulations de déplacement sur pièce comportant une fissure. Pour ce réaliser une difficulté inverse à été résolu de l'optimisation par essaim de particule (PSO) dont la fonction d'activation est a été exploitée dans cette partie.

Quant au cinquième chapitre, nous présentons l'estimation des paramètres de MDR pour la détection de l'orientation de la fissure. Pour cette raison, nous avons proposé une approche inverse pour détecter l'orientation de la fissure dans un modèle axisymétrique basé sur l'algorithme (PSO). Dans le cas du problème direct, un modèle axisymétrique d'une tube cylindrique testée à l'aide d'un capteur absolu a été simulé. Ensuite, un modèle 3D d'une plaque, scannée à l'aide d'une bobine multi-tours, a permis d'étudier l'influence de l'orientation des fissures sur les composants du courant de Foucault et la densité de flux magnétique.

En fin, nous proposons une méthode alternative basée sur PSO pour traiter le problème inverse du modèle axisymétrique en utilisant des contrôle non destructifs (courants de Foucault). L'approche proposée nous permet de trouver et même de prédire l'orientation des fissures cachées en utilisant les valeurs mesurées de l'impédance du système.



CHAPITRE 1

Chapitre 1

Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

1.1 Introduction:

Les essais non destructifs sont largement utilisés dans les industries pétrolière, nucléaire et automobile, car la rupture des tiges de forage, des tubages et des tuyaux de production peut avoir de graves conséquences. Tout en mettant en évidence les défauts, le contrôle non destructif (CND) protège l'intégrité des produits contrôlés. Pour être plus précis, puis pour garantir que les pièces et les ensembles fabriqués sont en bon état de fonctionnement, en termes de maintenance, elles sont également très appréciées. [1]

Depuis l'avancement de la technologie apportée aux appareils de mesure, les systèmes de contrôle par courants de Foucault se sont développés rapidement, avec un développement important de l'informatique dans le domaine des CND [2].

Les techniques de contrôle non destructif (CND) établissent l'état d'intégrité d'une structure, connue sous le nom de structure « cible », sans la détériorer. De nombreuses industries, y compris les secteurs nucléaire et aéronautique, utilisent ces méthodes pour des raisons de sécurité et économiques. [2]

En 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 la 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. [3]

La compréhension de la mécanique de rupture des matériaux causée par ce type de défauts nécessite une connaissance des grandeurs du défaut [8]. Par conséquent, une caractérisation des défauts plus quantitative que qualitative est très demandée.

Le premier chapitre introduira d'abord les méthodes électromagnétiques du CND. Après cela, nous aborderons les différentes méthodes de CND par CF, ainsi que les concepts fondamentaux sur les capteurs inductifs à courants de Foucault, y compris leurs principes, leurs géométries et leurs circuits magnétiques. Enfin, nous arriverons à une conclusion.

1.2. Divers techniques de contrôle non destructif et conceptions généraux :

Différentes techniques de CND sont utilisées : (radiographie, ultrasons, ressuage, thermographie, courants de Foucault).

Ces approches rançonnent des événements différents et sont généralement additionnels.

Plusieurs facteurs savent exécuter le choix d'un d'entre eux, les principaux étant [3] :

- ✓ La nature du matériau à tester (propriétés physiques) ;

- ✓ L'information recherchée (détection d'erreur, mesure, dimensionnement, etc.);
- ✓ Cadre de contrôle (source de perturbations externes, etc.) ;
- ✓ Le type de contrôle à effectuer (pièce mobile, possibilité de contact ou non, ...etc.) ;
- ✓ Contraintes économiques.

Ces techniques utilisent divers phénomènes et sont souvent complémentaires. La méthode à utiliser dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du sort de test à réaliser et des circonstances dans lesquelles le test doit être réalisé. Pour la majorité des ces techniques, les procédures d'acquisition ont été automatisées, ce qui a permis le stockage et le traitement numérique d'une grande quantité de CND [1]. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND.[4] Ces méthodes vont des simples inspections visuelles aux systèmes complexes tels que la radiographie, en passant par les techniques hybrides combinant plusieurs méthodes (ultrasons, laser, transducteur électromagnétique-acoustique (EMAT), thérapie photo-thermique, magnéto-optique, etc.). Notre objectif ici n'est pas de présenter de manière exhaustive toutes les techniques CND existantes, mais de passer en revue les techniques les plus traditionnelles afin de mieux positionner nos travaux.. [4]

1.2.1 Procédés optiques :

Dans le processus de contrôle non destructif, l'inspection visuelle est une méthode importante. L'état extérieur d'une pièce peut fournir des informations importantes sur son état, telles que les défauts visibles tels que les plis, les ruptures, l'usure, la corrosion ou les fissures ouvertes. Le principe de l'inspection visuelle est illustré à la figure (1.1) : indique une anomalie interne plus grave [10].

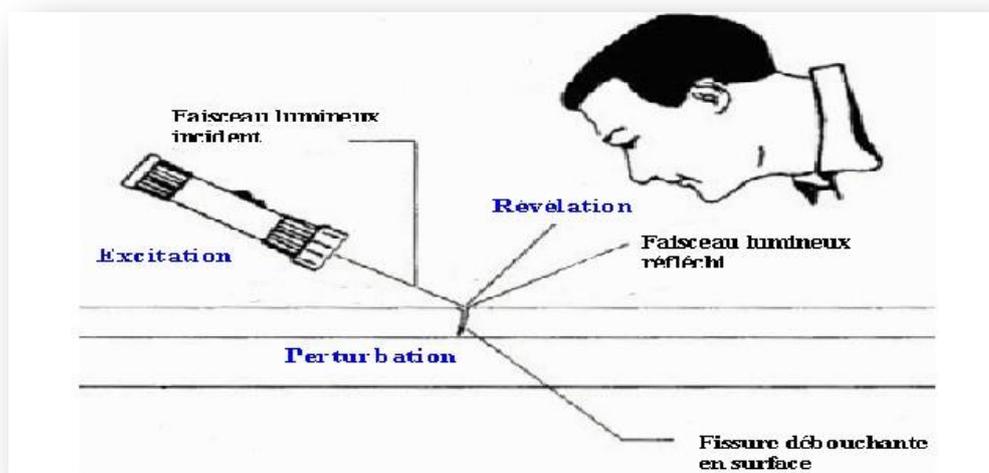


Figure 1. 1 L'examen visuel.

1.2.2 Ressuage:

Le major inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut être utilisée que pour les failles nouvellement découvertes. De addition, un décapage préalable de la surface à inspecter est nécessaire. Les opérateurs doivent avoir une grande expertise et tenir compte de leurs points de vue lors des tests.. Enfin, les tests d'intrusion posent de nombreux problèmes de santé et de sécurité du fait de l'utilisation de produits contaminés, notamment dans certains cas (centrales nucléaires) où ils peuvent être contaminés. [1] Elle consiste à pénétrer la fissure naissante avec un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; puis à inspecter visuellement la pièce, le principe de la méthode est illustré à la Figure (1.2), [8].

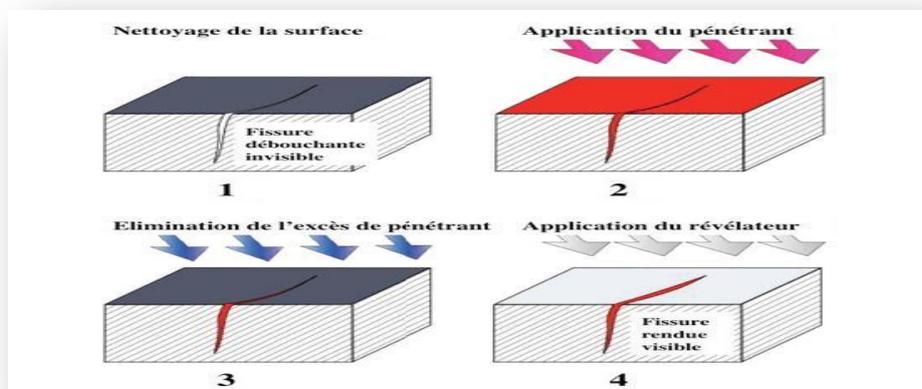


Figure 1.2 Principe de la méthode de ressuage.

Les étapes successives des tests par ressuage sont les suivantes : [16]

- ✓ Nettoyer soigneusement la pièce ;
- ✓ Utiliser des produits colorés ou fluorescents dits pénétrants, par trempage ou pulvérisation, suivi d'un temps de trempage ;
- ✓ Eliminer l'excès de pénétrant ;
- ✓ Application de révélateur, qui peut être sous forme liquide ou en poudre, le pénétrant s'accumule dans les fissures, se répand et crée une image que l'inspecteur peut interpréter.

1.2.2.1 Champ d'application

Le ressuage, un processus simple d'utilisation et capable de détecter la majorité des défauts de surface dans les matériaux non poreux (tels que les métalliques, les plastiques, les matériaux composites), etc., a un large éventail d'applications. [12 .11.23]

1.2.2.2 Avantages et inconvénients

a) Avantages

- ✓ Peut être réalisé sur tous types de matériaux non perméables.
- ✓ L'approche holistique autorise l'inspection de toute la surface de la pièce, l'orientation du défaut n'a aucun effet ;
- ✓ La méthode peut être coûteuse ;
- ✓ Facile à appliquer (pour les pénétrants pré-émulsionnés).

b) Inconvénients

- ✓ Doit être soigneusement décapé et dégraissé avant l'inspection ;
- ✓ Les résultats d'inspection sont subjectifs : la taille exacte du défaut ne peut être déterminée ;
- ✓ L'inspection finale est visuelle ;
- ✓ Opérations mécaniques telles que épluchage, meulage, usinage, polissage. Ont tendance à fermer les fissures (fissures), ouvertes en enduisant les matériaux de surface [16].

1.2.3 Flux de fuite magnétique :

Les fuites magnétiques sont alors détectées au niveau des discontinuités de surface par un indicateur (poudre de fer ou d'oxyde de fer) préalablement déposé sur la surface de la pièce [17]. Le flux de fuite est généré localement. Ils sont alors généralement visualisés à l'aide d'un produit indicateur à limaille de fer (miroir magnétique) ou à l'aide d'un film magnétisable (magnétisme) ou à l'aide d'un appareil de mesure de champ magnétique, le principe de la méthode est représenté sur la figure (1.3),[32].

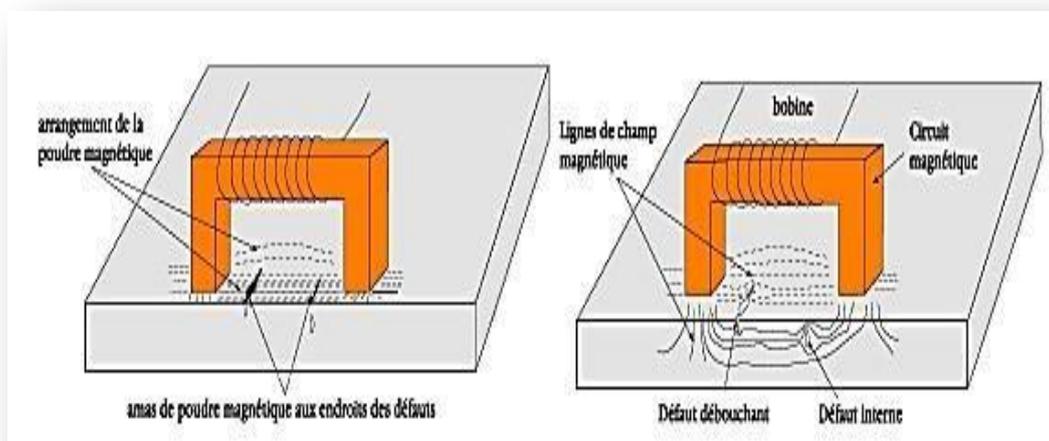


Figure 1.3 : Contrôle par magnétoscopie.

1.2.3.1 Champ d'application

L'inspection des fuites de flux (inspection par particules magnétiques et mesure directe du flux magnétique) s'est avérée inégalée dans sa sensibilité pour détecter des défauts de surface très fins. Son périmètre recouvre trois grandes familles : [19]

- ✓ Le contrôle des composants de série provenant de forages et d'usinages. Les vérifications sont effectuées sur une machine immobile, généralement sous une lumière noire.

- ✓ Contrôler des pièces telles que des billettes, des barres rondes ou convexes, des cylindres. [24]

1.2.3.2 Avantages et inconvénients

a) Avantages

- ✓ Les défauts sous-jacents peuvent être détectés (de 1 à 2 mm à partie de la surface) ;
- ✓ Ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure : longueur minimale 0.5mm, largeur 1 mm ;
- ✓ Même les fentes (craquements) couvertes de matière étrangère peuvent être identifiées.
- ✓ offre des détails sur la profondeur de première classe ;
- ✓ Il peut être coûteux.
- ✓ Il est adapté avec succès à l'automatisation.

b) Inconvénients

- ✓ La technique de contrôle ne concerne que les alliages susceptibles de perdre leur magnétisme (aciers magnétisables).
- ✓ Il ne détecte que les fissures superficielles et les fentes proches de la surface.
- ✓ Problèmes d'hygiène et de sécurité. La surface doit être nettoyée et séchée afin de maximiser la sensibilité.
- ✓ Il est capable de chauffer et de brûler des composants fortement finies dans les sites de contact électriques. [39]

1.2.4 Radiographie:

La radiographie elle consiste à faire passer des rayonnements électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde, comme les rayons X ou les rayons gamma, à travers le matériau à

examiner. En passant à l'intérieur de la pièce, l'énergie du photon, selon la densité du matériau. Il récupère ainsi des radiographies où les zones défectueuses sont représentées par des changements de densité optique. La figure (1.4) montre le principe des radiographies [31].

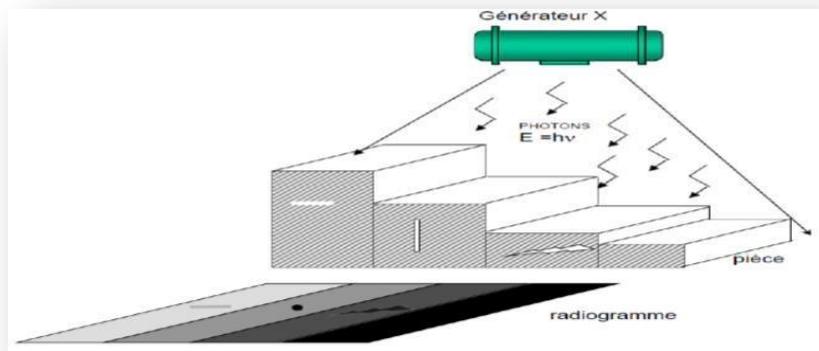


Figure 1.4 : Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.

Selon ses principes, la radiographie ne renseigne pas sur la localisation des défauts profonds de la pièce inspectée. Il s'agit d'utiliser des algorithmes sophistiqués pour reconstruire une partie d'une pièce à partir d'acquisitions successives sous différents angles. La répétition du processus à différentes hauteurs de lancement produit une image 3D virtuelle complète de l'objet [41]

1.2.4.1 Champ d'application

La radiographie a un large éventail d'utilisations. C'est la méthode utilisée pour mettre en évidence et dimensionner les hétérogénéités dans les objets, à la fois lors de la fabrication .

1.2.4.2 Avantages et inconvénients [7]

a) **Avantages**

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

b) **Inconvénients**

- ✓ Réglementations souvent contraignantes (transport et stockage des sources).

1.2.5 Thermographie :

La thermographie implique l'analyse des thermo-grammes des surfaces observées. La thermographie passive est produite en observant simplement les gradients thermiques à travers la pièce, tandis que la thermographie active est produite lorsque des perturbations thermiques sont intentionnellement induites à des fins de contrôle, comme par une source laser. Les discontinuités de la pièce entraînent des différences dans les images de température. L'acquisition des images thermiques est alors obtenue à l'aide d'une caméra thermique, la figure suivante donne un aperçu du schéma de principe [1.5],10].

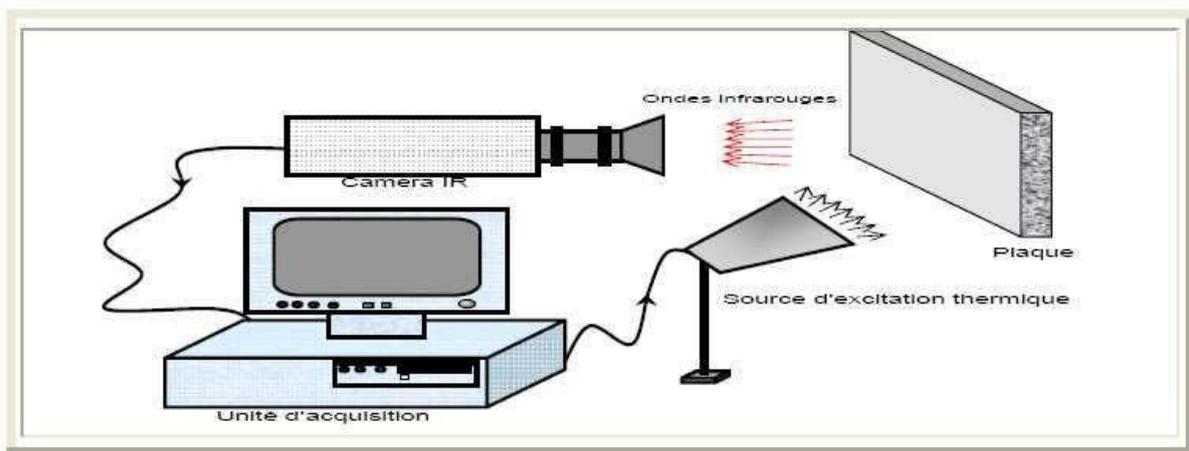


Figure 1.5 : Principe thermographie.

1.2.5.1 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).

1.2.5.2 Avantages et inconvénients [9]

a) Avantages

- ✓ Il permet des mesures à distance et facilement adaptable aux besoins.
- ✓ Il peut être utilisé avec de nombreux type d'échantillons, tels que les métalliques, les diélectriques, les semi-conducteurs, les massifs ou les composites.

b) Inconvénients

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

1.2.6 Ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent à travers la matière. Le principe consiste à utiliser un transducteur pour émettre des ondes ultrasonores qui se propagent dans la zone à inspecter et reflètent les obstacles rencontrés, tels que les défauts ou les limites de la zone, comme un écho [43]. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire à l'onde émise, comme le montre la figure (1.6), [12].

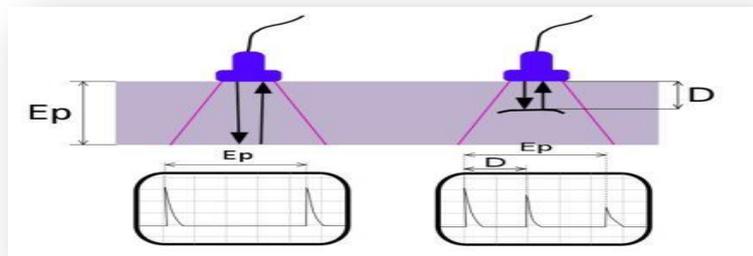


Figure I.6 : Principe des ultrasons.

1.2.6.1 Champ d'application

L'échographie peut également être utilisée pour l'imagerie. Ces techniques d'imagerie par ultrasons sont également largement utilisées pour mesurer l'épaisseur et, plus récemment, pour évaluer certains paramètres métallurgiques tels que la taille des grains, les textures, les profondeurs de traitement thermochimique de la surface de l'acier et enfin les contraintes mécaniques. [25-9].

1.2.6.2 Avantages et inconvénients [4.9]**a) Avantages**

- ✓ Équipements qui peuvent être transportés ;
- ✓ Appareil très vulnérable aux déformations.
- ✓ Résultats instantanés ;
- ✓ Il n'y a pas de problèmes de sécurité entièrement.
- ✓ La profondeur de pénétration est élevée.
- ✓ Il est capable de réaliser des tests sur des composants ayant des formes complexes.
- ✓ Examiner tous les matériaux.

b) Inconvénients

- ✓ Examiner attentivement la nature et l'orientation des défauts.
- ✓ Ils sont soumis à un montage pièce traducteur.
- ✓ Pour que l'opération fonctionne correctement, une huile or un gel de couplage est nécessaire [16].

1.2.7 CND par courants de Foucault

Le domaine du CND utilisée largement les techniques électromagnétiques, en particulier les techniques à courants de Foucault (CF). Cette technique peut être utilisée pour tous les matériaux conducteurs d'électricité. Des courants induits, connu sous le nom de "courants de Foucault" (physicien français 1819-1868) parcourent alors cette zone, comme l'indique la figure (1.7).



Figure 1.7 : Jean Bernard Léon Foucault.

Le système se compose donc d'une source électromagnétique, d'un capteur et d'un dispositif qui traite les informations recueillies et dont le rôle est de caractériser l'intrus, comme le montre la figure 1.8, [18].

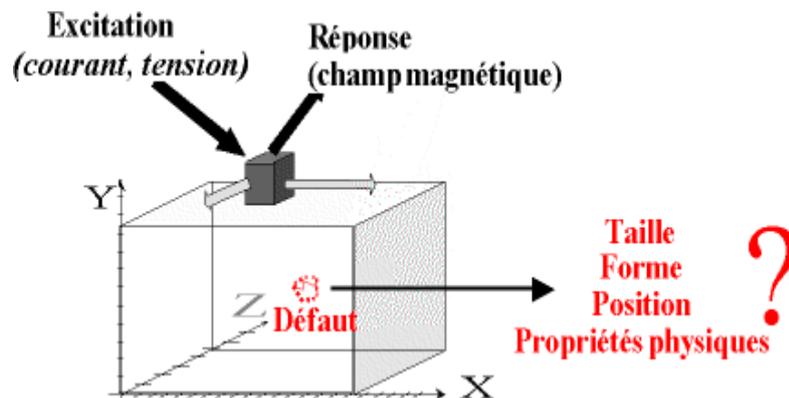


Figure 1.8 : Principe CND.

➤ *Principe de progression du CND par courants de Foucault*

L'une des méthodes électromagnétiques de CND est le contrôle par courant de Foucault. Cette technique ne peut être utilisée qu'avec des pièces électriquement conductrices et fonctionne bien avec des pièces cylindriques telles que des barres, des tubes, etc. [15]. Un champ magnétique créé par ces courants sera opposé au champ initial d'excitation (loi de Lenz), et le champ magnétique résultant sera fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible. La cible pourra être caractérisée par une mesure directe de ce champ ou d'une de ses grandeurs dérivées (tension, impédance...etc.). Un aperçu du principe est fourni dans la figure 1.9, avec les numéros [6],[7],[13],[15] et [18].

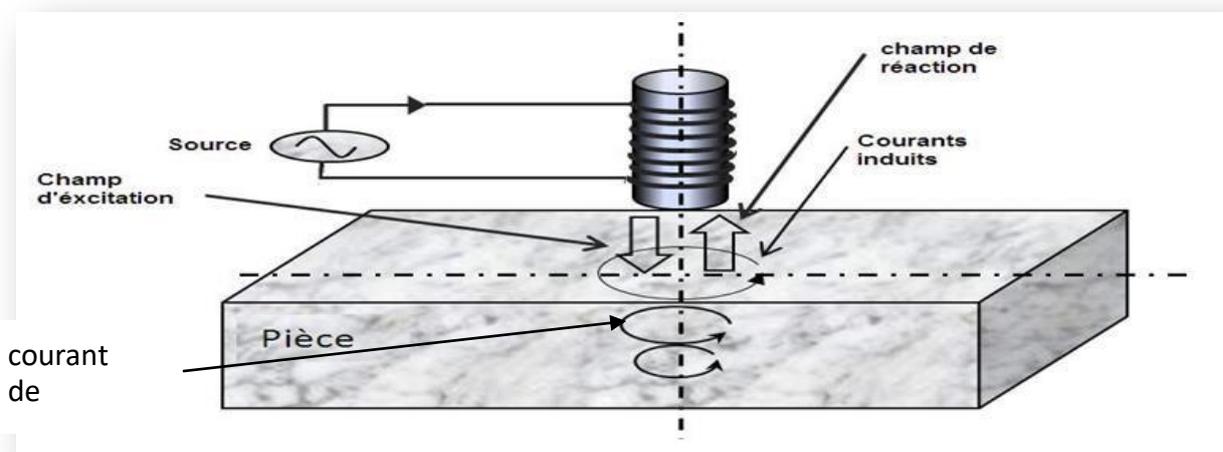


Figure 1.9 : Principe CND par courants de Foucault.

Comme le montre la figure 1.10, toute imperfection du composant testé modifie le trajet des courants de Foucault et par conséquent l'impédance de la bobine. Les changements d'impédance d'enroulement causés par des défauts sont généralement très faibles par rapport aux défauts d'impédance d'un cas innocent. De addition, divers facteurs influencent le signal, y compris la conductivité électrique, la perméabilité, le pitch, la fréquence et d'autres facteurs [1.6].

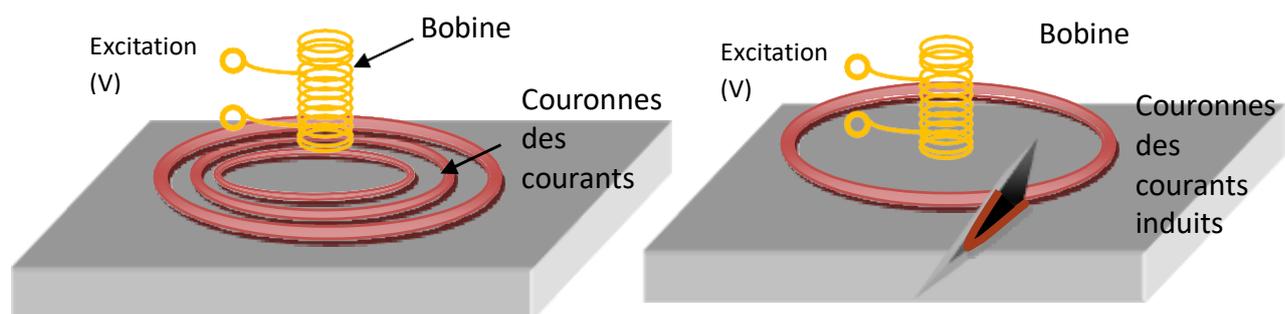


Figure 1.10 : Chemin des courants de Foucault.

➤ *Synthèse comparative des méthodes utilisées en CND*

Le tableau 1.1 donne un aperçu global des différents procédés les plus utilisés en CND, principe avantage et inconvénient:

Tableau 1. 1 -Comparaison des procédés de CND les plus connus

Procédé	Principe physique	Défauts détectés	Domaines d'application	Principale avantages	Principale inconvénients
Visuel	Vision direct ou assistée des défauts	Détection des défauts superficiels et aspect	Contrôle industriel en ligne, bandes de tôle, verre,	Simple et il peut être assisté par un réseau de caméra,	Limitation de la vision humaine,
Ressuage	Imprégnation, nettoyage de surface, application d'un révélateur	Détection de défauts superficiels	Applicable à tous les matériaux non poreux	Simple à mettre en œuvre, application globale	Examen lent, d'où coût élevé,
Flux de fuite magnétique	Accumulation de poudre	Défauts débouchant fins	Matériaux ferromagnétiques (aciers)	Très sensible	Applicable uniquement aux matériaux Ferromagnétiques
Ultrasons	Perturbation d'une onde	Défauts internes	Tous les matériaux, même en domaine médical	Inspection en profondeur, résultats immédiats	Coûteuse, difficile pour les très petites pièces
Radiographie	Atténuation d'un flux de rayons X ou γ	Défauts internes	Tous les matériaux	Fiabilité, profondeur importante d'examen, résultats archivables	Protection du personnel, coût élevé, interprétation difficile
Courants de Foucault	Perturbation des courants induits	Défauts débouchant ou sous cutanés	Applicable aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques	Sensible, sans contact,	Valable aux matériaux conducteurs, difficile à automatiser

1.2.7.1 Effet de peau

Ce phénomène se produit dans tous les matériaux conducteurs exposés à des courants alternatifs ou à des champs électromagnétiques variables dans le temps. A partir de la surface donnée par [6.14] .

$$j(z) = j_z \exp\left(\frac{-z}{\delta}\right) = j_s \left(\frac{-z}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}\right) \tag{1.1}$$

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

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \tag{1.2}$$

Avec :

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

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

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau. On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur, comme l'indique des figure (1.11),(1.12).

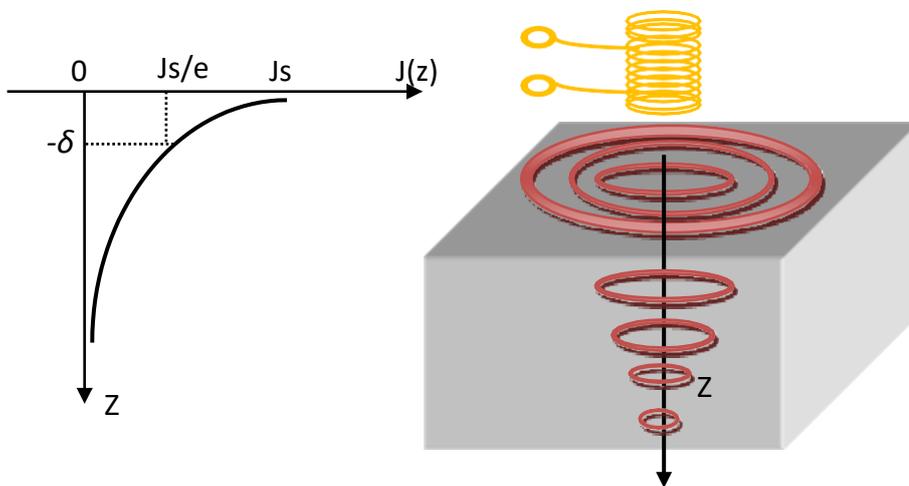


Figure 1.11 : répartition des courants de Foucault pour une pièce.

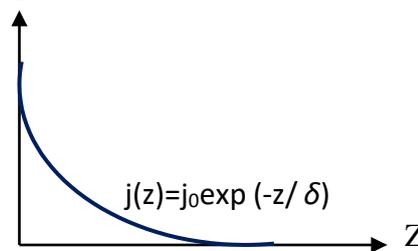


Figure 1.12 : Effet de peau.

1.2.7.2 Différents modèles de sondes

Il existe de nombreuses façons de mettre en œuvre des enroulements pour obtenir un contrôle des courants de Foucault. Voici une configuration de base qui vous permet d'envisager d'autres assemblages. [15]

a) Sonde à double fonctions

La calcul de l'impédance permet l'exploitation en régime sinusoïdal, montre de la figure (1.13),[16].

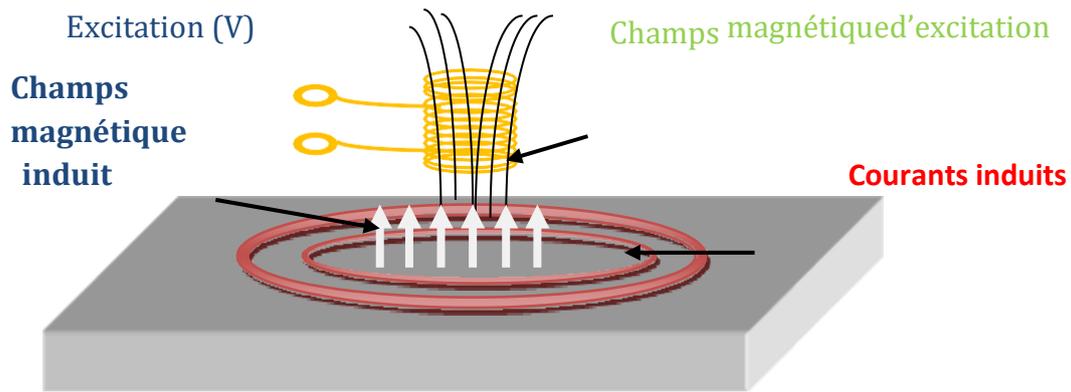


Figure 1.13: sonde à double fonctions.

b) Sonde à fonctions séparées

Les fonctions d'envoi et de réception sont gérées par des éléments distincts. La réception peut se produire à des endroits autres que l'emplacement de l'émetteur, figure(1.14),[3].

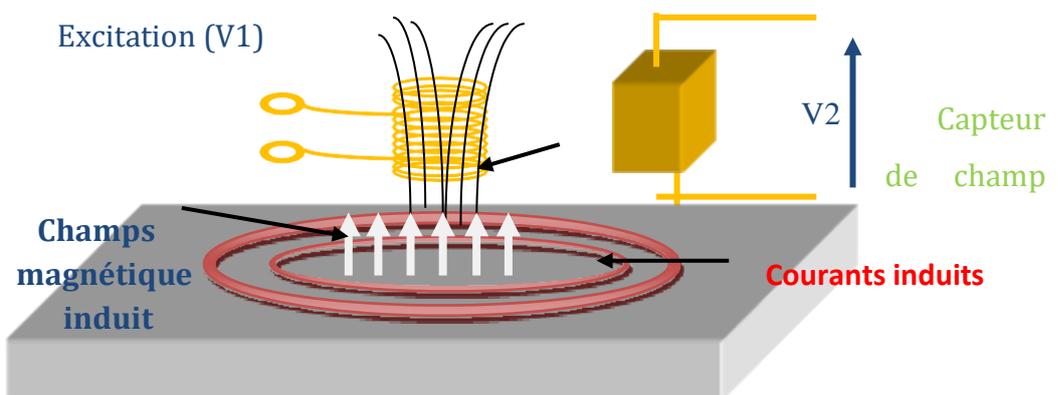


Figure 1.14 : sonde à fonction séparées.

c) Sonde différentielle :

Une sonde en mode différentiel est un système conçu pour détecter uniquement les variations locales des propriétés du produit étudié en modifiant de façon permanente. La sonde est constituée de deux enroulements identiques dont la différence d'impédance est mesurée (Fig. 1.15). Une mesure de différence correspond à la comparaison de deux mesures effectuées simultanément à deux endroits adjacents. [17].

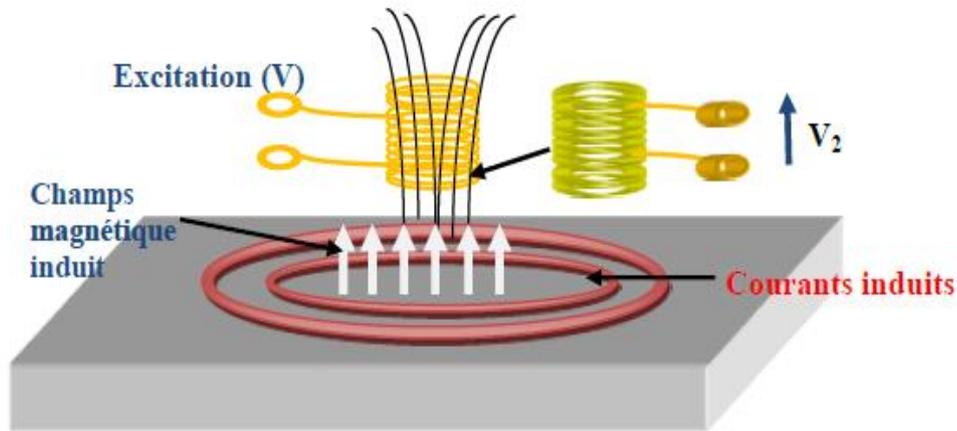


Figure 1.15: sonde différentielle.

1.2.8 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault

1.2.8.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif de collecte d'informations qui produit à partir d'une quantité physique (information d'entrée) une autre quantité physique d'un type différent, généralement de l'électricité. Ce volume représente le volume de l'échantillon et peut être utilisé à des fins de mesure ou de contrôle descriptif, [24].

1.2.8.2 Classification des capteurs

Le capteur est une bobine utilisée pour créer des courants de Foucault et enregistrer leurs effets. En fonction de l'application, la forme, l'emplacement par rapport au matériau. Sa localisation, sa fonction et son mode de contrôle la classent en trois catégories [19].

Capteur caractérisé par sa position

➤ Capteurs enveloppant

La bobine Figure (1-17) est fixée et protégée à l'intérieur de la pièce moulée. Son diamètre intérieur n'est que légèrement supérieur au diamètre du produit afin de maintenir le facteur de remplissage aussi proche que possible de l'unité. [26].

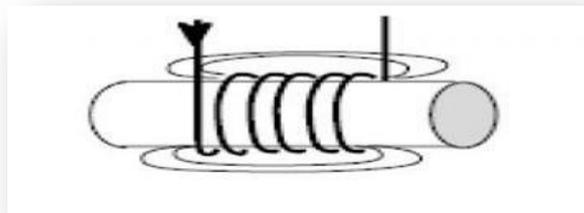


Figure 1. 17- Capteur encerclant.

➤ **Sonde interne**

Capteur pour l'inspection de produits creux de l'intérieur, avec un enroulement de mesure autour de l'axe de translation. Ils fonctionnent avec ou sans noyau (Figure 1.18), [27].

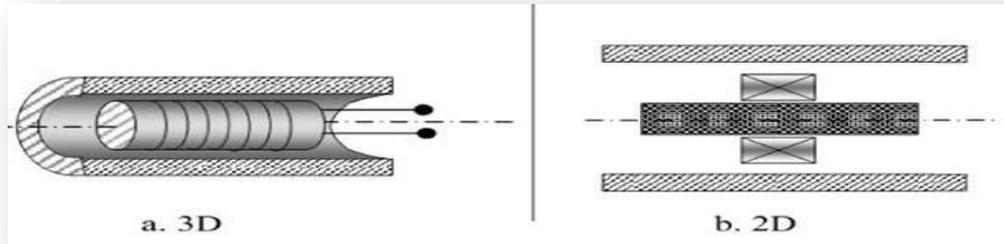


Figure 1.18- Bobine interne glissante avec noyau.

➤ **Sonde Plate**

Ce capteur fonctionne comme une bobine ponctuelle. Sa forme lui confère un rayon d'action plus large (Figure. 1.19), [15].

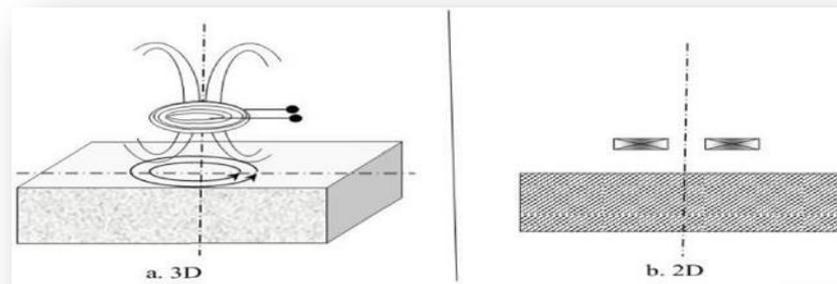


Figure 1.19 - Bobine plate.

➤ **Sonde interne tournante**

Cela produit un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tuyau. Ce capteur peut être utilisé pour repérer l'emplacement exact des défauts sur la surface interne du tube (Figure. 1.20), [10], [15].

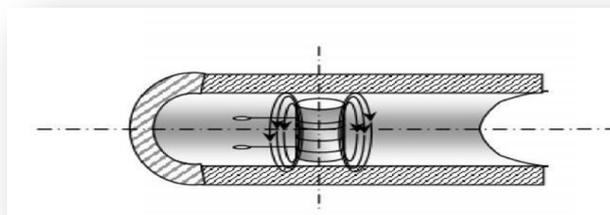


Figure 1.20- Capteur interne tournant.

Capteur caractérisé par sa fonction

➤ **Capteurs à double fonctions**

Il se compose d'une seule bobine d'émission et de réception à travers laquelle le courant produit un courant alternatif, sujet à des variations d'impédance qui peuvent être détectées par une mesure très précise du signal de sortie (Figure 1-21), [30].

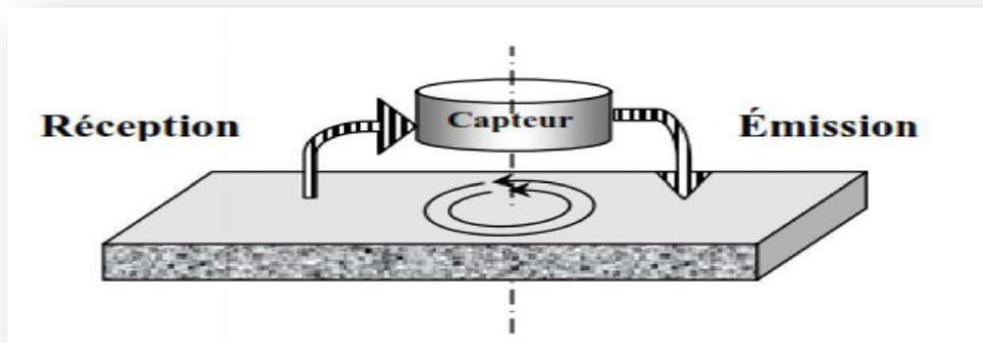


Figure 1. 21 -Capteur à double fonction.

Classification par mode de contrôle

Sur le plan fonctionnel, les sondes CF se divisent en deux classes principales basées sur la configuration de la bobine de détection. Modes absolu et différentiel [26]. Comme le montre la (Figure 1.22.a et 1.22.b), une sonde absolue se compose d'une bobine de réception, tandis qu'une sonde différentielle se compose de deux bobines de réception enroulées dans des directions opposées et connectées de manière différentielle.

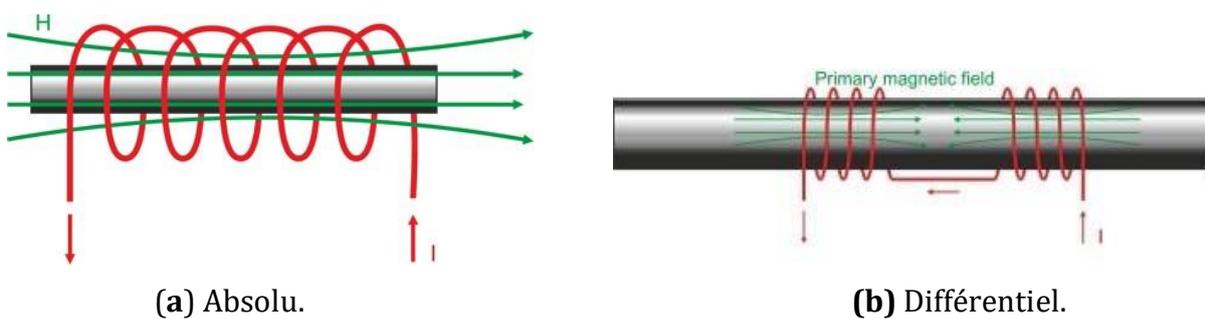


Figure 1. 22: Modes de fonctionnements.

1.2.8.3 Exemples de capteurs

Il existe différents types de capteurs en fonction de vos besoins. Par exemple: Capteurs de son, de lumière, de pression et de température, etc. La figure (1.23) montre quelques exemples de capteurs [5], [25].

- a : est un détecteur de fin de course,**
- b : est un détecteur de niveau de liquide,**
- c : est un détecteur d'humidité,**
- d : est un détecteur de choc,**
- e : est un détecteur de proximité à ultrasons**
- f : est un détecteur de gaz.**



Figure 1. 23- Quelques exemples de capteurs.

1.2.9 Plan d'impédance normalisée

Les entailles gênent la circulation des courants de Foucault dans la pièce (Figure 1.24) et modifient l'impédance du capteur inductif. En mesurant le changement d'impédance entre deux états de la pièce (intacte et fissurée), on peut représenter le paramètre d'intérêt.

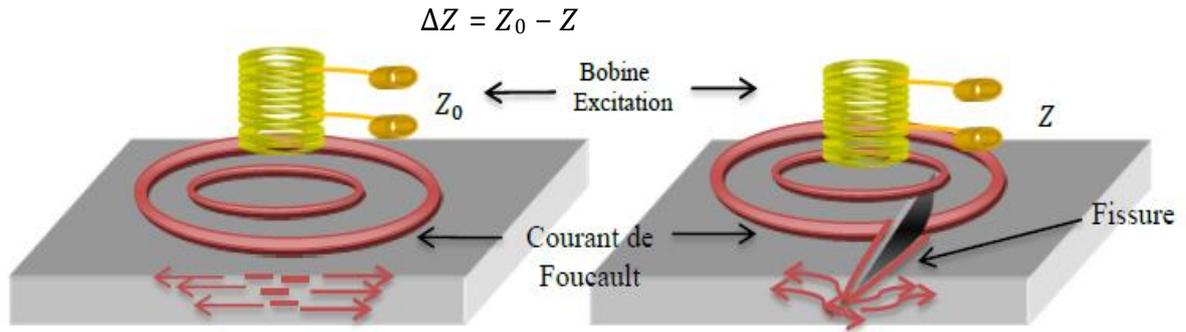


Figure 1.24 Mesure de la variation d'impédance du capteur.

Par conséquent, les capteurs inductifs sont généralement caractérisés par deux variables. [38.19]. La partie résistive (R) comprend les pertes dues aux courants de Foucault dus aux champs magnétiques pénétrant dans la cible et les pertes internes au bobinage d'excitation. Le terme inductif (X) représente la réactance de l'enroulement d'excitation par rapport à la cible. Topologie du magnétisme émis par les lignes de champ de la sonde :

$$Z = R + jX \tag{1.3}$$

On introduit la notion d'impédance normalisée Z_N qui se déduit de Z à l'aide de l'expression

$$Z_N = R_N + jX_N = \frac{Z - R_0}{X_0} \tag{1.4}$$

Où :

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \tag{1.5}$$

Z_0 : L'impédance à vide du capteur.

Sur le plan d'impédance (R_N, X_N).[20]. La figure 1.25 montre l'allure de la trajectoire décrite par les points d'impédance.

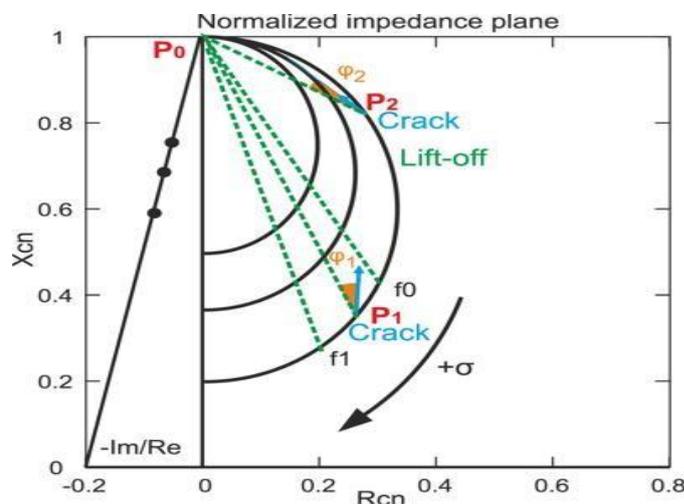


Figure 1.25: Plan d'impédance normalisée.

Par exemple, le modèle de type transformateur [21] permet de déterminer la conductivité locale de la cible et la distance sonde-cible à partir de deux mesures (R_{cn} , X_{cn}).

1.2.10 Différents modes d'excitations

Le mode d'excitation d'un capteur est un paramètre très important pour avoir la meilleure information sur la cible, on peut distinguer trois modes d'excitation :

- ✓ Excitation mono fréquence
- ✓ Excitation multifréquences
- ✓ Excitation pulsé

a) Excitation mono fréquence :

Le courant induit est généré par une excitation sinusoïdale à fréquence fixe. Cependant, cela devrait rester dans la limite du raisonnable. en fait:

- ✓ Si la fréquence est trop basse, l'amplitude du courant induit sera faible et les effets de bruit conduiront à une mauvaise précision de mesure.
- ✓ Si la fréquence est trop élevée, il y aura un phénomène capacitif parasite, notamment causé par la capacité de l'enroulement du capteur.

b) Excitation multi-fréquences

La méthode multifréquence est sans doute celle qui est la plus utilisée dans le CND à courant de Foucault. En réalisant des mesures à plusieurs fréquences d'excitation, il est possible d'atténuer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices. La réduction de ces grandeurs n'est possible qu'à partir de signaux contenant suffisamment d'informations pour permettre une séparation des paramètres.[22]

Le contrôle par courants de Foucault multi-fréquences est très utilisé pour l'inversion des données fournies par la sonde en vue de déterminer des paramètres du matériau en regard [10]. Selon les applications considérées, ces paramètres peuvent être de différentes natures

- ✓ intervalle sonde / cible (lift-off).
- ✓ conductivité électrique de l'objectif (σ).
- ✓ réceptivité magnétique de la cible (μ).

c) Excitation pulsée

La technique est née au milieu des années 1950 pour mesurer les revêtements métalliques et a ensuite été utilisée pour détecter les défauts profonds. [11].

1.2.11 Avantages du CND par courants de Foucault:

CND par CF :

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

1.2.12 Approche modélisation :

L'inversion des données pour l'approche modélisation est faite au moyen d'algorithmes d'optimisations conduisant à un temps de calcul pouvant devenir prohibitif. Nous pouvons résumer ces deux approches dans le schéma de la figure 1.26.

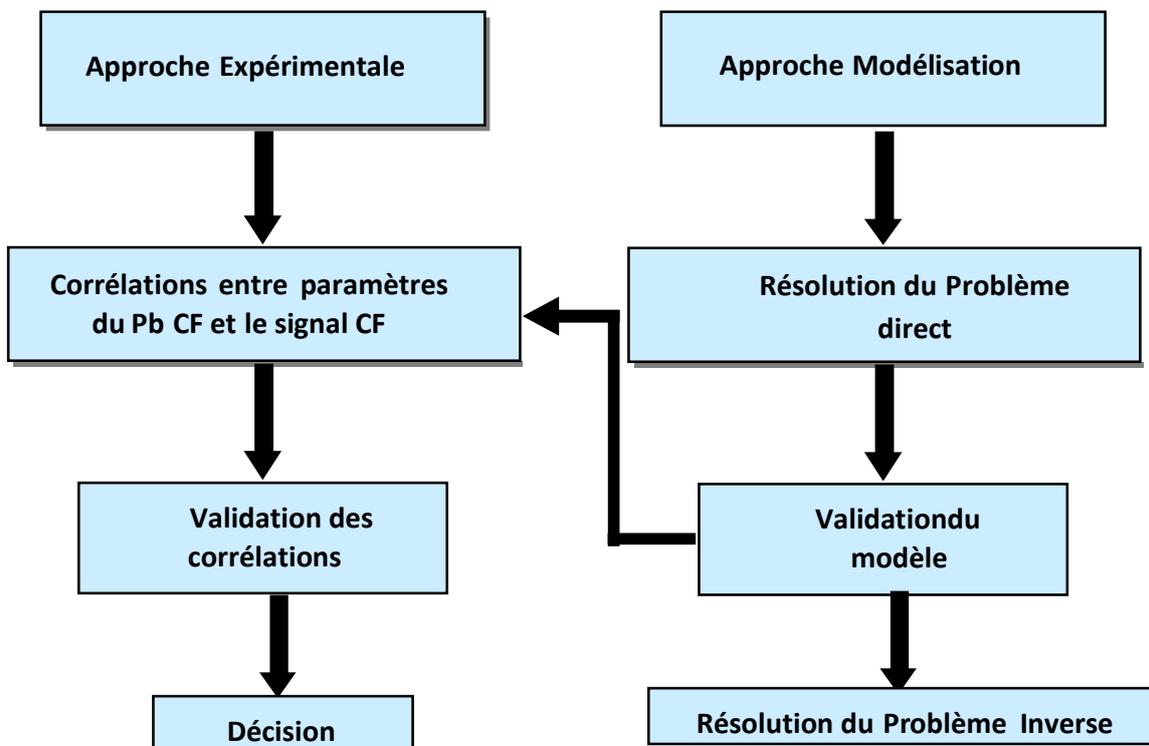


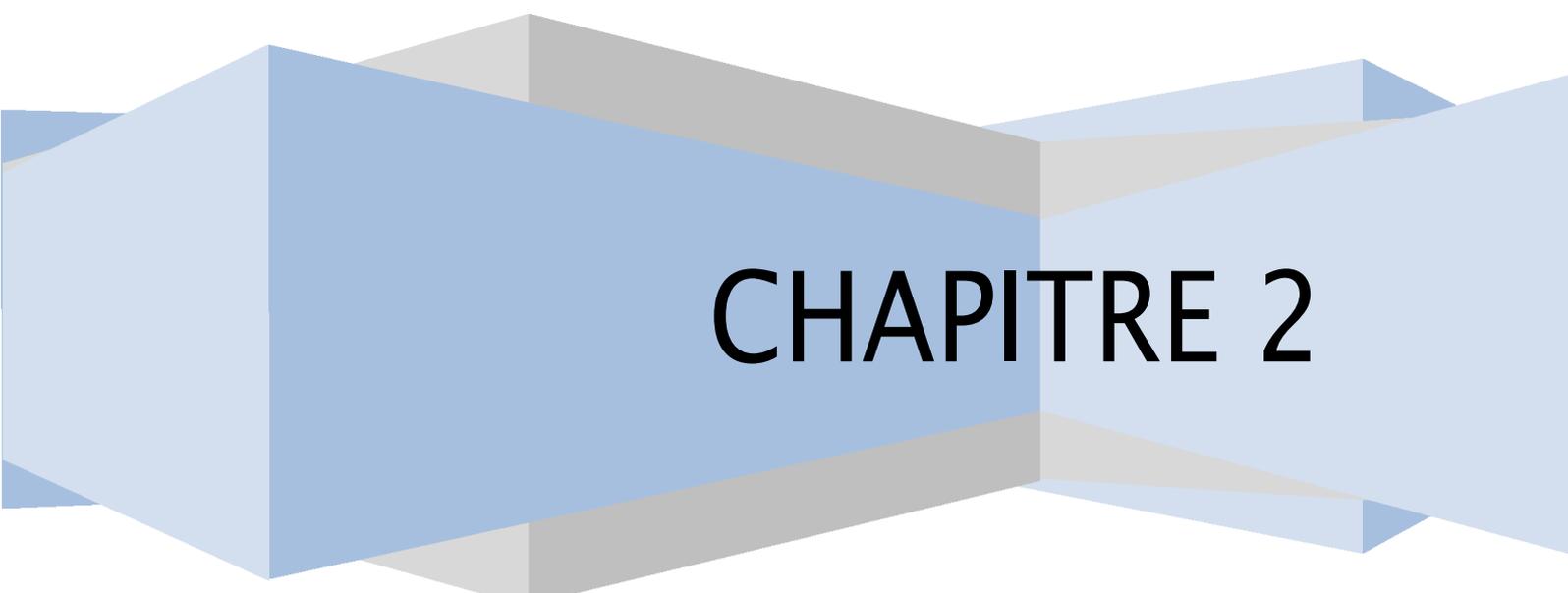
Figure 1.26– Approches en Contrôle Non Destructif (CND).

1.3 Conclusion:

Les origines des procédés de CND les plus courantes dans le domaine industriel ont été expliqués dans ce chapitre. Ces techniques incluent l'inspection visuelle, le test de pénétration, le test par ultrasons, la radiographie, le test de particules magnétiques, le thermomètre et enfin le procédé de Foucault. Nous avons abordé à la fois les avantages et les inconvénients de chaque méthode de contrôle. Il n'existe pas une seule technique CND qui fonctionne pour tous les matériaux et tous les défauts. La technologie choisie dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature (conductrice ou isolante), la taille et l'état de surface du matériau sous test, et le type de défaut introduit (interne ou externe électrique). Le "CND" est destiné à rechercher des défauts ou à décrire des pièces à contrôler, de l'intérieur vers l'extérieur.

Nous avons discuté des avantages et des inconvénients de chaque technique de contrôle. Il n'existe pas de technique CND qui s'applique à tous les matériaux et à tous les défauts, le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs, la nature (conducteur ou isolant), les dimensions et l'état de surface du matériau à inspecter, le type de défaut survenu, par soit en interne, le "CND" a pour objectif de trouver un défaut ou de caractériser des pièces à contrôler, de mesurer des épaisseurs, etc.

Le capteur inductif est l'élément de base du CND -CF pour la détection des défauts sur des matériaux conducteurs, nous avons consacré la dernière partie à ces capteurs. Dans le chapitre suivant, nous allons parcourir à l'étude des problèmes de la mécanique de la rupture.

An abstract graphic composed of several overlapping, three-dimensional-looking geometric shapes. The shapes are primarily light blue and grey, with some darker blue accents. They are arranged in a way that creates a sense of depth and perspective, resembling a stylized architectural structure or a modern logo. The shapes are centered horizontally and vertically on the page.

CHAPITRE 2

Chapitre 2

L'analyse des propagations de fissures et
calcul du Facteur d'Intensité de Contrainte

2.1 Introduction:

L'initiation et la propagation des dommages aux structures peuvent entraîner une défaillance catastrophique. Par conséquent, la détection précoce des dommages grâce à une évaluation rapide des dommages et au maintien de hautes performances joue un rôle important dans le fonctionnement des structures. [44 - 25].

Dans ce chapitre, on va présenter un rappel théorique sur la mécanique linéaire de la rupture. [41,51]. La durabilité et l'intégrité des matériaux, ainsi que leur résistance à la corrosion, à la rouille et aux forces extérieures, ont toujours été l'un des domaines industriels prédominants qui garantissent la sécurité des vies humaines, en particulier dans la construction civile, la construction navale et aéronautique. Ainsi, ingénieurs et scientifiques ont participé au développement de leur domaine en créant et développant des matériaux résistants. L'un des problèmes de matériaux les plus importants à l'heure actuelle sont les fissures, principalement les fissures microscopiques, ces dernières visant à réduire la durabilité des matériaux utilisés dans la fabrication de bâtiments, de navires, de pièces détachées, de gazoducs, de pétrole ou d'avions. Il est donc clair que les dommages et la menace pour les vies humaines sont très graves lorsqu'ils atteignent le point d'explosion, en raison de l'énorme pression qui génère l'expansion des fissures et son explosion. Cette grande énergie, qui était l'un des principes de recherche les plus importants parmi les scientifiques, pour identifier et étudier la propagation des fissures. De nombreuses recherches ont été menées pour étudier ce phénomène par des scientifiques des matériaux, de la chimie et de la mécanique, ainsi que des mathématiciens qui tentent de résoudre les équations mathématiques. Un phénomène physique ne peut être examiné que si nous étudions ses causes, les causes les plus importantes de fissures microscopiques sont les contraintes auxquelles le matériau ou la structure est exposé à des forces externes, qu'il s'agisse de forces mécaniques telles que des charges utiles ou de réactions chimiques telles que des chocs ou de la salinité, ou l'effet de l'atmosphère comme l'humidité, la chaleur ou les températures froides.

La mécanique a introduit de nouvelles solutions basées sur la science et l'ingénierie de la mécanique de la rupture, Griffith, qui est considéré comme l'un des pionniers les plus importants au monde dans ce domaine, a mené de nombreuses recherches qui ont fourni des solutions basées sur l'énergie telles que G, Irwin, Rice, Intégration J, pour observer et étudier la propagation des fissures et son comportement, les études prédisent également leur comportement dans le futur. Ces recherches sont restées théoriques jusqu'à la création de l'American Experiments Authority et de la Commission européenne pour la surveillance des

matériaux.

Un facteur de forme est introduit, un paramètre qui caractérise la forme de la fissure, l'orientation de la fissure et la proximité

d'autres frontières ; les techniques de détermination du facteur de forme sont divisées en théoriques et expérimentales. Chaque méthode est décrite avec un minimum de détails mathématiques ; des références sont données à des articles où les méthodes sont décrites plus en détail et utilisées pour résoudre des problèmes de fissures spécifiques. La précision et l'utilité des méthodes sont résumées. [63].

Depuis les travaux de Griffith (1920), les mécaniciens et ingénieurs s'intéressent de plus aux phénomènes de rupture provoqués par les fissures. Les soucis de sécurité et la volonté de construire des édifices éternellement plus irrespectueux ont poussé les chercheurs du domaine à effectuer des analyses encore plus légères. Cette présentation résume les résultats des études sur la mécanique de la rupture menées au cours des trois dernières années [43].

En s'appuyant sur la technique de la fonction de domaine, nous commençons par dénommer le cas de chargement de surface. Par extension, les dispositions suivantes sont également mises en compte :

- 1) chargement thermique;
- 2) pression ou un champ de forces volumiques sur la fissure;
- 3) cas de structure en axisymétrie.

Dans les deux cas, l'expression analytique de la dérivée seconde est transformée en une forme adaptée à l'investigation numérique.

➤ DEUX ETAPES PRINCIPALES DE RUPTURE

Il est facilement admis qu'un système qui se fissure sous contrainte finisse par échouer si la contrainte qui lui est imposée est suffisamment augmentée. Conceptuellement, le développement de fissures conduit à la fragmentation de la structure en deux ou plusieurs parties et se compose de deux étapes principales : Croissance des fissures et propagation ultérieure des fissures jusqu'à la ruine locale ou complète des structures utilisées.

Ainsi, dans un cadre rhéologique donné, on peut diviser les problèmes de mécanique de la rupture en deux groupes, selon qu'ils surviennent avant ou après l'étape d'amorçage de la fissure.[46].

- 1) problèmes avant l'initiation des fissures;
- 2) problèmes au cours de propagation de celles-ci.

Bien sûr, les problèmes qui se posent dans la première étape peuvent être traités à une échelle statique en adoptant les résultats de base de la mécanique continue (CMC). Un certain nombre d'études basées sur l'analyse des bilans énergétiques impliqués dans les processus de rupture ont montré qu'une quantité G , appelée taux de récupération d'énergie, est critique pour le problème 1). Un exemple est l'étude des concentrations de contraintes dans les régions de singularité. Détermination de la distance d'ouverture entre deux bords de fissure. Ou même prédire la contrainte critique pour la ramification des fissures. En résumé, nous écrivons :

Problèmes avant l'initiation des fissures $\xrightarrow{\text{associés}}$ G

Dans la deuxième phase d'exploration, de nombreux mécanismes de destruction existent. Peuvent être effectuées sous l'une des formes résumées suivantes [51] :

Problèmes au cours de propagation des fissures $\xrightarrow{\text{associés}}$ dG/da

Cette analyse d'attrition enrichit notre connaissance des mécanismes de rupture induite par la fissure et nous permet de prédire le début de la propagation de la fissure et les conséquences de cette propagation dans un cadre rhéologique donné. [43]. Nous commençons par un bref rappel des concepts de base de la mécanique de la rupture qui seront utilisés ultérieurement. Puis nous procédons à l'analyse du point de vue physique des problèmes liés à la post-amorçage des fissures dont les critères énergétiques seront établis en fin de chapitre. [48].

2.2 Mécanique linéaire et non-linéaire de la rupture :

Deux types de rupture peuvent se produire, selon le comportement du matériau lors de la propagation de la fissure [4].

2.2.1. Types élémentaires de rupture :

Les forces sont transmises d'atome à atome le long de lignes de force parallèles. Il existe deux principaux types de fractures, selon le mécanisme en cause. La rupture fragile est contrôlée par la contrainte normale et la rupture ductile est contrôlée par la contrainte de cisaillement avant la déformation plastique [6]. (figure 2.1) [16].

➤ **La zone d'élaboration 1** : Il se trouve au bas de la fissure et sur la circuit laissée par la fissure lors de sa propagation. [6].

➤ **La zone singulière 2** : Dans cette zone, la composante du champ de contraintes près du front de fissure est infinie ($r \rightarrow 0$) [6].

➤ **La zone des champs lointains :** Ce domaine se compose d'une part d'un domaine singulier et d'autre part d'un domaine éloigné, qui dépend des conditions limites de charge et de déplacement. Dans ce domaine, les champs de déplacement, de déformation et de contrainte varient très couramment utilisés dans les méthodes d'éléments finis [6].

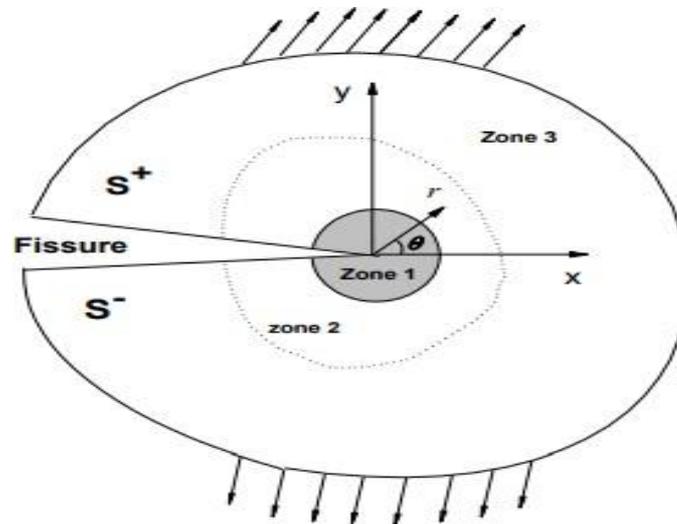


Figure 2.1 : Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure.

2.2.2. Modes de rupture :

Le mouvement possible de chaque lèvres de fissure est une combinaison de trois manière indépendants [4]. Ces modes sont définis comme suit [1] :

- **Mode I :** Le mode par lequel la surface de la fissure se déplace perpendiculairement au plan de la fissure et s'ouvre.
- **Mode II :** Également appelé mode de balayage vers la droite.
- **Mode III :** La surface de la fissure se déplace dans le même plan et parallèlement au front de fissure.

C'est trois modes sont illustrés dans la figure(2.2) ci-dessous :

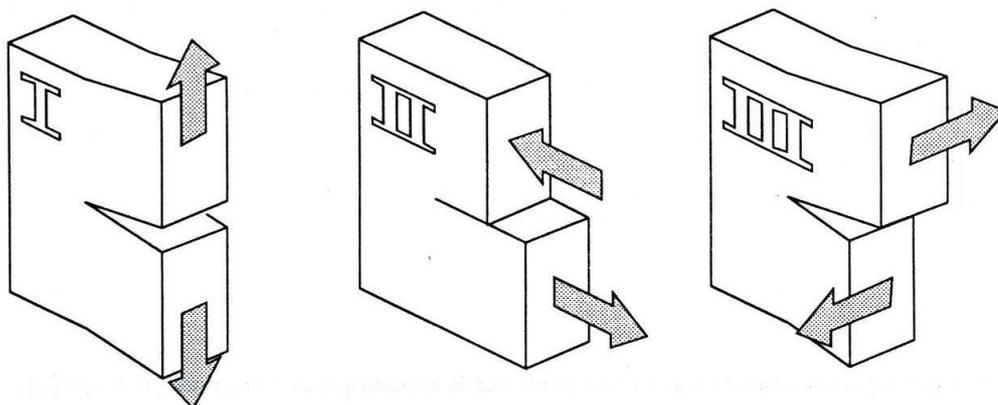


Figure 2.2 Modes d'ouvertures de fissures.

Le mode I le plus dangereux car l'ouverture induite par la tension favorise la formation et la propagation des fissures. Il s'agit de la variante la plus courante des matériaux fragiles. C'est donc la plus étudiée [6].

2.3. Approche globale de la mécanique linéaire de la rupture :

Il peut s'agir de contraintes de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion [2]. Cette classification est basée sur la capacité du matériau à subir une déformation plastique. Le comportement lié à la relation entre la contrainte de traction et la déformation dans ces deux types de rupture est illustré à la Figure. 2.3.

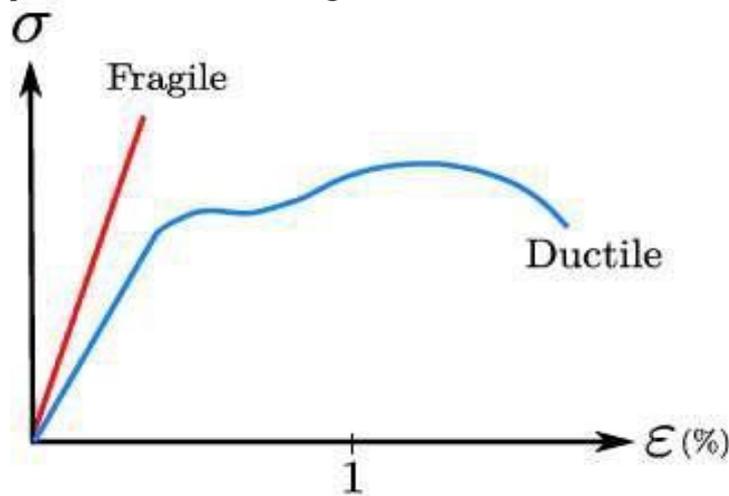


Figure 2.3. Courbe contrainte/déformation.

2.4 Facteurs d'intensité de contrainte

Irwin montre que le "facteur d'intensité de contrainte", également appelé K , décrit le champ de contrainte près du fond de fissure. [7]. Comme l'indique la figure (2.4)

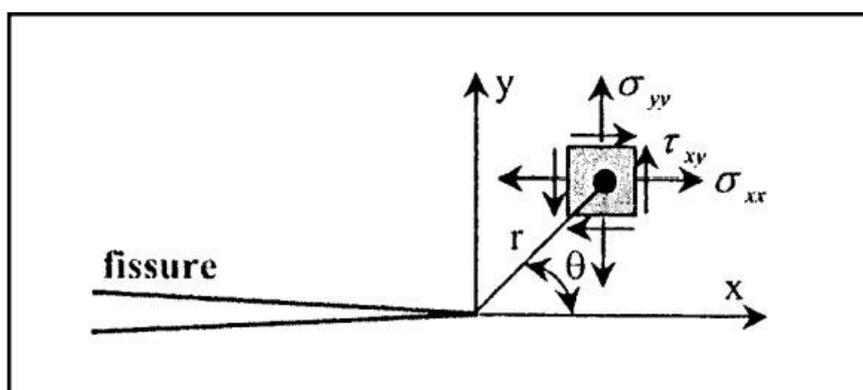


Figure 2.4 : Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure.

Lorsqu'un objet fissuré est sollicité par une force, de très grandes concentrations de contraintes se produisent près de la fissure dans des conditions qui reflètent les réalités des pièces et structures réelles. La théorie élastique permet de représenter la contrainte près du

front de fissure par une série polaire de Taylor [5].

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

Les expressions du FIC K ont généralement la forme suivante :

$$K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (2.2)$$

Où σ^∞ est la contrainte appliquée à la structure, a la longueur de la fissure, W une dimension de la structure et $f(a/W)$ un paramètre géométrique sans dimension .

2.4.1. Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture :

L'analyse dimensionnelle est un instrument important pour l'étude de la mécanique de la cassure. Pour illustrer cette approche, considérons la configuration de charge illustrée à la Figure 2.6. Ici, différentes géométries de structures de fissures sont soumises à la même charge. σ^∞ Gardez le état loin des fissures[13]. La figure 2.5 montre une fissure de bord de très petite taille par rapport à une fissure de plaque : le problème est donc traité comme un problème de milieu infini [3].

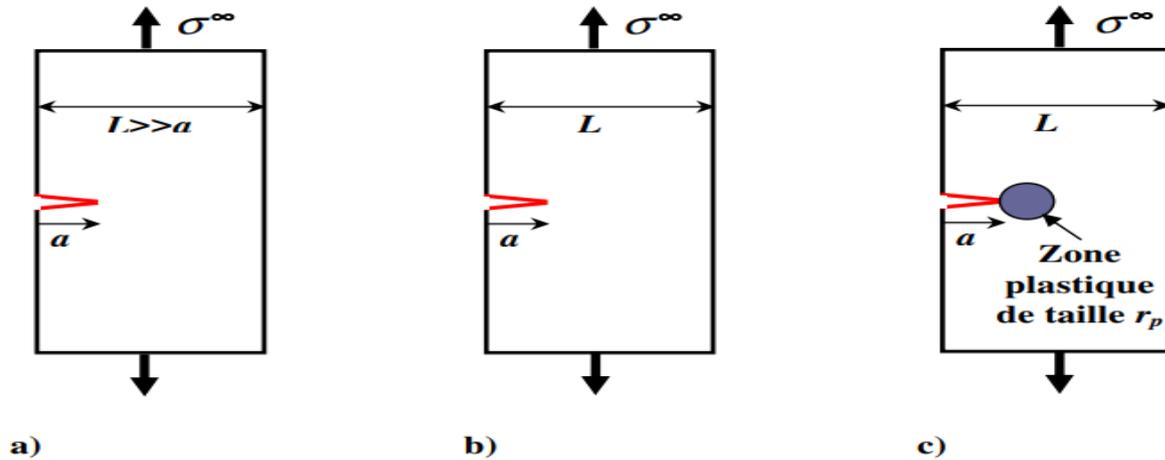


Figure 2.5 : Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord.

Dans le cas de la **figure 2.5.a** par exemple, cette fonction se réduit à :

$$\sigma_{ij} = f_1(\sigma^\infty, E, \nu, a, r, \theta) \quad (2.3)$$

Pour le cas de la **figure 2.5.b**, l'analyse dimensionnelle donne la formule :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_2\left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \nu, \theta\right) \quad (2.4)$$

Dans le cas de la **figure 2.5.c**, il vient la relation :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{\infty}} = F_3\left(\frac{E}{\sigma_{\infty}}, \frac{\sigma_E}{\sigma_{\infty}}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \frac{r_p}{a}, \nu, \theta\right) \tag{2.5}$$

Où σ_E et r_p sont les deux autres variables additionnelles

2.4.2. Champs de contrainte et déplacement :

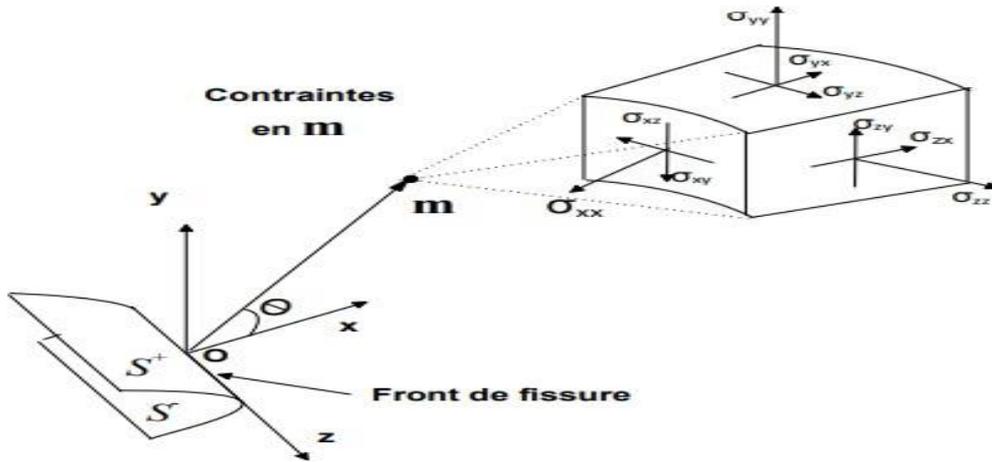


Figure 2.6 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure.

Pour un système de coordonnées polaires (r, θ), la contrainte et la déformation près de la fissure (Figure. 2.6) montrent une progression asymptotique avec un terme singulier s'écrit :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{K_a}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{\alpha}(\theta) \end{aligned} \right. \tag{2.6}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_{ij} &= \frac{K_a}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}^{\alpha}(\theta) \end{aligned} \right. \tag{2.7}$$

σ_{ij} est le tenseur des contraintes.

ϵ_{ij} est le tenseur des déformations.

K_a est le Facteur d'Intensité des Contraintes (FIC) en mode α .

$\alpha=I, II$ ou $III, ij=xy$.

Les fonctions **f** et **g** donnent la répartition angulaire. [6]

Elle se produit selon l'un des trois modes élémentaires décrits ci-dessous. [6]

Mode I : mode d'ouverture de la fissure.

Mode II : mode de cisaillement dans le plan.

Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure. Comme l'indique la figure (2.7)

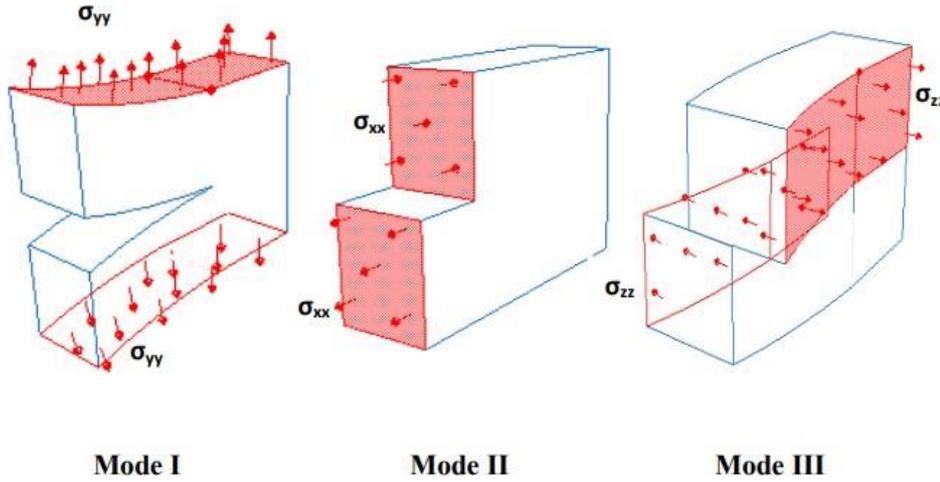


Figure 2.7 : Différents modes élémentaires de fissuration.

2.4.2.1 Champs de contraintes au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode I.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\frac{\theta}{2}\right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\frac{\theta}{2}\right) \\ \sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \sin 3\frac{\theta}{2}\right) \\ \sigma_{zz} = 0 \quad \text{en contrainte plane} \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{en deformation plane} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

2.4.2.2 Champs de déplacements au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode I.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \\ u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) \\ \kappa = \frac{3-4\nu}{1+4\nu} \quad \text{en deformation plane} \\ \kappa = 3-4\nu \quad \text{en contrainte plane} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

2.4.2.3 Champs de contraintes au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode II.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \frac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos 3\frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_{zz} = 0 \quad \text{en contrainte plane} \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{en deformation plane} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

2.4.2.4 Champs de déplacements au voisinage de l'extrémité de fissure pour le Mode II.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \\ u_y = \frac{-K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (\kappa - 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Avec :

- μ : coefficients de Lamé.
- E : module d'Young.
- κ : constante de Kolossov.
- ν : coefficient de Poisson.

Connaissant les formules des composantes d'une contrainte ou d'un décalage, par exemple, les facteurs de force de contrainte peuvent être mutuellement déterminés [44].

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{11} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)(\kappa+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \delta u_2 \right) \quad (2.12)$$

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

$$K_{\alpha} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{ij} \quad (2.13)$$

Ces facteurs sont proportionnels à la discontinuité de déplacement du bord de la fissure.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zz} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_z \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right) \\ K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zn} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_n \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right) \\ K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{zt} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{2(1+\nu)} u_t \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \right) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

2.5 Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes

Il existe certains techniques de calcul du coefficient d'intensité de contrainte (FIC). Les plus couramment utilisés sont :

- Méthode de superposition.
- Extrapolation de déplacement.
- MEF.

2.5.1 La méthode du principe de superposition

Cette méthode comprend à conserver un problème donné en une somme de problèmes simples. La solution est connue. Nous obtenons donc [10].

$$K_I^{total} = K_I^A + K_I^B + K_I^C + \dots \quad (2.15)$$

2.5.2 La méthode d'extrapolation des déplacements

Le bond de déplacement à largeur les lèvres de la fissure contre les points $(r, \theta = +\pi)$ et $(r, \theta = -\pi)$ se montant à partir d'équation suivante [61] :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{u}_2 \mu}{\kappa + 1} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \quad (2.16)$$

Ou

$$\mathbf{u}_2 = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2.17)$$

$$\Delta \mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_2(\theta = +\pi) - \mathbf{u}_2(\theta = -\pi)$$

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad \text{en déformation plane}$$

$$\kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \quad \text{en contrainte plane}$$

2.5.3 La méthode des éléments finis

Cette singularité peut être construite dans des calculs aux éléments finis, puisque la contrainte en fond de fissure est connue pour être singulière à $1/\sqrt{r}$ pour les matériaux élastiques.

Soit $\mathbf{x}=\mathbf{x1}$, $\mathbf{y}=\mathbf{x2}$, $\mathbf{u}=\mathbf{u1}$, $\mathbf{v}=\mathbf{u2}$. Observons un élément iso paramétrique à 8 nœuds représenté dans la figure (2.8). En utilisant les fonctions de contour $N_i(\xi, \eta)$.

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) x_i \\ y &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \quad (2.18)$$

Les déplacements sont interpolés de la même manière :

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) u_i$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) v_i$$
(2.19)

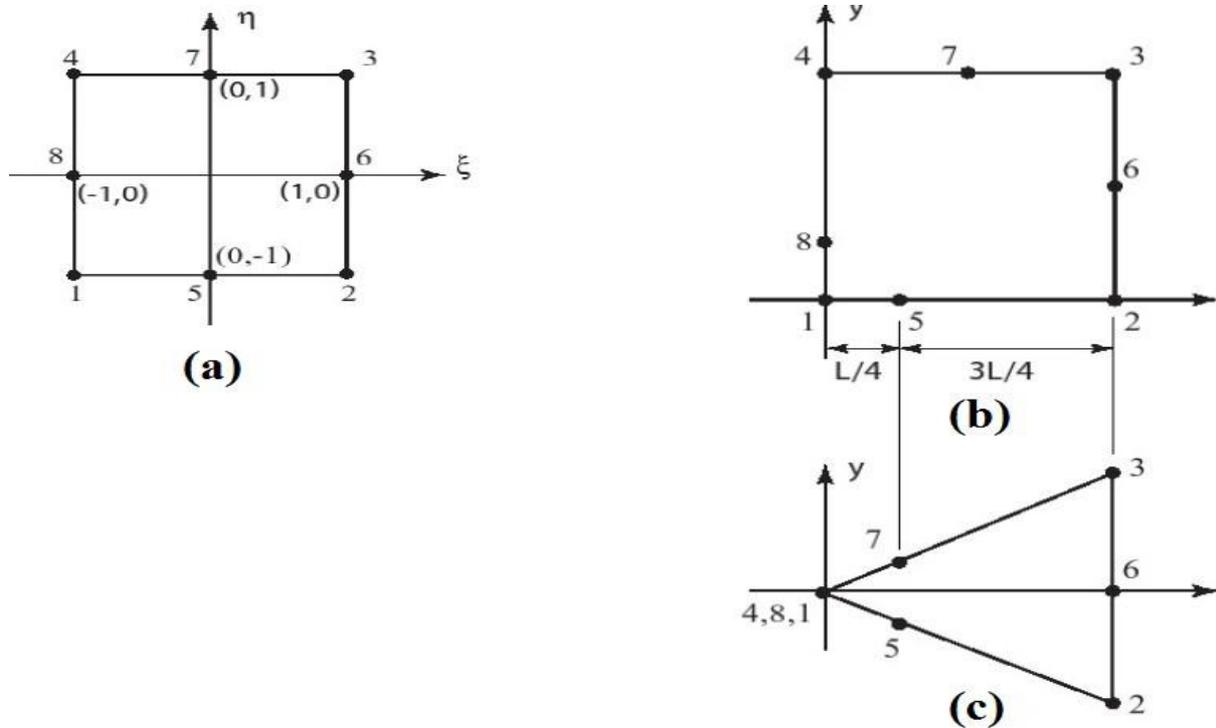


Figure 2.8 – (a) élément iso paramétrique à 8 nœuds dans le repère local, (b) élément isoparamétrique à 8 nœuds dans le repère global, (c) élément triangulaire formé par l'effondrement des nœuds 4, 8, 1 en seul point.

2.6 Différents régimes de propagation

La conception en fatigue des structures soumises à des charges réguliers nécessite de définir des « conditions » qui servent de base à la résistance. Cette sélection est liée à trois étapes différentes impliquées dans le instrument de fissuration. La figure 2.9 montre les différentes étapes de la fissuration par fatigue et les paramètres qui affectent chaque étape.

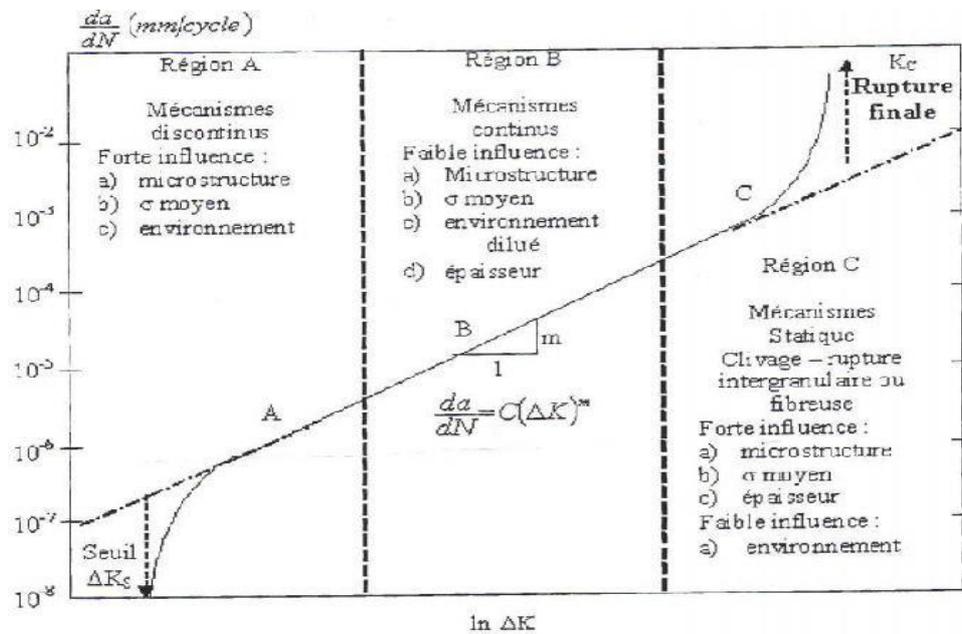


Figure 2.9 : Différent régimes de propagation (François et al. 1992).

- Domaine I : C'est l'étape de départ. Cela se résulte généralement à proximité de défauts intrinsèques qui peuvent provoquer des jonctions de contraintes.
- Domaine II : Propagation stable des fissures macroscopiques. A ce stade, les fissures peuvent se déployer plus ou moins rapidement, selon le matériau et la force de la contrainte appliquée.
- Domaine III : Propagation instable.

2.6.1 Modèles de propagation des fissures de fatigue

Le évolution du modèle de propagation a atteint une vitesse significative en tenant compte de plusieurs paramètres et des conditions de progression qui affectent la propagation des fissures.

2.6.1.1 Loi de Paris

Ont proposé Paris et al. (Paris, 1961) pour d'utiliser les bouleversements du facteur d'intensité de contrainte ΔK pour expliquer la croissance des fissures [69]

$$\frac{da}{dN} = C.\Delta K^m \tag{2.20}$$

2.6.1.2 Loi de Forman

Pour détenir de la élévation asymptotique du taux de fissure lorsque K_{max} augmente le FIC_c , Forman (Forman, 1972) a développé un modèle décrivant la troisième étape de propagation.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \quad (2.21)$$

2.7 Taux de restitution d'énergie

Griffith (1920) fut le premier à expliquer énergiquement la rupture. Le taux de fixation de cette énergie, noté G , peut être exprimé selon [9].

$$G = - \frac{\partial E_P}{\partial A} \quad (2.22)$$

Où E_P est l'énergie totale potentielle

$$E_P = U_E - W_{F_{ext}} \quad (2.23)$$

A : la fissure pour créée la surface après propagation $A = B \cdot a$

a : grandeur de la entaille.

U_E : Évolution de l'énergie $U_E = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d\Omega$

$W_{F_{ext}}$: Travail des forces extérieures.

Pour le problème de Griffith, comme suit :

$$G = - \frac{1}{2} \frac{\partial (U_E - W_{F_{ext}})}{\partial A} \quad (2.24)$$

$$G = - \frac{1}{2B} \frac{\partial (U_E - W_{F_{ext}})}{\partial a} \quad (2.25)$$

2.8 Intégrale de contour « Intégrale J »

Rice (1968) a proposé ce paramètre en ajustant le comportement élastoplastique au comportement élastique non linéaire [6, 34].

D'importants critères de fissuration en mécanique de la rupture élasto-plastique sont basés sur une certaine intégrale J discutée ci-dessous, plutôt que sur les facteurs d'intensité de contrainte comme c'est le cas en mécanique de la rupture élastique.[34]

Toutefois, dans cette thèse consacrée aux problèmes élastiques, nous allons nous appuyer sur l'intégrale J pour obtenir les facteurs d'intensité de contrainte en vertu de la relation qui lie

ces facteurs à l'intégrale J en mécanique de la rupture élastique [34].

Analyse un solide fissuré, Rice a utilisé la théorie de la déformation. Ce faisant, il a démontré que l'intégrale de contour peut déterminer indépendamment le taux de libération d'énergie non linéaire, quel que soit le contour d'intégration. Hutchinson, Rose et Rice ont ensuite établi que ce paramètre servait de caractérisation claire du champ de contrainte-déformation près de la pointe de la fissure dans les matériaux non linéaires. Parallèlement à la description de la distribution des contraintes en mécanique linéaire de la rupture à travers les paramètres FIC et l'énergie de Griffith.

Les paramètres sont définis à partir de l'intégrale du contour : [52].

$$J = \int_{\Gamma} (Wn_1 - \sigma_{ij}n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1}) ds \quad (2.26)$$

avec ;

Γ : Un contour fermé quelconque entourant la pointe de fissure (Figure. 2.10),

W : densité d'énergie de déformation,

u_i : Vecteur déplacement.

ds : élément de contour

n : Normale unitaire extérieure au contour.

n_1 : Composante sur l'axe X_1

n_j : Composante sur l'axe X_j

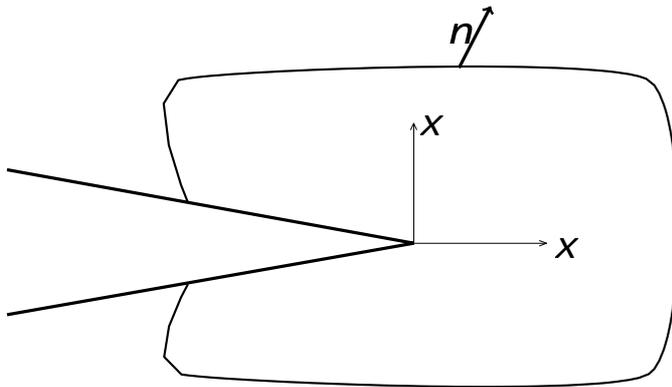


Figure 2.10 Contour indépendant de l'intégrale J .

La densité d'énergie de déformations W est définie par [53] ;

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2.27)$$

Le taux de restitution d'énergie d'un matériau élastique est indiqué par l'intégrale J. [54.55].

$$J = \frac{K_I^2}{E^*} + \frac{K_{II}^2}{E^*} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (2.28)$$

La densité d'énergie de déformations W est définie par :

$$W = \frac{1}{2} \left[\sigma_{xx} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \sigma_{xy} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] \quad (2.29)$$

avec ;

$$dy = \frac{\partial y}{\partial \eta} d\eta$$

et,

$$d\Gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2}$$

On a ainsi

$$J = \sum_{g=1}^{ng} W_g I_g(\xi_g, \eta_g) \quad (2.30)$$

où ; **ng** est le nombre des points d'intégration dans un élément, **W_g** sont les poids des points de Gauss. **I_g** est la fonction à intégrer et évaluée à chaque point **g** de Gauss.

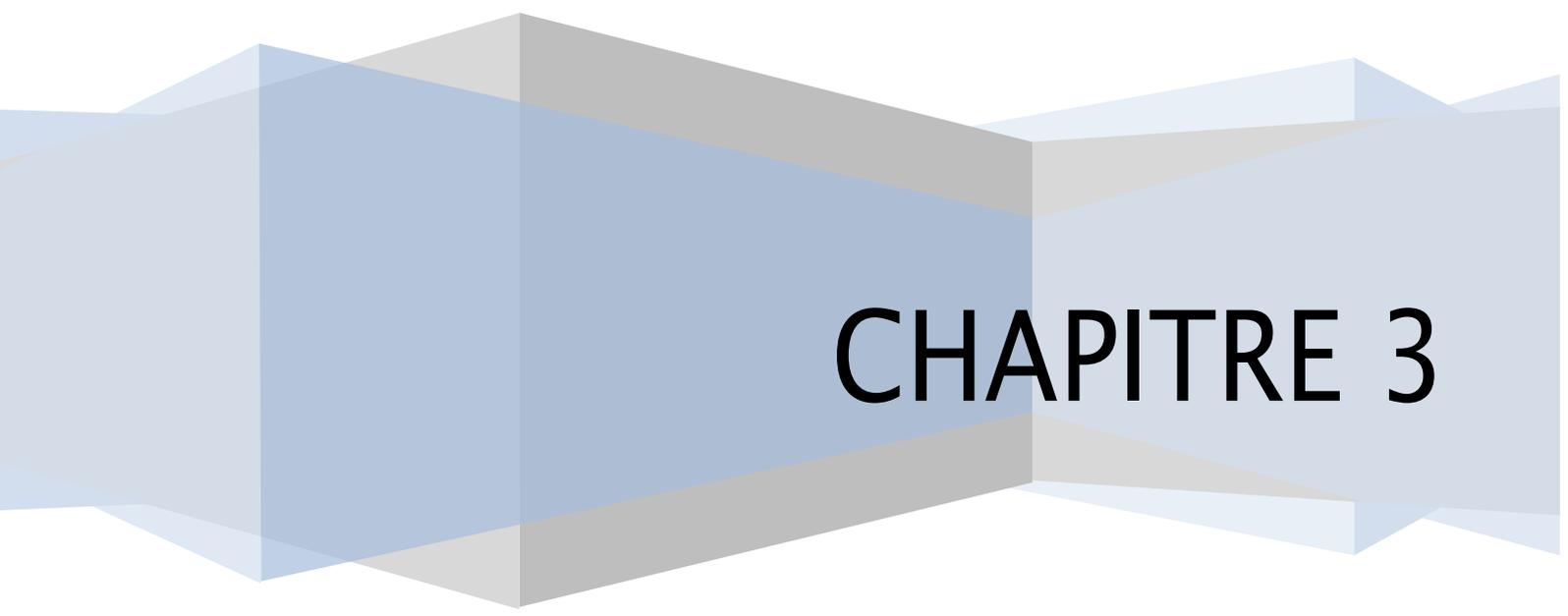
$$I_g = \frac{1}{2} \left[\sigma_{xx} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \sigma_{xy} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] \frac{\partial y}{\partial \eta} - \left[(\sigma_{xx} n_1 + \sigma_{xy} n_2) \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\sigma_{xy} n_1 + \sigma_{yy} n_2) \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2} \quad (2.31)$$

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel théorique des grandeurs physiques utilisées dans notre étude, telles que FIC K et l'intégrale J. Ces paramètres sont largement utilisés en pratique car ils sont directement liés aux contraintes et aux déformations. Nous avons également évoqué la singularité contrainte, qui est ensuite modélisée en éléments finis. La modélisation de la propagation des fissures est faisable, créant en fait l'initiation des fissures. Les conclusions suivantes peuvent être tirées d'une étude numérique de la croissance des fissures de fatigue et du comportement de la fissure dans la partie perforée sous l'action d'un chargement de traction simple ou oblique :

- L'intérêt du choix de l'élément et la zone sélectionnée (zone de propagation de fissure).
- L'intérêt de la connaissance du point de départ de la fissure et leur angle de propagation qui nous fait changer le mode existant si il est pur ou mixte avec le même chargement de traction.
- La proportionnalité entre la propagation de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte.

Dans le chapitre suivant, nous allons parcourir à l'étude des problèmes **CND-CF** par la méthode des éléments finis.



CHAPITRE 3

Chapitre 3

Méthodes de Résolution des Problèmes CND-CF par la méthode des éléments finis

3.1 Introduction:

Lorsque de la mise en œuvre d'outils CND par courants de Foucault, les chroniques paramétriques expérimentales peuvent être difficiles pour plusieurs déductions : L'indisponibilité des échantillons de matériaux pour les normes, trop de tests et d'échantillons, et même le coût de fabrication des prototypes de test peuvent survenir. Avec l'avènement des ordinateurs, notamment l'augmentation de la puissance de calcul, les simulations numériques engagent à remplacer les expériences directes, trop coûteuses et chronophages. Aujourd'hui, ce n'est plus seulement un moyen de vérifier et de valider des calculs effectués sur une machine. [74].

La motivation principale de cette thèse est de trouver une solution optimale, en respectant le compromis du temps de calcul ou d'inspection, et la fiabilité des résultats, qui est représenté par la précision. Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), est basé sur le fait que les paramètres électromagnétiques du matériau sont modifiés par la présence d'un défaut. Dans ce cas, deux problèmes devraient être traités :

i) le problème direct, qui consiste à calculer le champ électromagnétique en ayant en entrée les paramètres géométriques et électromagnétiques de la surface inspectée, et en sortie un signal d'impédance, et ii) le problème inverse, dans lequel plusieurs valeurs d'impédances sont combinées pour remonter aux propriétés géométriques (position, taille et forme) du défaut et/ou les paramètres électromagnétique (conductivité, perméabilité) du matériau.

Néanmoins, tous les efforts consentis à caractériser les défauts ne parviennent cependant pas à palier tous les besoins en CND des différents secteurs de l'industrie et des transports.

Dans ce chapitre, la modélisation de fissures volumiques de faibles épaisseurs est effectuée par éléments finis 2D nodaux. Tout d'abord, nous rappelons les principales formulations magnétodynamiques 2D existantes ainsi que leurs limites de validité et les plus avantageuses dans le cadre du CND. Nous évoquons de façon plus détaillée les formulations basées sur le potentiel vecteur magnétique. Nous évoquons de façon plus détaillée la MEF, méthode choisie dans ce travail pour la simulation du CND par CF. En effet, la plus grande partie des recherches menées à l'IREENA site de Saint-Nazaire s'appuie sur cette méthode. L'objectif de cette partie est calcul de la variation d'impédance pour des défauts donnés. Nous finirons par montrer les fondements de construction de bases de données pour l'inversion. [76].

3.2. Modélisation du dispositif de CND par CF :

Une installation d'essais non destructifs par courants de Foucault peut être modélisée par le système illustré à la figure 3.1. [71].

Fissure : longueur : l
 épaisseur : e , profondeur : p

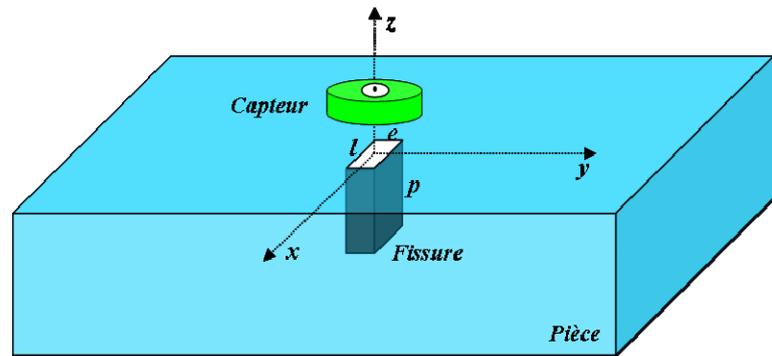


Figure 3.1 : Système capteur-fissure.

Le dispositif CND que nous voulons modéliser est placé dans un état quasi-stationnaire en magnétodynamique basse fréquence. Il est constitué d'inducteurs câblés, de régions conductrices, de régions magnétiques ou non magnétiques non conductrices et d'alimentations. Comme le montre la figure 3.2. L'ensemble de ce système forme un domaine de calcul Ω avec des bornes Γ . [75].

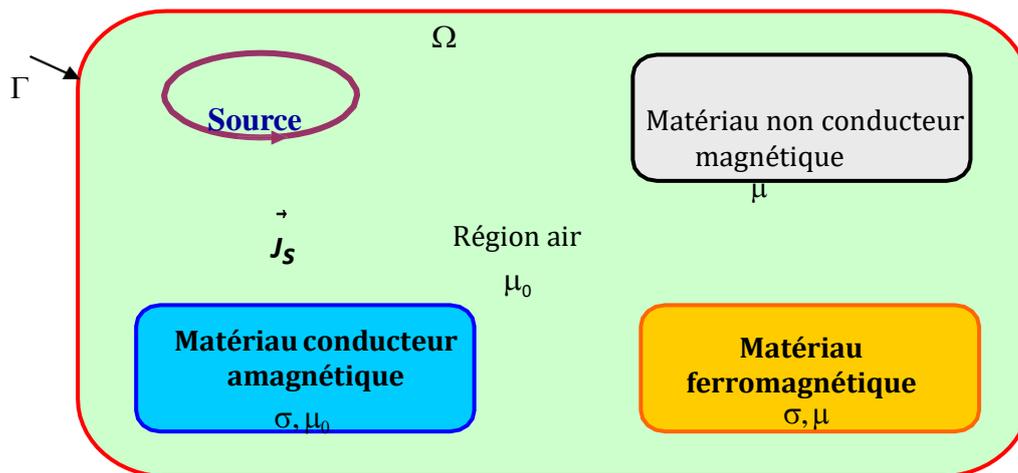


Figure 3.2 - Problème magnétodynamique type.

3.3. Mise en équations :

Le champ électromagnétique a pour but de décrire le comportement dans le système indiqué, nous partons des quatre équations de Maxwell et leur attributions des lois de comportement et des CAL.

3.3.1 Equations de Maxwell

La représentation des équations de Maxwell sont la plus courante des lois de l'électromagnétisme. Ils représentent des modèles généraux pour décrire le comportement et l'interaction : la charge et la densité de courant reflètent l'interdépendance de ces quatre grandeurs. [73].

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Théoreme de Gauss} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Faraday} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Théorème d'Ampère-Maxwell} \quad (3.4)$$

avec :

→

E : Champ électrique [V/m]

→

H : Champ magnétique [A/m]

→

B : Induction magnétique [T]

→

D : Induction électrique [C/m²]

→

J : Densité de courant [A/m²]

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

3.3.2 Lois constitutives

Les équations ci-dessus se rapportent aux relations structurelles (lois de comportement) du matériau.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.7)$$

où

μ : Perméabilité magnétique [H/m]

σ : Conductivité électrique [S/m]

ε : Permittivité électrique [F/m]

→

B_r : Induction magnétique rémanente [T]

σ , μ et ε des scalaires, indiquant le comportement de matériaux isotropes, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie. [79].

La relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} peut être non linéaire.

La solution du système (3.1 à 3.7) à pour assurer l'unicité de système, Il faut inclure trois types

de conditions : les limites, les conditions de continuité et les jauges [71].

3.3.3 Conditions aux limites

Pour une possession Ω d'une frontière Γ avec \vec{n} un vecteur normal (unitaire) à Γ pour la variable u , les conditions aux limites (spatiales) s'exécutent généralement.

- État de Dirichlet cohérent $u \cdot n = 0$
- État de Neumann cohérent $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

3.3.4 Conditions de continuité

Lors de la transition du milieu 1 au milieu 2 (figure 3.3), les tailles de champ à l'interface sont susceptibles d'être discontinues et impossibles à distinguer.

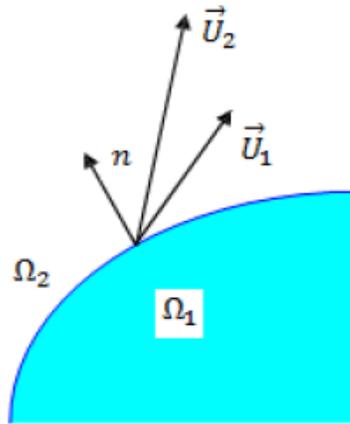


Figure 3.3 : Interface entre deux milieux.

Dites rapports de transmission entre les élévations électromagnétiques à l'interface, , s'écrivent alors :

$$\left(\vec{D}_2 - \vec{D}_1 \right) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (3.8)$$

$$\left(\vec{B}_2 - \vec{B}_1 \right) \cdot \vec{n} = 0 \quad (3.9)$$

$$\left(\vec{H}_2 - \vec{H}_1 \right) \times \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (3.10)$$

$$\left(\vec{E}_2 - \vec{E}_1 \right) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (3.11)$$

où ρ_{sur} est la densité surfacique de charge, \vec{J}_{sur} la densité surfacique de courant et \vec{n} le vecteur ordinaire à la surface de dislocation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'externe du milieu 1.

3.3.5 Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs sont représentés par des gradients (champs rotation) ou la rotation la plus proche (champ de divergence). Des jauges sont utilisées être

deux un tableau de vecteurs \vec{U} et \vec{W} , les conditions de jauge sont généralement écrites suit:

$$\text{div}\vec{U} = 0 \quad (3.12)$$

$$\text{div}\vec{U} + \overline{K} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (3.13)$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad (3.14)$$

3.3.6 Hypothèses simplificatrices

Les équations introduites jusqu'à présent décrivent généralement tous les phénomènes électromagnétiques. Cependant, les phénomènes électromagnétiques ne peuvent pas être résolus directement. En fonction de la géométrie du dispositif étudié, certains phénomènes ne peuvent être négligés, ce qui entraîne une simplification des équations et un modèle plus simple [83]. Les travaux achevés sont engendrés sur les principes suivantes :

- Que nous envisageons les circonspections de CND par CF pour modéliser se installent dans le cadre de la magnétodynamique, et en résultat le courant de déplacement est négligeable

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$$

- Le courant d'alimentation est habituellement supposé produit par un concepteur de courant parfait. la notation $\sigma \vec{E}$ de CF :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (3.15)$$

- Régulièrement, le courant n'existe qu'en volume ($\vec{J}_{sur} = \vec{0}$). Par conséquent, la continuité et la discontinuité est assurée. [71].

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (3.16)$$

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

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.17)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.18)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (3.19)$$

3.3.7 Champs et potentiels

Les champs de vecteurs $\vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{J}$ peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$\vec{H} = \vec{T} - \text{grad}\phi \quad (3.20)$$

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (3.21)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \text{grad}v \quad (3.22)$$

$$\vec{J} = \text{rot}\vec{T} \quad (3.23)$$

En d'autres termes, plusieurs combinaisons sont possibles pour un problème donné (il existe de nombreuses formulations possibles). Ces combinaisons conduisent à des formulations électromagnétiques.

3.4 Résolution des équations de Maxwell :

Il a été démontré que les systèmes convergent moins bien lorsque les champs (E, H) des inconnues sont traités en termes de potentiels [76 - 77].

3.4.1 Formulations magnétodynamiques

La sélection de formulations basée sur des quantités caractéristiques et liées aux relations constitutives, aux relations de transition, aux conditions aux limites et aux conditions de jauge est nécessaire pour mettre en œuvre les outils de la méthode des éléments finis 3D [93]. La formulation implique la sélection des variables inconnues et de leurs équations. Les potentiels sont fréquemment utilisés pour décrire les champs électriques et magnétiques.

En deux grandes familles classées pour la formulations électromagnétiques sont:

- conceptions qui utilisent des variables de type champ : \vec{E} ou \vec{H}
- formulations avec des variables de type potentiel : $\vec{A} - V, \vec{A}^*$ ou $\vec{T} - \phi$

3.4.2 Formulations de type électrique

Les principales formations de type électrique sont les formations en champ \vec{E} , en potentiels

$$\vec{A}V - \vec{A}.$$

3.4.2.1 Formulation en champ électrique

L'équation d'Ampère-Maxwell (3.4) par rapport au période est tirée de cette formulation ,elle peut s'écrire comme suit :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{E} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (3.24)$$

Les éléments de bord doivent être utilisés pour prendre en compte (de manière naturelle) les conditions limites et les discontinuités de la composante normale à l'interface du champ de vecteurs. [76].

3.4.2.2 Formulation en potentiels : vecteur électrique et scalaire magnétique $\vec{T} - \phi$

L'équation $\text{div} \vec{J} = 0$ et accepte de définir le potentiels \vec{T} , telque $\vec{J} = \text{rot} \vec{T}$. La formulation comme $\vec{A} - V$, ce dont attribution l'expression ci-dessous :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{T} \right) - \text{grad} \left(\frac{1}{\sigma} \text{div} \vec{T} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \mu (\vec{T} - \overrightarrow{\text{grad} \phi}) = \vec{0} \quad (3.25)$$

3.4.3 Formulation magnétodynamique en termes de potentiels vecteur magnétique

Cette formulation est destinée aux appareils électrotechniques dont la source de courant or de tension change au fil du temps. Dans ce cas le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ n'est pas nul; champs magnétique sont pendant accouplés par la existence des courants induits .Les équations utilisée suivantes [18];

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.26)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.27)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (3.28)$$

avec :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (3.29)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{A})}{\partial t} \quad (3.30)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.31)$$

et où ;

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (3.32)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (3.33)$$

A partir de

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.34)$$

On obtient ;

$$\vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \right) \quad (3.35)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (3.36)$$

Par ailleurs, on a ;

$$\vec{J}_s = -\sigma \nabla V \quad (3.37)$$

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.38)$$

ona : $\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.39)$

Et $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.40)$

On aura :

$$\nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{A}) + \mu \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \mu \vec{J}_s \quad (3.41)$$

Le potentiel vecteur magnétique est responsable de l'équation magnétodynamique qui reflète les phénomènes de pénétration du courant induit et le comportement transitoire des machines électriques [88].

Cette équation peut être rédigée de la manière suivante dans le domaine harmonique :

$$\nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{A}) + j \omega \mu \sigma \vec{A} = \mu \vec{J}_s \quad (3.42)$$

a) Dans le cas 2D axisymétrique :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rA_\varphi)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rA_\varphi)}{\partial z} \right) \right] + \mu\sigma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = -\mu \mathbf{J}_{s\varphi} \quad (3.43)$$

b) Dans le cas 2D en Cartésien :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] + \mu\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = -\mu \mathbf{J}_{sz} \quad (3.44)$$

3.5 Modèle en 2D

Le modèle utilisé pour effectuer la simulation comprend un capteur (bobines + matériau amagnétique), une plaque métallique à contrôler et l'air autour du capteur et de la plaque qui a une épaisseur de (0,45 mm). la distance entre le capteur et la plaque est de 0,1 mm).

Le capteur est en cuivre, éventuellement deux bobines entourant le tube ou une sonde à l'intérieur du tube[66]. Le défaut provoqué est géométriquement axisymétrique, interne ou externe ou au milieu de l'épaisseur du tuyau avec une profondeur de 0,3 mm. Il suffit donc de créer un modèle en deux dimensions,, [7].

Le modèle présenté est formé de quatre états :

- une boîte d'air
- une pièce conductrice soit électriquement (Aluminium) ou bien conductrice magnétiquement (pièce magnétique).

Le schéma de la Figure 3.4 ci-dessous fournit la géométrie en deux dimensions.

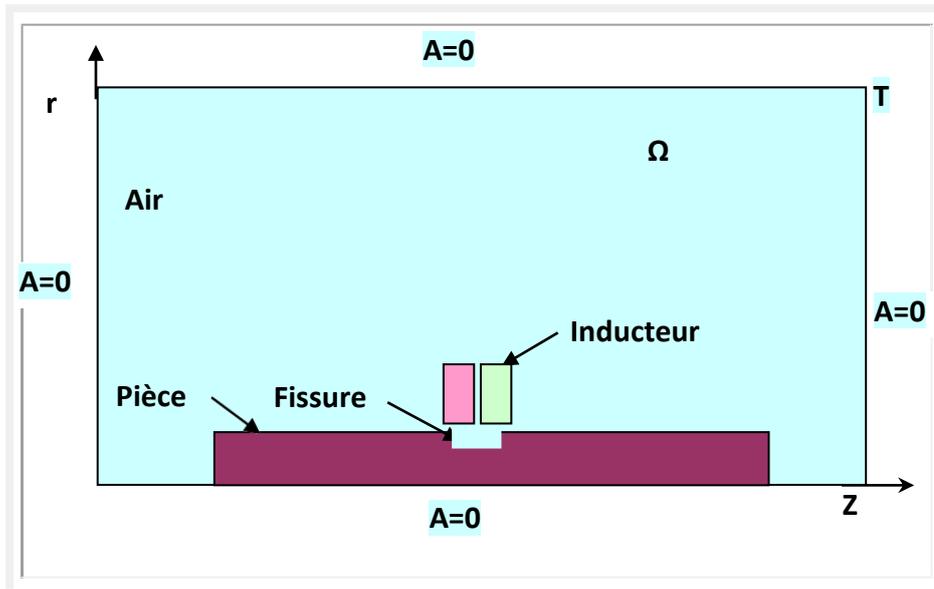


Figure 3.4 : Géométrie du dispositif en 2D

Région Inducteur

On considère deux cas :

- ✓ Une source de tension alimente l'inducteur. Dans ce situation, la tension connue de la source V est le potentiel scalaire ϕ :

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}(\vec{A})\right) = -\operatorname{grad}(V) \quad (3.45)$$

- ✓ L'inducteur est consommé par une cavité de courant de densité J_s d'amplitude connue, dont la distribution est uniforme dans la section du conducteur. L'équation (2.23) devient

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J}_s \quad (3.46)$$

Région conductible (Pièce)

L'équation régissant cette région est :

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0}\operatorname{rot}(\vec{A})\right) = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.47)$$

avec : $-\sigma \operatorname{grad}(V) = 0$ en 2D

Les contraintes résiduelles liées à la température, à l'alliage et à la structure atomique sont des facteurs influençant la conductivité électrique. Par conséquent, les défauts et les incohérences peuvent être considérés comme des changements de conductivité électrique localisés dans la zone testée. La technique CND-CF est utilisée pour détecter les impuretés, les petites brûlures et les micro-soudures en raison de la relation entre cette quantité et le courant induit. L'équation des défauts est donnée selon [80] et [32] comme suit :

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0}\operatorname{rot}(\vec{A})\right) = \sigma d \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.48)$$

3.6 Choix d'une formulation

La formulation duale ci-dessous est la formulation qui valide au mieux les équations de Maxwell [90]. Les problèmes de calcul de CF les utilisent rarement en tant que , sauf en combinaison avec des techniques telles comme les dyades de Green pour les géométries simples, les intégrales de frontière et les éléments à bords finis. Cependant, les formulations potentielles sont les plus courantes [90, 91]. La formulation nodale $(\vec{AV} - \vec{A})$ est l'approche la

plus couramment utilisée lors de l'étude des problèmes de courants de Foucault. Le tableau 3.1 donne un aperçu complet des avantages et des inconvénients associés aux différentes formulations de potentiels.

Tableau 3.1 – Avantages et inconvénients des formulations en potentiels

Formulations	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Points forts	Points faibles
$\vec{A}V - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Régions multiples connexes pas de problèmes	Nombres d'inconnues important
$\vec{T} - \phi$	ϕ	$\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z, \phi$	Faible temps de calcul - Réduction inconnues	Problèmes de régions multiples connexes

3.7 Méthodes de résolution

La simulation est la représentation informatique du comportement d'un système. La modélisation utilise les techniques mathématiques et informatiques spécifiques. Bien qu'elles ne soient pas indépendantes, ces grandeurs physiques sont généralement liées via des équations aux dérivées partielles.

comprendre les éléments physiques impliqués dans les CND par CF permet de créer un modèle mathématique. Ce modèle tire son inspiration des équations de Maxwell. Cette solution peut être numérique ou analytique en fonction de la complexité de la configuration.

3.7.1 Méthodes analytiques

La résolution mathématique précise du problème a été obtenue grâce à la solution analytique des équations de Maxwell. Cependant, cette méthode particulière était limitée dans son applicabilité aux seules formes de base. La recherche menée par Dodd et ses collègues, d'autre part, a donné des solutions directes aux relations susmentionnées.

Cette entreprise comprend les composantes suivantes :

- Serpentin d'air symétrique selon un axe, présentant une structure rectangulaire située entre deux conduits métalliques constitués de matériaux apparemment similaires [7].
- Des bobines de section rectangulaire entourant deux cylindres métalliques coaxiaux [83].

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane [84] ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane [6]. 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. Les méthodes analytiques permettent d'obtenir des résultats très précis avec une grande rapidité de temps de calcul en présence des outils informatiques puissants [7]. L'inconvénient de ces méthodes réside dans la difficulté de la prise en compte des géométries complexes.

3.7.2 Méthodes numériques

Les équations magnétodynamiques qui ont été introduites précédemment sont un ensemble d'équations aux dérivées partielles continues. Afin de résoudre ces problèmes, les techniques numériques suivantes peuvent être utilisées :

Il existe plusieurs méthodes numériques couramment utilisées pour résoudre des problèmes mathématiques, telles que la méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments limites (BEM), la méthode intégrale de volume, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis (FEM). Ces méthodes proposent différentes approches d'approximation de solutions et sont choisies en fonction du problème spécifique et de ses exigences.

3.7.2.1 La méthode des éléments de frontières

Elle est basée sur la méthode des équations intégrales, qui est plus couramment utilisée. [6]. Cette méthode est limitée aux géométries régulières en raison de la difficulté à déterminer la fonction de Green.

3.7.2.2 La méthode des intégrales de volumes

La résolution des équations intégrales mentionnées ci-dessus sert de base à cela. En pratique, la méthode des moments est utilisée pour discrétiser ces équations intégrales. Les grandeurs constitutives et le champ électromagnétique sont supposés être constants dans une cellule cubique élémentaire. La méthode d'inversion itérative est ensuite utilisée pour résoudre ces problèmes numériquement.

3.7.2.3 La méthode des volumes finis

C'est une méthode résiduelle pondérée où la fonction de pondération est égale à l'unité dans un volume fini spécifique. Cette méthode discrète l'équation aux dérivées partielles en intégrant le

volume fini environnant au lieu des noeuds du maillage. Les matrices du système global sont construites par étapes après l'assemblage des équations discrétisées. Cela diffère des matrices globales obtenues par discrétisation des éléments finis, qui sont assemblées élément par élément.

3.7.2.4 La méthode des éléments finis

La transformation d'équations différentielles partielles en un système d'équations algébriques est la base de la MEF. En général, la résolution du MEF implique les étapes suivantes [11 - 12] :

- Le problème doit être formulé de manière variationnelle et l'espace des fonctions des solutions admissibles doit être défini.
- Le maillage consiste à diviser en éléments tels que des triangles, des tétraèdres et des hexaèdres, puis à décrire le champ à l'aide de DDL finis et de activités de base portées localement.
- Un système de matrices creuses est créé en préparant des matrices élémentaires qui doivent être combinées.

3.8 Approximation par la méthode des éléments finis

Ces deux parties principales composent ce chapitre. Le problème du CND CF est abordé pour la première fois. Les limites du domaine sont ensuite définies. L'espace de définition des quantités électromagnétiques et des opérateurs différentiels est déterminé. Toutes les équations de Maxwell sont regroupées dans une structure mathématique constituée de deux séries spatiales. Enfin, des solutions possibles aux problèmes magnétodynamiques sont présentées.

La deuxième partie concerne la solution numérique des équations de Maxwell. Une discrétisation de l'espace des fonctions est développée sur un maillage tétraédrique. Enfin, diverses formulations magnétodynamiques par des potentiels sont présentées en utilisant ces outils pour permettre la résolution de problèmes électromagnétiques,

La littérature scientifique a largement présenté la méthode des éléments fins. Il utilise la discrétisation spatiale (maillage de domaine) et la discrétisation de champ, respectivement. [81].

Les étapes fondamentales de la MEF sont les suivantes :

- ✓ Discrétisation ou subdivision du domaine.

- ✓ Choix des fonctions d'interpolation.
- ✓ Formulation du système d'équation algébrique.
- ✓ Solution du système d'équation algébrique.

Les problèmes de magnétodynamique formulés de façon générale sous la forme suivante sur un domaine Ω de frontière Γ :

$$L(u) = f \quad \text{dans } \Omega \quad (3.49)$$

$$M(u) = g \quad \text{sur } \Gamma \quad (3.50)$$

où L et M sont des

opérateurs différentiels, f et g des fonctions connues et u la variable recherchée.

L'équation (3.49) est une formulation forte qui est souvent difficile à résoudre directement en raison de la dérivation d'ordre supérieur et de la discontinuité des variables considérées. Il est possible de parvenir soit en utilisant la méthode de Galerkinge, soit en réduisant une fonction comme l'énergie dans un modèle physique. Les deux techniques produisent le même résultat :

$$F(u) = \int_{\Omega} N \cdot (L(u) - f) d\Omega = 0 \quad (3.51)$$

où N est la fonction de pondération scalaire ou vectorielle appartenant au même espace. La formulation obtenue est la solution finale à la formulation "faiblement variationnelle". Dans le domaine discrétisé, il existe plusieurs évaluations pour calculer les grandeurs. Cette valeur peut être modifiée à votre convenance : [81].

- Approximation nodale ;
- A travers sa circulation le long des arêtes des éléments;
- Eléments de volume.

Pour un élément e ayant m nœuds, les trois composantes A_x, A_y et A_z du potentiel vecteur magnétique ainsi que le potentiel scalaire électrique \bar{V} sont approximées par :

$$A_s^e = \sum_{j=1}^m N_j^e A_{sj}^e \quad s = x, y, z \quad (3.52)$$

$$V^e = \sum_{j=1}^m \alpha_j V_j \quad (3.53)$$

3.8.1 Subdivision du domaine (discrétisation)

L'interpolation nodale consiste à exécuter une fonction sur les valeurs des inconnues aux nœuds d'un élément. Les éléments peuvent être représentés en quadrilatères ou en triangles unidimensionnels. La résolution avec des éléments triangulaires a été choisie car le modèle était bidimensionnel. Un triangle est composé de trois nœuds qui se fusionnent à ses trois sommets. Comme montrer de la figure (3.5)

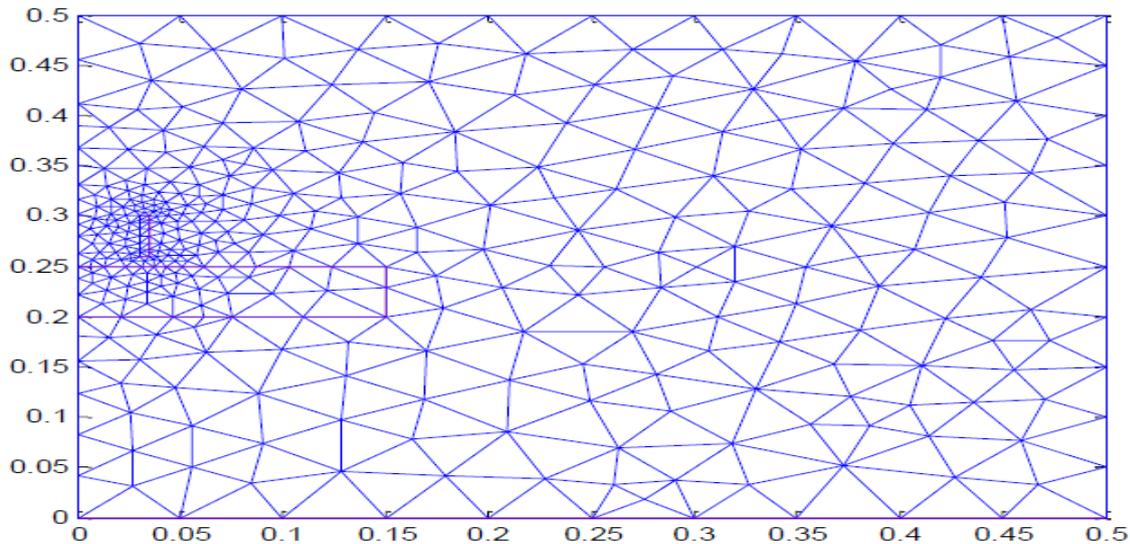


Figure 3.5 Coupe 2D du maillage.

3.8.2 Sélection des fonctions d'interpolation :

La deuxième étape de FEM consiste à "choisir une fonction d'interpolation", qui fournit une approximation de la solution inconnue à l'intérieur de l'élément. L'interpolation est souvent appelée polynôme d'ordre premier (linéaire), second (quadratique) ou supérieur, un polynôme d'ordre supérieur, bien que plus précis, conduit souvent à une formulation compliquée, de sorte que l'interpolation linéaire simple et basique reste largement utilisée. Une fois l'ordre du polynôme choisi, nous pouvons représenter graphiquement l'expression en remplaçant la solution inconnue par un élément appelé "e" sous la forme suivante :

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x, y) f_i \quad (3.54)$$

Avec :

n : numéro de nœuds dans l'élément choisie ;

$\alpha_i(x, y)$: Fonction d'interpolation ;

f_i : Valeur de l'inconnue au nœud i ;

Une importante caractéristique des fonctions d'interpolation α_i l'intérieur de l'élément « e » et en dehors elles sont nulles.

3.8.3 Formulation du système d'équations :

L'équation aux dérivées partielles par MEF est définie par l'équation suivante : [90].

$$\Delta F - g = 0 \quad (3.55)$$

Où :

Δ : est l'opérateur différentiel.

F : la fonction inconnue à déterminer.

g : la fonction de forçage.

La troisième étape, consiste à « formuler le système d'équations algébriques ». Les méthodes utilisées pour dépendre la formulation intégrale sont :

- La méthode variationnelle.
- La méthode des résidus pondérés.

3.8.3.1 Méthode variationnelle

La méthode variationnelle de Ritz consiste à rendre extrémale une fonctionnelle qui est un intégral qui dépend de la fonction inconnue et de ses dérivées. Souvent, cette fonctionnelle représente l'énergie du système. La méthode variationnelle nécessite la connaissance a priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par [3, 7] ;

$$F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (3.56)$$

où ;

L : est la fonction de Lagrange.

$L = \mathbf{w}_c - \mathbf{w}_p$ avec \mathbf{w}_c correspondant à l'énergie cinétique et \mathbf{w}_p étant l'énergie potentielle Ω : représente le usage d'étude.

La réduction de la fonction d'énergie $F(A)$ est donnée par le principe de Rayleigh-Ritz [7], qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_3} \dots \dots \dots \frac{\partial F(A)}{\partial A_N} = 0 \quad (3.57)$$

Avec

N : Nombre de nœud du domaine. i

A : Inconnue au nœud i du domaine.

3.8.3.2 Méthode des résidus pondérés

Les équations aux dérivées partielles de la solution exacte U_{ex} peuvent être résolues à l'aide d'une solution approchée U , soit : [3]

$$L(U_{ex}) = f_v \quad \text{sur } \Omega \quad (3.58)$$

Il s'agit de façon générale, elle est de forme :

$$U = \sum_i^n a_i P_i(x) \quad (3.59)$$

avec ;

a_i ($i= 1, 2, 3, \dots, n$) , montrent les paramètres d'approximation..

$p(x)$ est une fonction polynomiale ou trigonométrique connue qui est linéairement indépendante.

En utilisant directement les équations aux dérivées de résoudre par cette technique, il est possible sans utiliser le principe variationnel. La technique implique dans l'équation aux dérivées partielles sur une base de fonctions β_i et d'imposer la condition :

$$\int_{\Omega} B_i R D \Omega = 0 \quad (3.60)$$

où ;

β_i sont des fonctions de pondération indépendantes [8]:

✓ La technique consiste à répartir des points en utilisant la fonction de pondération de Dirac. Forcer l'annulation des déchets à chaque pont ou approximation de la solution [1, 3].

✓ La méthode de Galerkin est utilisée. Choix de la même fonction de projection que la fonction approximative crée un système algébrique symétrique et facilite sa résolution. [72]

3.8.3.3 Méthode de Galerkin

Nous utilisons la méthode de Galerkin pour résoudre l'équation. Dans le cas d'un système axisymétrique, nous effectuerons les ajustements des variables ci-dessous [66] ;

$$A = r.A_0 \quad (3.61)$$

$$\Psi_i = \frac{\alpha_i}{r} \quad (3.62)$$

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

$$\alpha_i = \frac{1}{2\Delta^e} (a_i + b_i r + c_i z) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.63)$$

en remplaçant x par r et y par z tout en introduisant l'équation (3.43), on obtient la forme intégrale suivante en régime harmonique:

$$\frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega \quad (3.64)$$

avec ;

$$d\Omega = 2\pi r dr dz$$

En d'autres termes, on a ;

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} j\omega \sigma \frac{A}{r} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} J \right] d\Omega = 0 \quad (3.65)$$

Le processus d'intégration partielle des termes aux dérivées secondes est plus simple. Les intégrales aux limites sont incluses dans cette forme, ce qui permet de clarifier les règlements naturelles aux limites :

$$\left\{ \begin{aligned} & \mu \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A}{\partial r} \right] \frac{dr dz}{r} + \mu \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(\mu \int_T \left[\frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{dT}{r} - \mu \int_T \left[\frac{\partial A}{\partial z} \alpha_i \cos(n, z) \right] \frac{dT}{r} \right) \\ & + \int_{\Omega} j\omega \sigma \alpha_i A \frac{dr dz}{r} - \int \alpha_i J dr dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \mu \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(\int_T v \left[\frac{\partial A}{\partial r_i} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{dT}{r} - \mu \int_T \left[\frac{\partial A}{\partial z} \alpha_i \cos(n, z) \right] \frac{dT}{r} \right) \\ & + \int_{\Omega} j\omega \sigma \alpha_i A \frac{dr dz}{r} - \int \alpha_i J dr dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.67)$$

3.8.3.4 Résolution de l'équation électromagnétique par la MEF

Dans notre cas qui est axisymétrique, on fait les changements de variables suivants :

$$\sum_{j=1}^n \left(v \int_{\Omega} \left[\text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(\alpha_j A_j) \right] \frac{dr dz}{r} \right) = \int_{\Omega} \alpha_i J dr dz \quad (3.68)$$

$i=1, \dots, n$

Donc, l'équation algébrique s'écrit décidément sous la conformation matricielle suivante :

$$[M][A] = [K] \quad (3.69)$$

Avec :

$$M_{ij} = \int_{\Omega} v \text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(\alpha_j) \frac{dr dz}{r} = \frac{1}{R_{eq}} \int_{\Omega} v \text{grad}(\alpha_i) \text{grad}(\alpha_j) dr dz \quad (3.70)$$

$$\iint_{\Omega} K_i = \alpha_i J dr dz \quad (3.71)$$

Où : R_{eq} est la valeur moyenne du rayon r dans l'élément :

$$R_{eq} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \quad (3.72)$$

$[A]$ est le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel magnétique modifié aux nœuds du maillage. Il est obtenu par la résolution du système d'équations algébriques. Après avoir déterminé le potentiel vecteur pour tous le maillage on peut déterminés les autres paramètres, l'induction magnétique, champ magnétique, les courants induits et l'impédance du capteur. Le contrôle par les courants de Foucault dépend au 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. [81].

3.8.4 Résolution du système

Pour résoudre les équations de Maxwell, MEF nécessite la résolution synchronique d'un élevé nombre d'équations. Enfin, un schéma classique représentant les différentes étapes de la modélisation utilisant la méthode des micro-éléments est présenté à la figure 3.6.

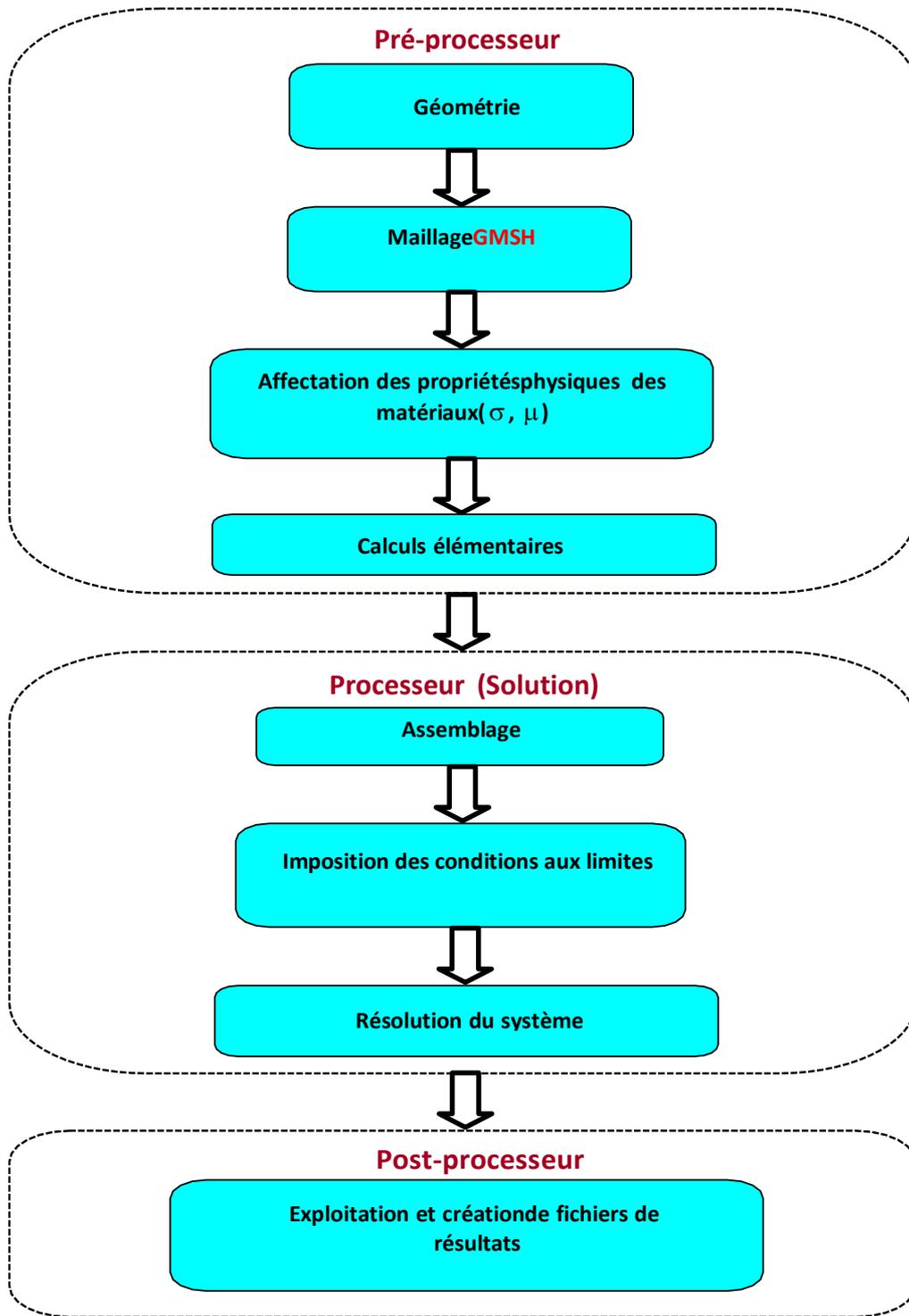


Figure 3.6 – Mise en œuvre de la simulation MEF.

Le noyau du modèle éléments finis 3D ainsi décrit a été développé et implanté sous environnement Matlab. Ce modèle a déjà été validé, en termes d'inductions et de potentiel vecteur magnétique, sur des configurations de workshops ne contenant pas de fissure. Nous allons le tester sur des cas contenant des fissures volumiques minces une fois que le calcul de la variation d'impédance sera décrit. [71].

3.9 Calcul de la variation d'impédance

Il est nécessaire de passer par la mesure d'une grandeur adhérent, dans cette situation :

- la mesure de l'induction, généralement effectuée par l'effet Hall
- mesurer l'impédance

Il a été décidé de calculer l'impédance pour mesurer le changement d'impédance de la bobine dans l'expérience. Pour commencer, il est nécessaire capable de calculer le champ électrique avec et sans défaut. Ensuite, calculer la variation de l'impédance avec et sans défaut doit être trouvée. Z est l'impédance de la sonde et ΔZ est sa variation.

3.9.1 Méthode directe

Une seule spire (sonde) de rayon r portant un courant alternatif I_S est donnée par :

$$Z = V/I_S \quad (3.73)$$

Où V est la tension induite dans la bobine comme:

$$v = - \int E \, dl \quad (3.74)$$

A partir l'équation (3.74) en régime harmonique, on a ;

$$E + \frac{\partial A}{\partial t} = -grad(\Phi) \quad (3.75)$$

On obtient ;

$$E = -j\omega A - grad(\Phi) \quad (3.76)$$

En outre, la tension induite n'est pas affectée par le potentiel scalaire ($grad(\Phi) = 0$), en continueur(3.75) dans (3.76), on en déduit ;

$$\Phi = j\omega \int E \, dl \quad (3.77)$$

A partir de l'équation (3.77), est donnée par la relation suivante ;

$$z = j\omega \int E \, dl / I_s \quad (3.78)$$

Pour une bobine de rayon avec une seule spire r , on écrit ;

$$z = i \frac{2.\pi.\omega.r.A}{I} \quad (3.79)$$

Il existe deux parties à l'impédance d'un transducteur : la partie réelle, qui est la ténacité, et la partie imaginaire, qui est la réaction.

Le potentiel vecteur magnétique peut être approximé par la valeur centrale A_{ci} et r_{ci} si les

grandeurs de ces éléments sont petites. En utilisant l'équation (3.79), on peut calculer l'impédance de chaque spire de l'élément i . [93] ;

$$z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci}}{I} \quad (3.80)$$

Par la formule suivante est donnée l'impédance totale (i) de toutes les spires de l'échantillon et le nombre total de spires de l'échantillon est N , la densité des spires de l'échantillon est N_t et la surface de l'échantillon est a_i :

$$z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot N_t \cdot a_i}{I} \quad (3.81)$$

Alors l'impédance total est donnée par:

$$z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot N_t}{I} \sum_{l=1}^{N_c} a_i \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \quad (3.82)$$

3.9.2 Méthode de l'énergie

On sait que l'impédance est constituée de deux parties : une partie réelle dite par la résistance et une partie imaginaire dite par l'inductance.

$$R = P / I^2 \quad (3.83)$$

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

$$P = \frac{1}{2} \int_v \frac{J^2}{\sigma} dV = \frac{1}{2} \int_v \frac{\bar{J} \cdot \bar{J}^*}{\sigma} dV \quad (3.84)$$

comme $J = \sigma E \Rightarrow J = -\sigma j \omega A$

$$P = \frac{\omega^2}{2} \int_v \sigma A A^* dV \quad (3.85)$$

La remplacement des équations (3.84) et (3.85) donne :

$$R = \frac{\omega^2}{2} \int_v \frac{\sigma A A^*}{I} dV \quad (3.86)$$

La réductance telle que :

$$X = 2\omega \frac{W_m}{I^2} \quad (3.87)$$

L'énergie électromagnétique déposée est donnée comme suit :

$$w_m = \frac{1}{2} \int_{\nu} B.H d\nu \quad (3.88)$$

$$w_m = \frac{1}{2} \int_{\nu} \frac{1}{\mu} B.B^* d\nu \quad (3.89)$$

$$w_m = \frac{1}{2} \int_{\nu} A.J d\nu \quad (3.90)$$

Par changement des deux équations (3.87) et (3.90) en obtins :

$$X = \omega \int_{\nu} A.J^* \frac{d\nu}{I^2} = \omega L \quad (3.91)$$

où, L est l'inductance de la bobine.

L'impédance du capteur est donné par :

$$Z = R + jX \quad (3.92)$$

Notez que la zone étudiée est symétrique par rapport à la rotation, de sorte que l'étude peut être restreinte à la moitié du domaine et que les conditions de Dirichlet s'appliquent à ses limites. [91].

3.10 Applications et simulations

Nous avons développés un programme, sous environnement MATLAB pour résoudre le problème formulé précédemment par la méthode des éléments finis. La Figure 3.7 illustre le programme développée.

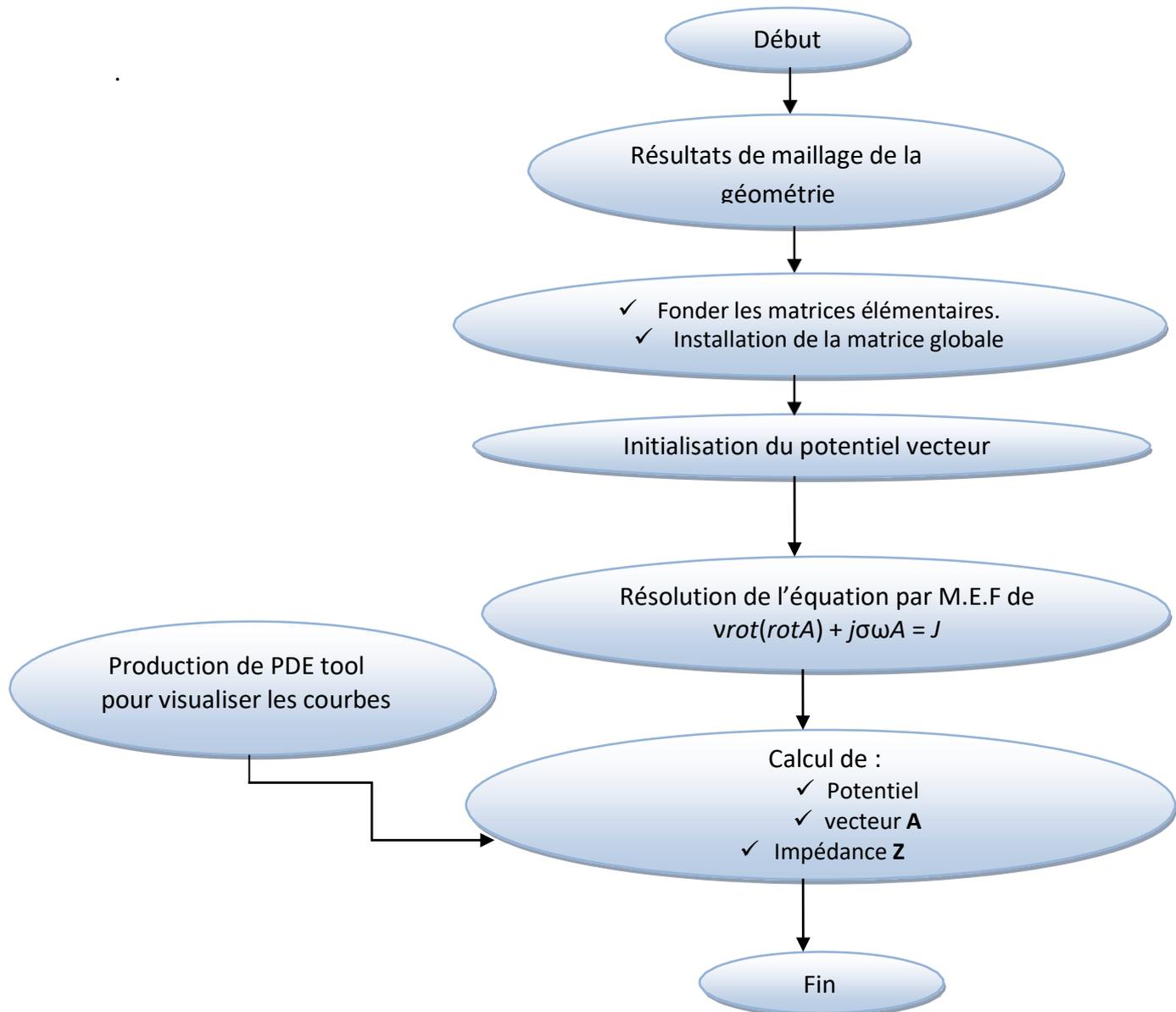


Figure 3.7 : Organigramme du bloc électromagnétique [41].

3.10.1 Modèle proposé

Notre objectif est de simuler de la variation d'impédance pour des défauts donnés. Nous finirons par montrer les fondements de construction de bases de données pour l'inversion.

Le champ magnétique s'étend théoriquement à l'infini ($A = 0$), mais la limite théorique doit être réduite à une distance finie, comparable aux exigences de précision, pour les besoins de la modélisation magnétique. Le dispositif étudié, qui est constitué d'un tube cylindrique creux, est illustré à la figure 3.8.

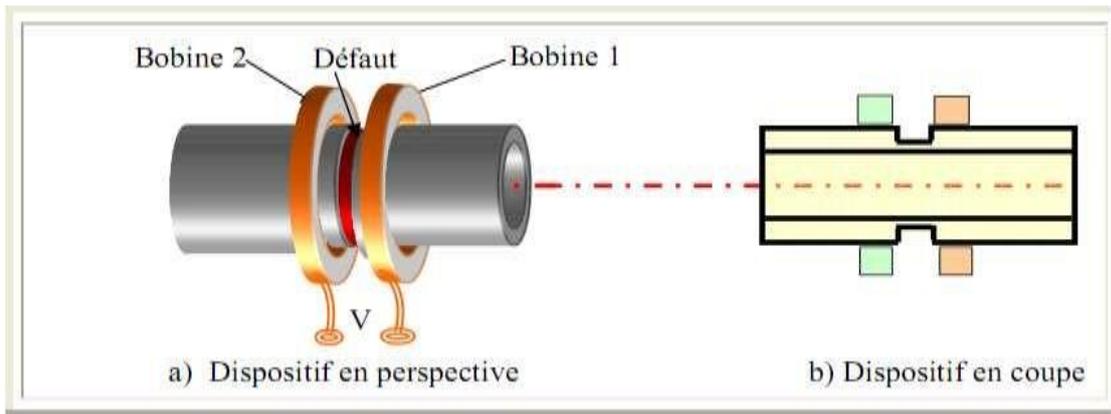


Figure 3.8 : Modèle complet en coupe et en perspective, [2].

Nous effectuons des changements de position du capteur à faible pas de 0,5 mm ou 1 mm le long ou à travers la fissure sur la surface de la pièce. Nous adoptons le terme "déplacement" du capteur pour indiquer de tels changements de position. Un scan unidimensionnel est ainsi réalisé le long de la fente ($y = 0$), nous calculons tout d'abord les potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique en exploitant l'équation (3.91).

Nous présentons dans la figure 3.9 les signaux CF, en l'occurrence la variation de la résistance, enregistrés sur la plaque d'Aluminium de 5 mm de profondeur, de 10 mm de longueur et de 0,20 mm d'épaisseur. Ces signaux constituent la signature de la fente.

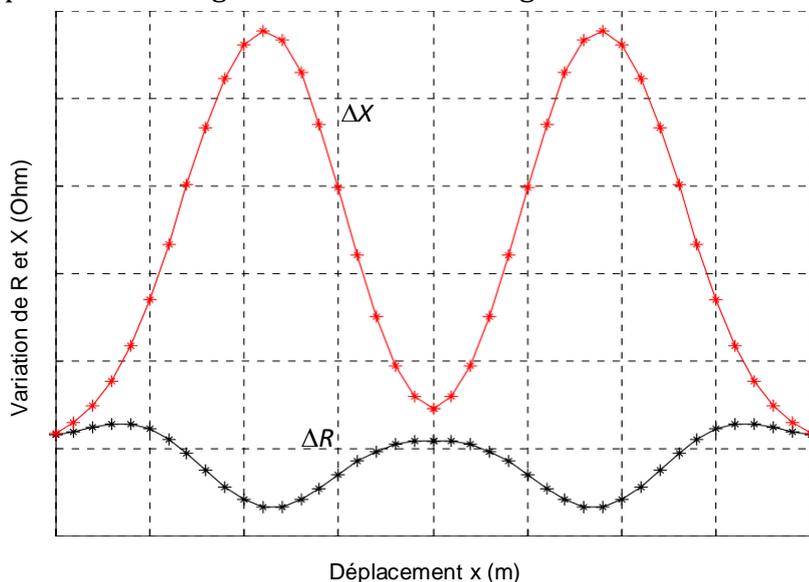


Figure 3.9. Signature de la fissure : Tracé des variations de la résistance et de la réactance de l'impédance du système en fonction de la distance balayée par le capteur.

3.10.1.1 Techniques de maillage

Elle peut avoir un impact direct sur la précision des résultats. Ainsi, le choix du maillage est essentiel.

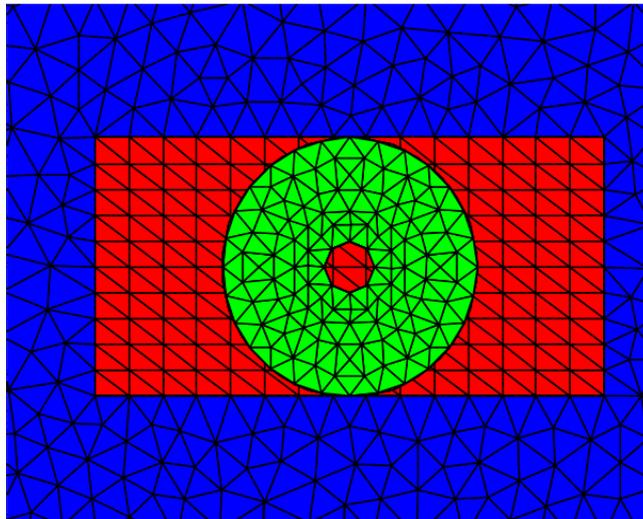
Les caractéristiques suivantes sont les principales des maillages [81].

- la **régularité** : la qualité des éléments du maillage doit être bonne et suffisamment régulière, afin de minimiser l'approximation réalisée par la méthode des éléments finis ;
- la **souplesse** : on doit pouvoir mailler plus finement certaines zones de la pièce où les phénomènes que l'on désire étudier sont « plus fins » ;
- la **rapidité** : la rapidité d'un mailleur à créer un maillage est un paramètre important, qui prend encore plus de poids lorsque l'on désire développer un remailleur automatique.
- la **capacité à évoluer** : il doit être suffisamment « modulable » pour pouvoir générer de nouveaux types d'éléments, ou lui imposer une structure particulière.

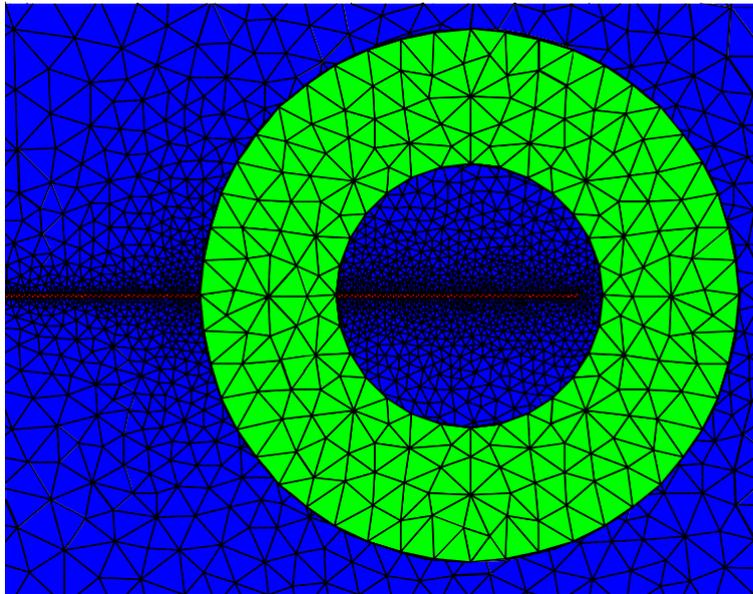
3.10.1.2 Méthode de la bande géométrique

Cette méthode correspondant à la portée du déplacement du capteur, cette bande est ensuite subdivisée en sous-régions élémentaires. Ainsi, le déplacement du capteur est remplacé par le déplacement de la sous région affectée constituant la fissure dans la bande géométrique.

Les figures 3.10 et 3.11 illustrent la méthode de la bande géométrique pour deux scans différents, le premier transversalement par rapport à la fissure et le second le long de la fissure.



Figures 3.10. Illustration de la méthode de la bande géométrique pour un scan transversalement à la fissure (suivant l'axe Oy).



Figures 3.11. Illustration de la méthode de la bande géométrique pour un scan le long de la fissure (suivant l'axe Ox).

3.10.1.3 Benchmark TEAM Workshop N°15-1

Le résultat expérimental de ce benchmark donne les variations de la résistance ΔR et de l'inductance ΔL , donc de l'impédance $\Delta Z = Z_f - Z_0$, avec Z_f est l'impédance de la bobine en présence de la fissure et Z_0 l'impédance de la bobine sans fissure.

Le problème consiste donc à déterminer par le modèle précédemment décrit, la variation d'impédance ΔZ . Un scan unidimensionnel est réalisé le long de la fente ($y = 0$). Nous calculons tout d'abord les potentiels vecteurs magnétique et scalaire électrique en chaque position, puis nous déduisons la variation d'impédance en exploitant l'équation (3.92). Sur la figure 3.12 nous présentons un zoom sur le maillage dans la zone de la fissure à une disposition du centre de la cylindre ($x=6 \text{ mm}$; $y=0$).

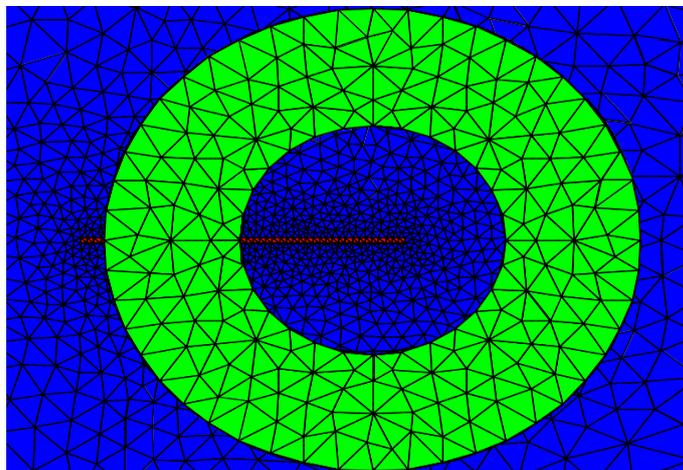


Figure 3.12. Zoom du maillage dans la zone de la fissure.

La figure 3.13 montre la concession du module du potentiel vecteur magnétique à la même disposition du centre de la bobine ($x=6 \text{ mm}$; $y=0$).

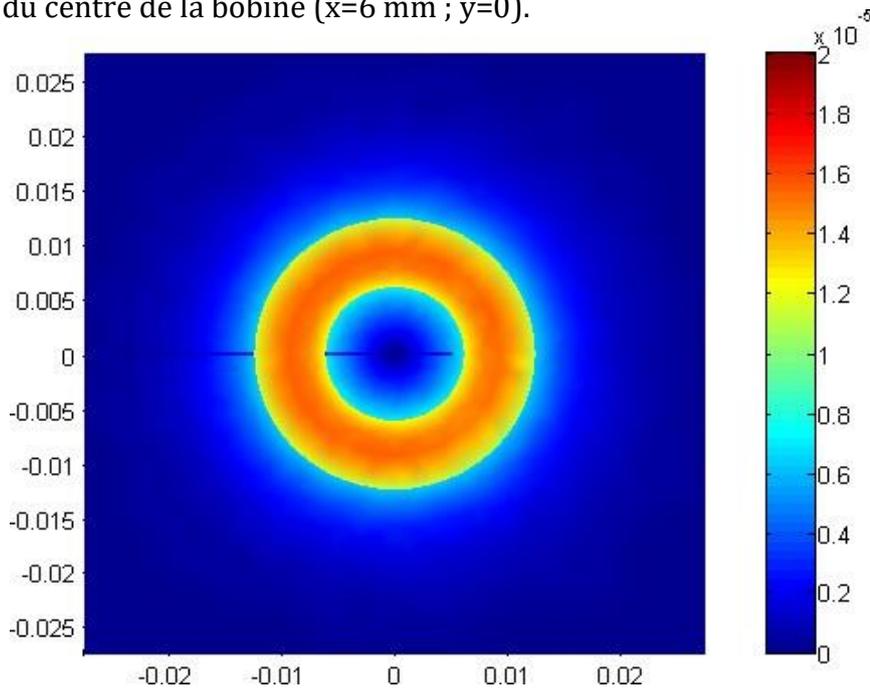


Figure 3.13. Module du potentiel vecteur magnétique.

Nous présentons sur les figures 3.14 et 3.15 les variations successivement de la partie réelle (ΔR) et la partie imaginaire de l'impédance de la bobine. Sont comparés aux données expérimentales du benchmark les résultats est donnée comme suit :

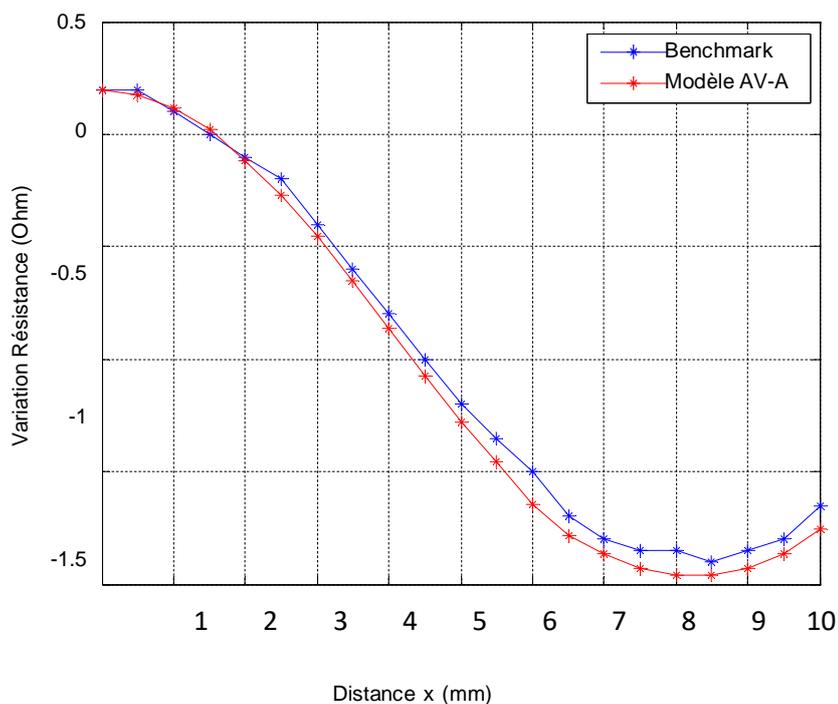


Figure 3.14. Variations de la résistance.

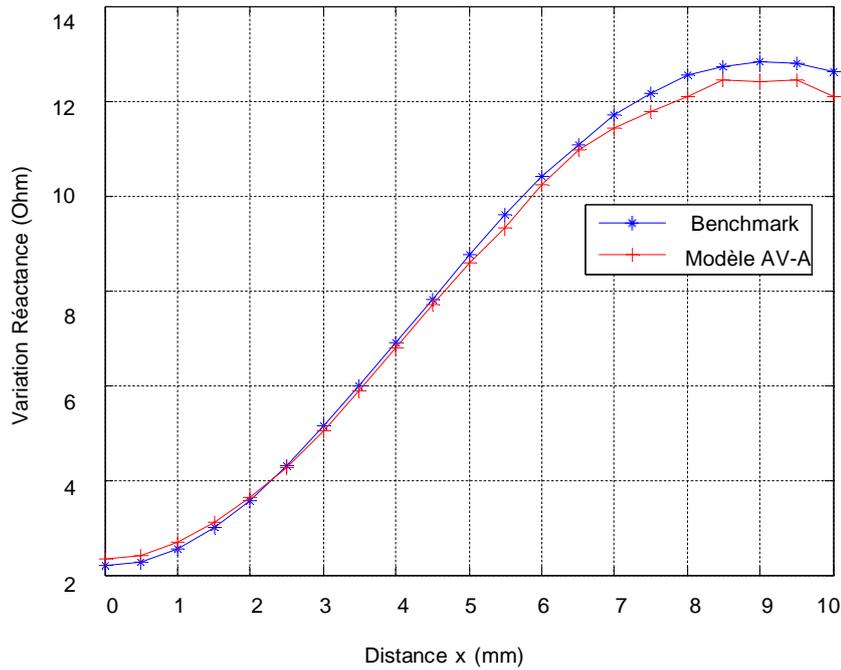
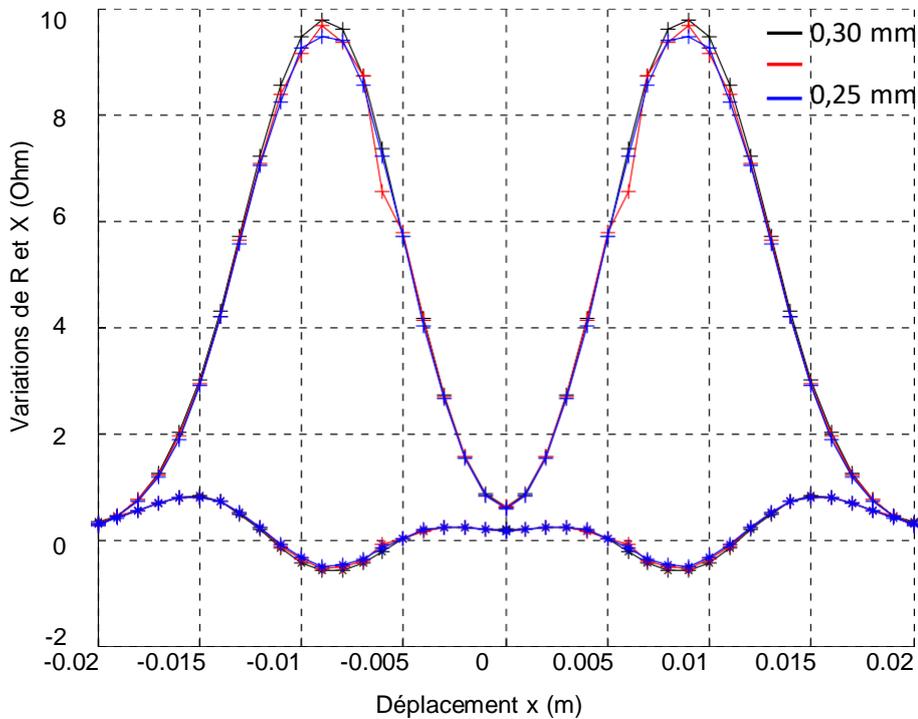


Figure 3.15. Variations de la réactance.

3.10.1.4 Effet de l'épaisseur de la fissure sur le signal CF

Nous présentons sur la figure 3.16 les signatures CF produites par trois fissures de 0,30 mm, 0,25 mm et 0,15 mm d'épaisseurs et ayant les mêmes profondeurs et les mêmes longueurs.



Figures 3.16. Signatures CF pour trois fissures de 0,30 mm, 0,25 mm et 0,15 mm d'épaisseurs ayant les mêmes profondeurs et les mêmes longueurs.

3.10.2 Développement du modèle direct

Dans le cas général, 2D du système dépourvue de fissure est réalisée. Le modèle électromagnétique adopté est celui du potentiel vecteur magnétique. [31].

Pour déterminer les paramètres non identifiés de la pièce, nous utilisons une bobine circulaire plate type pancake. Sur la figure 3.17 est présenté le système considéré.

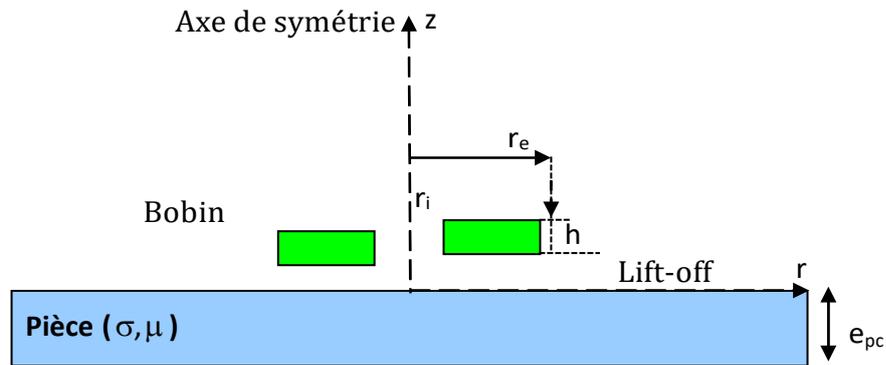


Figure 3.17 – Système axisymétrique bobine – pièce.

Le système étant axisymétrique, il est donc invariant par rotation autour de l'axe Oz. Ainsi la densité de courant \vec{J} , le vecteur potentiel magnétique \vec{A} et le champ électrique \vec{E} sont colinéaires et sont perpendiculaires au plan d'étude (Orz).

La résolution de (3.42) est effectuée en développant un programme de calcul par éléments finis implémenté sous environnement MATLAB en utilisant quelques fonctions de sa toolbox « pde » (figure 3.18).

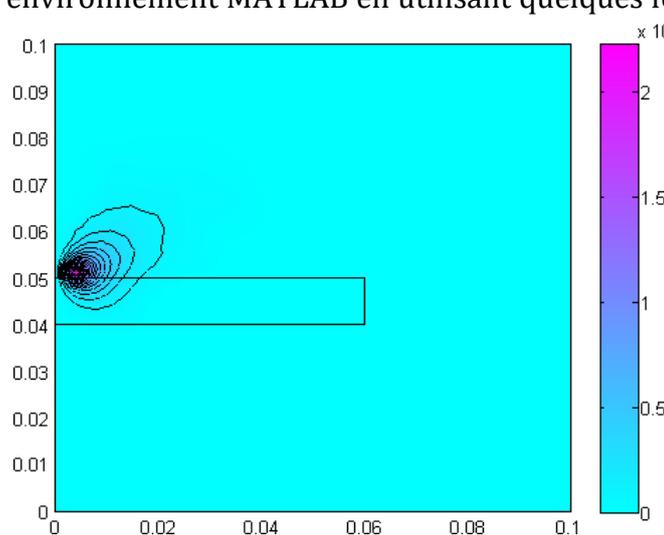


Figure 3.18. Iso-valeurs du potentiel vecteur magnétique.

3.10.3 Impédance normalisée

Les grandeurs suivantes caractérisent le capteur (bobine) inductif : la pâteuse résistive R qui comprend les deuils par CF provoquées par la acuité du champ et les deuils internes du

enroulement d'excitation [71].

En utilisant l'équation 3.92, qui existencede d'impédance normalisée Z_n qui se retenu par :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0}$$

Elle dépend exclusivement par des principes de la cible. Dans le schéma d'impédance unifiée en traçant X_n en fonction de R_n (figure 3.19).

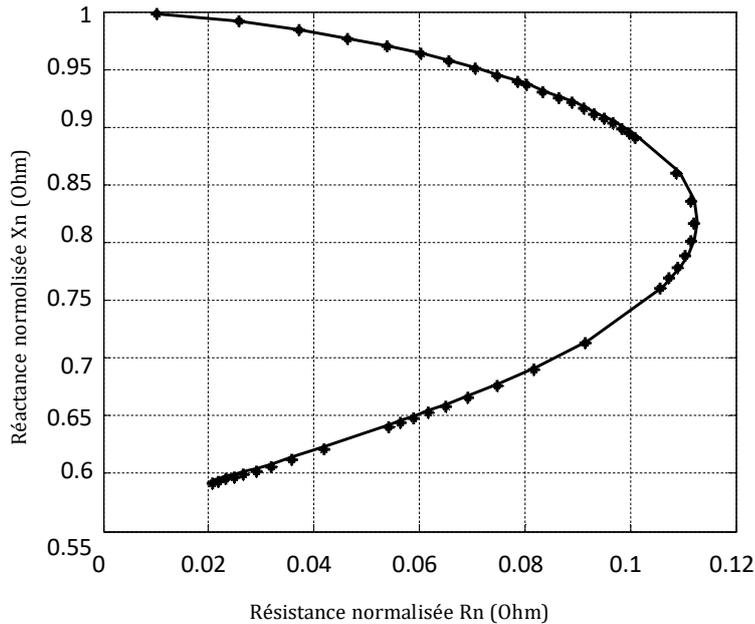


Figure 3.19. Diagramme d'impédance normalisée.

La figure 3.20 renommé l'allure des trajets que exposé le repère d'impédance de la bobine.

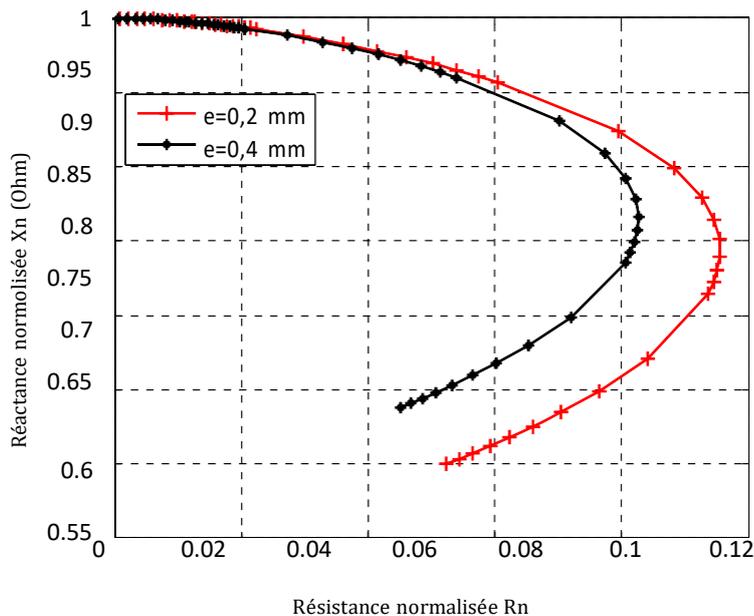


Figure 3.20. Diagramme d'impédance normalisée pour deux épaisseurs de revêtements.

Après minimisation de la fonction coût, nous constatons la juxtaposition des digrammes d'impédance normalisée calculé et mesuré (figure 3.21).

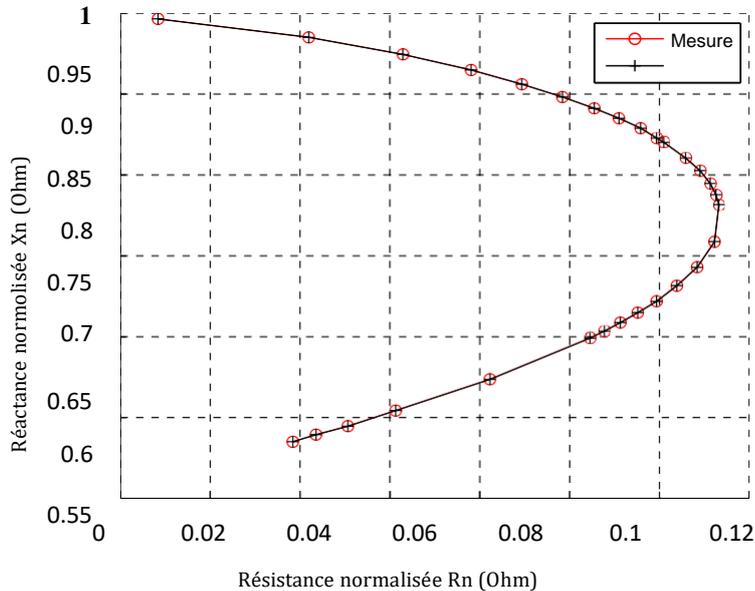


Figure 3.21. Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré.

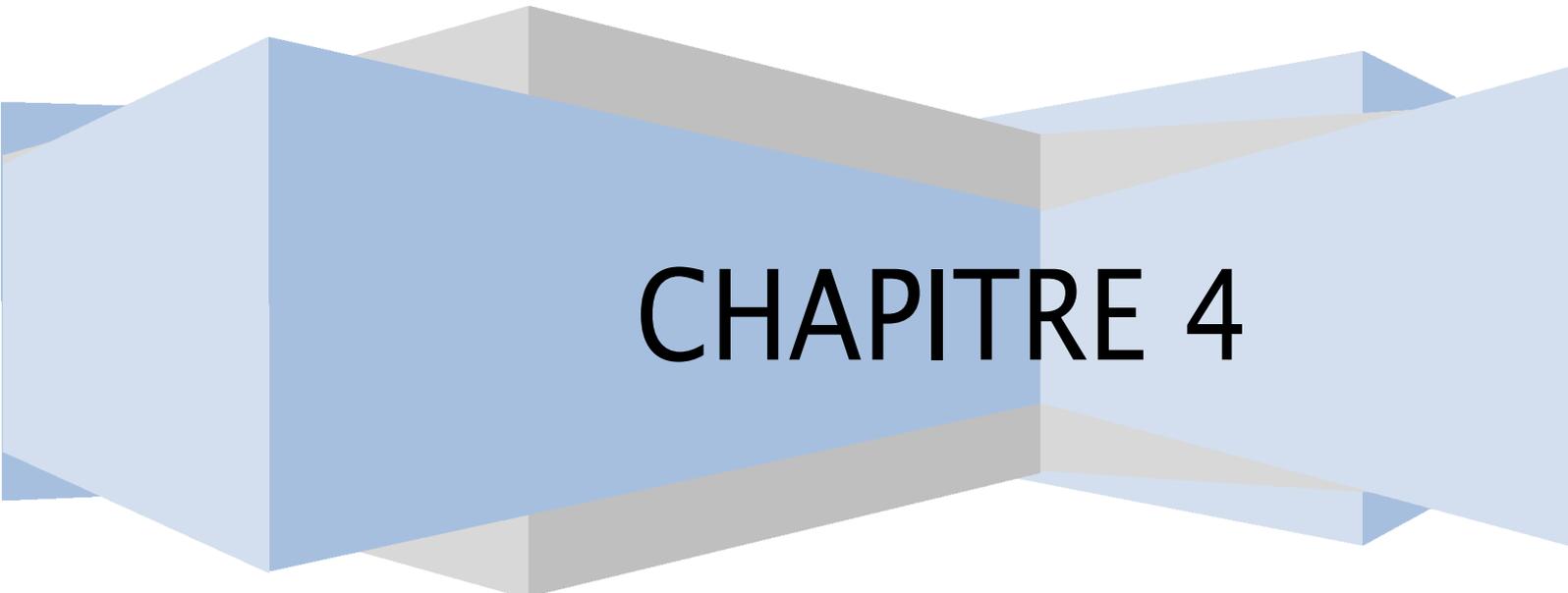
La deuxième étape de la stratégie pour la caractérisation non destructive par CF des fissures dans les pièces critiques a été développée. Les paramètres physiques de la pièce contrôlée ont été évalués pour la modélisation 3D. A travers cette approche, une modélisation en 2D éléments finis du système (bobine +matériau) dépourvue de fissure a été réalisée.

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné les notions de base de l'électromagnétisme ainsi que les équations de Maxwell régissant les phénomènes électromagnétiques. Pour résoudre ces équations à dérivées partielles, on a développé dans la deuxième partie de ce chapitre la méthode numérique des éléments finis basée sur la formulation en potentiel vecteur magnétique (configuration axisymétrique)

Un modèle éléments finis permettant de résoudre des problèmes de CND par courants de Foucault en présence de défauts a été présenté. Deux formulations duales en termes de potentiels combinés ont été établies en utilisant des éléments de Whitney nodaux et d'arêtes. Une technique originale qui permet de prendre en compte des défauts de faible ouverture (fissures) a été développée.

Au cours de cette modélisation, la simulation du impulsion a été prise en compte par la méthode de la bande géométrique en 3D. Cette méthode se trouve facilitée par l'utilisation de l'option "Trans-finite" du mailleur GMSH.

An abstract graphic design featuring several overlapping, three-dimensional geometric shapes. The shapes are primarily light blue and grey, with some darker blue accents. They are arranged in a way that creates a sense of depth and perspective, resembling a stylized architectural structure or a modern logo. The shapes are centered horizontally and occupy the lower half of the page.

CHAPITRE 4

Chapitre 4

Problème inverse des systèmes (CND-CF)
Optimisé par essaim des particules (PSO)

4.1 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 problèmes 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

Les problèmes inverses attirent de plus en plus l'attention des chercheurs théoriciens et expérimentateurs vu leurs applications concrètes 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 étudiés [91]. En effet, l'inconnue d'un problème inverse peut être le domaine géométrique occupé par le système physique étudié, des paramètres intervenant dans le modèle mathématique comme certaines propriétés de la structure, des termes sources, ou des conditions initiales. Prenons l'exemple des équations qui décrivent les phénomènes électromagnétiques. Dans le problème directe (CND), les variables d'entrée sont les paramètres physiques du système (géométrie, propriétés physiques,...etc.) et les paramètres sources (intensité, fréquence), D'autre part, les variables de sortie sont, le champ magnétique, l'impédance ...etc. Dans le cas du problème inverse (END) connaissant le résultat, c'est-à-dire la sortie du système par exemple l'impédance, l'objectif est de retrouver les paramètres d'entrées tels les propriétés physiques ou géométriques [92].

Ce quatrième chapitre est consacré à la caractérisation de fissures à partir de technique d'inversion. Il constitue donc le dernier maillon de la stratégie globale de caractérisation des fissures. Une inversion de données, réalisée par l'optimisation par essaims particulaires nous permet ainsi de caractériser complètement une fissure débouchant. En règle générale, l'optimisation peut s'appliquer à divers domaines, tout en ayant toujours pour but principal d'améliorer les opérations en améliorant la gestion des ressources. L'optimisation peut intervenir à n'importe quel stade du processus, mais il est préférable qu'elle soit effectuée jusqu'à la fin de l'opération.

Aujourd'hui, l'optimisation est largement utilisée dans une variété de domaines scientifiques tels que le contrôle, la robotique, l'aérodynamique, la consommation d'énergie, etc. Les

algorithmes métaheuristiques sont parmi ces approches les algorithmes standard proposés pour résoudre une variété de problèmes complexes et hautement non linéaires, sans qu'il soit nécessaire de modifier profondément l'algorithme pour chaque problème à résoudre.

Voici un résumé des caractéristiques distinctives de ces techniques : [81].

- Application générale possible à une large classe de problèmes.
- Efficacité pour de nombreux problèmes.
- Possibilité de compromis entre qualité des solutions et temps de calcul.

L'optimisation par essaims particulaires (PSO: Particle Swarm Optimization) est l'une des métaheuristiques d'optimisation la plus utilisée, elle est proposée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Elle est basée sur le comportement des déplacements d'un essaim d'oiseaux ou de poissons pour la recherche de nourriture. Elle génère un essaim de particules dont chaque membre est une solution éventuelle du problème d'optimisation. Cet essaim vole dans l'espace de recherche (à n dimensions) et chaque membre de celui-ci est attiré par sa meilleure solution.

L'objectif de ce travail est l'étude et l'application des algorithmes PSO dans le domaine du contrôle. On a essayé de commander un bras manipulateur à trois degrés de liberté en utilisant trois commandes basées sur le mode glissant, une commande classique, une commande par logique floue et une commande adaptative floue. Une fois les lois de commande développées, on a constaté que les performances de poursuite sont liées directement au choix des valeurs des paramètres ajustables utilisés. Pour ces raisons, on a utilisé trois algorithmes d'optimisation à base de PSO qui sont : le PSO classique, le PSO à convergence rapide (FCPSO :Fast convergence particle swarm optimisation en anglais) et le PSO hybride (GA-PSO) pour augmenter les performances de poursuite et pour déterminer le meilleur algorithme pour ce type de problèmes d'optimisation.

4.2 Problème Inverse :

Le problème inverse a pour objectif de reconstruire un ou plusieurs paramètres de la cible, qui sont inconnus à partir de la réponse du capteur. Pour remonter aux grandeurs d'intérêt à partir des grandeurs observées (différentes acquisitions issues du capteur CF), il faut naturellement connaître la relation de dépendance les liant. Cette logique implique l'existence de deux grandes étapes dans la résolution de tout problème inverse :

- ✓ Un modèle direct doit être créé et développé pour relier les caractéristiques physiques et géométriques du composant testé à un signal CF qui reflète la réalité physique et est adapté à

l'inversion.

✓ Sur la base de la résolution de ce modèle direct, les quantités observées ont été inversées.

La figure 4.1 représente de manière générale le schéma d'étude de tout problème inverse.

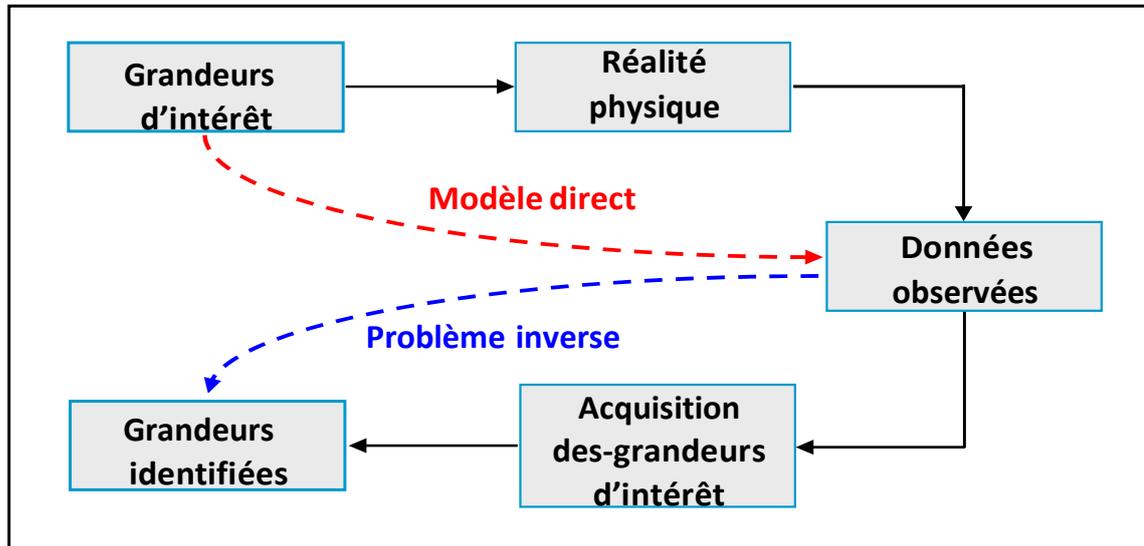


Figure 4.1. Schéma d'étude général d'un problème inverse.

Les méthodes inverses recherchent généralement des quantités faciles à observer à partir de quantités difficiles à mesurer. Il est difficile de mener une étude bibliométrique représentative de cette diversité car le champ d'application est si vaste. Les mathématiciens, les statisticiens, les géophysiciens, les mécaniciens, les ingénieurs, les électroniciens,, etc. sont intéressés par les problèmes inverses [111].

4.2.1 Problème à caractère mal posé :

Les problèmes inverses sont souvent mal posés, ce qui rend difficile leur solution mathématique. S'il manque l'une des trois conditions suivantes :

- ✓ Un problème est considéré comme mal posé. Ces conditions comprennent l'existence d'une solution pour toutes les données d'entrée,
- ✓ Ainsi que l'unicité (incertitude) de la solution.
- ✓ La stabilité de la solution est assurée.

Les trois conditions susmentionnées peuvent ne pas être remplies pour diverses raisons :

- ✓ Telles que des données d'observation incorrectes,
- ✓ Des données d'observation sans suffisamment d'informations utiles (données non

pertinentes),

- ✓ Des erreurs de modélisation ou des approximations grossières de la réalité physique,
- ✓ Ou un choix inapproprié de la zone de représentation des données.

Les conditions d'existence ne sont pas importantes dans la pratique car elles sont recherchées dans un espace bien défini. Cependant, il n'est pas toujours possible de garantir l'unicité et la stabilité. La condition de stabilité est que la solution soit une fonction continue des données, mais dans de nombreux problèmes inverses, une légère perturbation des données peut entraîner une modification soudaine de la solution.

Pour lever le problème d'unicité, nous travaillons en multifréquence, donc au lieu d'utiliser une seule mesure correspondant à une seule fréquence, nous utilisons un ensemble de mesures correspondant à une multitude de fréquences. [77].

Les problèmes inverses sont très fréquemment exprimés sous forme d'un problème d'optimisation ou plus exactement de minimisation de fonction objectif.

Dans le cas de notre étude, l'algorithme du « *Simplex* », appelé « Downhill simplex method » dû à Nelder et Mead, qui s'applique aux fonctions à plusieurs variables, est le plus adapté. [79].

La méthode du simplexe considère une forme géométrique composée de $(n+1)$ points, de leurs lignes connectées et de faces polygonales de n dimensions. En général, le simplexe est un polyèdre à $(n + 1)$ sommets. Chaque fois qu'une itération est effectuée, une nouvelle simplexe est trouvée qui se rapproche du minimum de la fonction objectif. Le simplexe est un triangle en trois dimensions, c'est-à-dire en $n = 2$, et un tétraèdre en trois dimensions, mais pas nécessairement régulier. En général, notre intérêt se limite aux formes géométriques non dégénérées, c'est-à-dire celles ayant un volume interne fini.

4.2.2 Stratégie de traitement du problème inverse :

Un phénomène électromagnétique est caractérisé par des équations d'état, comme indiqué dans la référence [81]. Le schéma fonctionnel d'un système CND par courants de Foucault est illustré à la figure 4.2.

Les variables de sortie du problème direct peuvent être mesurées comme l'impédance. Les variables d'entrée incluent des paramètres physiques tels que la géométrie de la bobine et de la charge, ainsi que des propriétés physiques. Des sources telles que l'intensité et la fréquence sont également des variables d'entrée importantes.

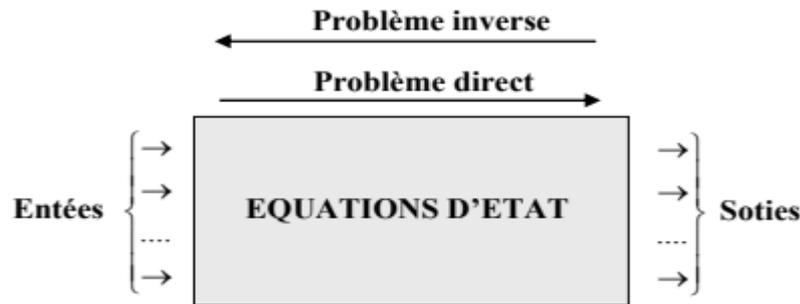


Figure 4.2. Schéma fonctionnel d'un système de CND.

Tout d'abord un modèle direct du système (matériau + bobine) doit être établi dans le but de calculer l'impédance du capteur en fonction des grandeurs d'intérêts pour des configurations connues. Le modèle est ensuite validé moyennant des mesures d'impédance en multifréquence.

La précision du modèle direct affecte grandement l'efficacité de l'inversion itérative. Un modèle imprécis donnera une solution défavorable, moins résistant aux interférences. De plus, une bonne initialisation des caractéristiques estimées est cruciale. L'inversion itérative, selon [96], peut résoudre efficacement ces problèmes lorsqu'elle est correctement mise en œuvre, offrant une grande précision et efficacité. La figure 4.3 illustre ce principe dans le cas de l'évaluation non destructive d'un ou plusieurs paramètres à partir des valeurs d'impédance issues des mesures Z_{mes} et du modèle de simulation direct Z_{cal}

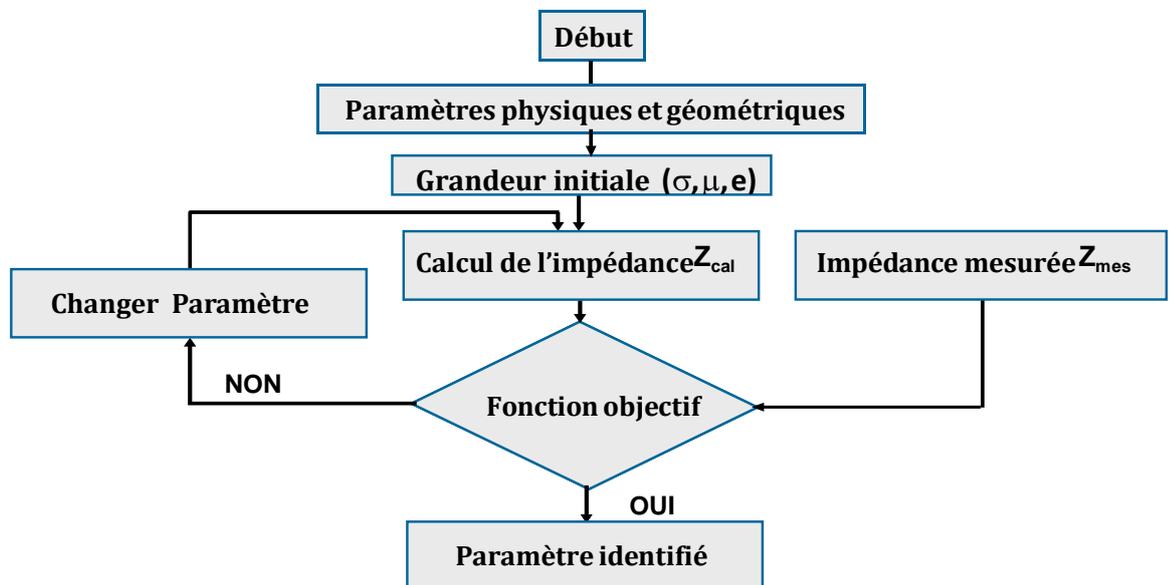


Figure 4.3. Algorithme itératif de minimisation de fonction objectif.

4.2.3 Estimation d'une grandeur par la méthode du problème inverse :

L'estimation d'une grandeur s'effectue par résolution du problème inverse. La fonction objectif (fonction coût) que nous cherchons à minimiser est définie par :

$$F_{obj} = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{n=N_f} \left[\left(1 - \frac{R_{cal}(n)}{R_{mes}(n)} \right)^2 + \left(1 - \frac{X_{cal}(n)}{X_{mes}(n)} \right)^2 \right]} \quad (4.1)$$

avec $R_{cal}(n)$ et $X_{cal}(n)$ les résistances et les réactances normalisées calculées avec le modèle direct. $R_{mes}(n)$ et $X_{mes}(n)$ les résistance et les réactances normalisées issues des mesures. N_f est le nombre de fréquences considérées.

Cette fonction est minimisée grâce l’algorithme du simplex [65].

4.2.4 Inversion basée sur le modèle direct :

Dans le cas où le modèle direct peut être inversible, l’inversion se présente sous la forme suivante : comme l’indique la figure (4.4)

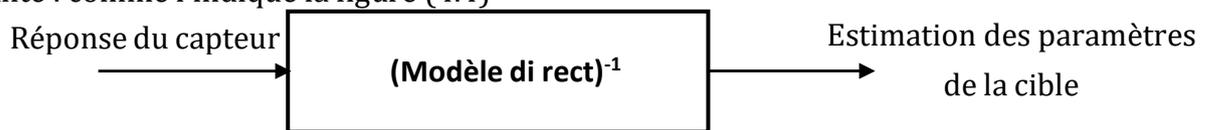


Figure 4.4 – Inversion du modèle direct

Cependant, les modèles directs sont rarement inversibles. La solution consiste alors à placer le modèle direct du dispositif dans une boucle de contre réaction. Au fur et à mesure des acquisitions, elles sont comparées à la sortie du modèle direct. Chaque itération s’efforce de minimiser l’erreur actuelle. En supposant l’exactitude de l’inversion, les itérations cessent une fois que l’erreur a diminué jusqu’à une valeur limite prédéterminée.

Les algorithmes les plus couramment utilisés reposent sur le calcul du gradient du critère d’erreur. Dans la figure 4.5 est représenté le schéma du processus itératif d’inversion.

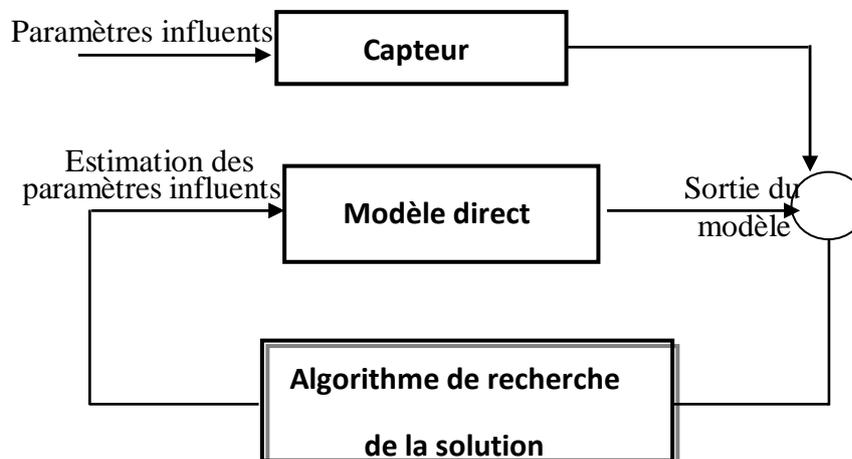


Figure 4.5. Schéma d’un processus itératif d’inversion.

Constitué d'équations et de lois physiques, le modèle direct est indépendant du modèle inverse. Cependant, malgré cette déconnexion, les transformations modélisées sont inverses. Le modèle "comportemental" relie les variations de caractéristiques à des paramètres des signaux utilisés pour les estimer. Au moyen d'une période d'apprentissage, des paramètres spécifiques internes au modèle doivent être ajustés en fonction de la source [96]. Plusieurs algorithmes ont été développés pour établir ces modèles inverses. Utilisés dans l'industrie depuis une trentaine d'années, les algorithmes basés sur les neurones biologiques ont historiquement prévalu en popularité. Souvent appelés algorithmes de type réseau de neurones, ils sont connus pour leur flexibilité, leur efficacité et leur capacité à modéliser des fonctions complexes, notamment celles qui sont de nature non linéaire.

4.3. Classification des méthodes d'optimisation :

Une méthode polyvalente minimise ou maximise simultanément plusieurs fonctions définies par la même variable cible. Le problème multi-objectifs concerne l'existence de conflits entre plusieurs fonctionnalités, car la solution optimale pour un objectif ne correspond pas automatiquement à la solution optimale pour les autres fonctionnalités. Par conséquent, il se peut qu'il n'y ait pas de point dans l'espace de recherche où toutes les fonctions objectives soient simultanément optimales.

Les méthodes d'optimisations peuvent aussi être classées selon leur principe d'évaluation de fonctions objectif à optimiser en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

4.3.1 Méthodes déterministes :

Une méthode d'optimisation est dite déterministes, lorsque son évolution vers la solution du problème est toujours la même pour un même contexte initial donné, ne laissant aucune place au hasard. Ce sont en générale des méthodes efficaces, peu coûteuses, mais qui nécessitent une configuration initiale (point de départ) [91].

Pour résoudre le problème. Ce sont souvent des méthodes locales, c'est-à-dire, qu'elles convergent vers l'optimum le plus proche du point de départ, qu'il soit local ou global. Comme l'indique la figure (4.6)

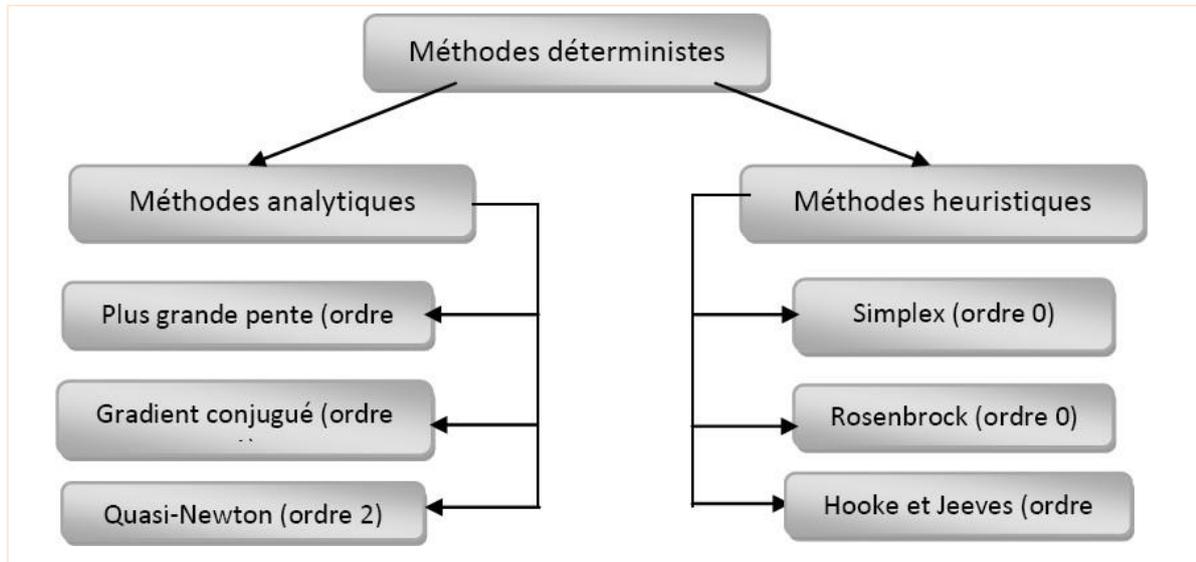


Figure 4.6. Principales méthodes déterministes.

4.3.2 Méthodes stochastiques :

Ils sont basés sur des mécanismes de transition aléatoire. Ces procédés ont une bonne aptitude à découvrir l'optimum global du problème. Figure (4.7).

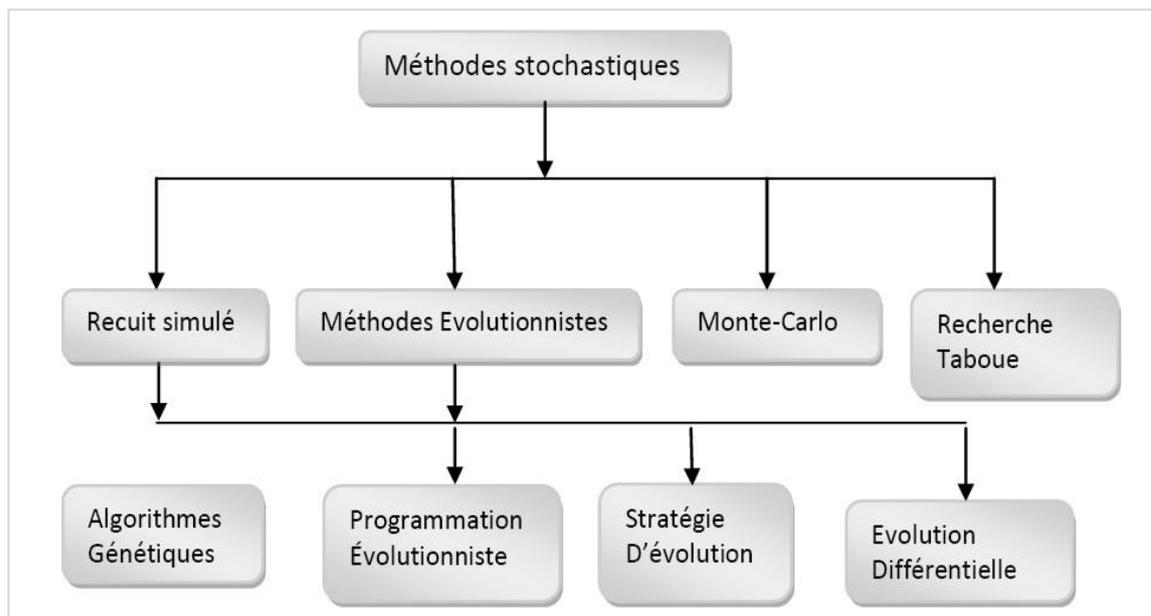


Figure 4.7. Principales méthodes stochastiques.

Les métaheuristiques peuvent être classées de plusieurs façons. Nous pouvons distinguer les solutions qui fonctionnent pour un grand nombre de solutions. et ceux qui traitent d'une solution à la fois. Algorithmes génétiques, algorithmes de colonies de fourmis et optimisation des essaims de particules. Comme l'indique la figure (4.8)

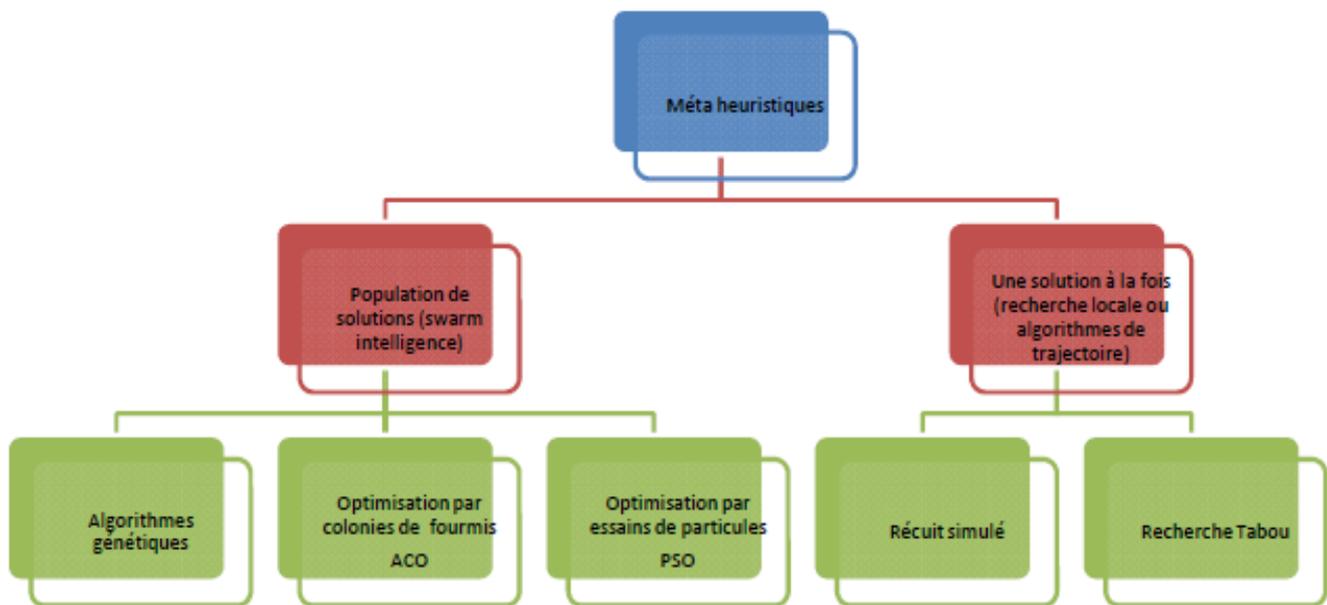


Figure 4.8. Classification de la méthode métaheuristiques.

Les méthodes les plus largement utilisées pour inverser les signaux CF sont généralement des procédés itératives sont souvent utilisées pour résoudre de tels problèmes [48]. La technologie PSO fera l'objet de nos recherches. L'optimisation des essaims de particules PSO [49] sont une bonne périodique aux méthodes itératives [50] [51].

Néanmoins, avant que le problème ne soit résolu, plusieurs évaluations doivent être effectuées. Les algorithmes génétiques, les réseaux neuronaux et les méthodes de recuit simulé (représentées par la méthode Nelder-Mead) et l'optimisation des essaims de particules PSO sont les techniques les plus couramment utilisées.

4.4 Les réseaux de neurones:

4.4.1 Historique sur les réseaux de neurones

Un modèle du cerveau considérablement simplifié est un paradigme de traitement de l'information est influencé par la façon dont les systèmes nerveux biologiques. Les origines de ce concept remontent à 1943 et ont été développées par Mac Culloch et Pitts [52]. Fondamentalement, il se rapproche d'une fonction en prenant des entrées et en produisant des sorties au mieux de sa capacité [53].

L'unité fondamentale du réseau neuronal biologique est le neurone, qui est un type de cellule nerveuse. Son schéma fonctionnel se trouve dans (Fig. 4.9) [54][55].

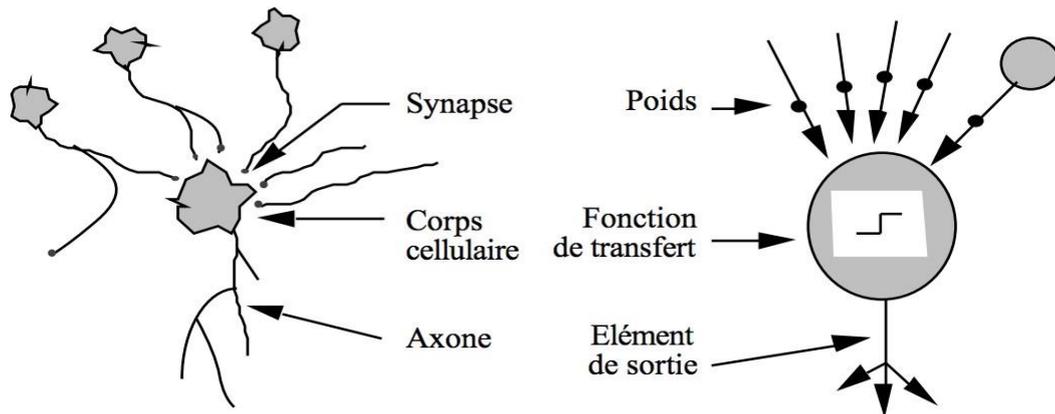


Figure 4.9. Cartographie entre neurones biologiques et formels.

Le Perceptron multicouche a été initialement proposé par Werbos, mais ce n'est qu'en 1986 qu'il a été introduit par Rumelhart sous le même nom. À peu près à la même époque, Le Cun a également présenté un système similaire en 1985 [95]. L'application des réseaux de neurones connaît une expansion continue dans une variété de domaines à l'époque moderne.

Les essais non destructifs présentent des applications nombreuses et diverses dans divers spécimens.

4.4.2 Fonctionnement d'un neurone formel:

Montre (Figure 4.10) comment les informations sur un seul nœud sont traitées. Les nœuds reçoivent des activations pondérées d'autres nœuds via des connexions entrantes. Un neurone perçoit d'abord une somme (X_1, \dots, X_n) par des poids (w_1, \dots, w_n) [54][56].

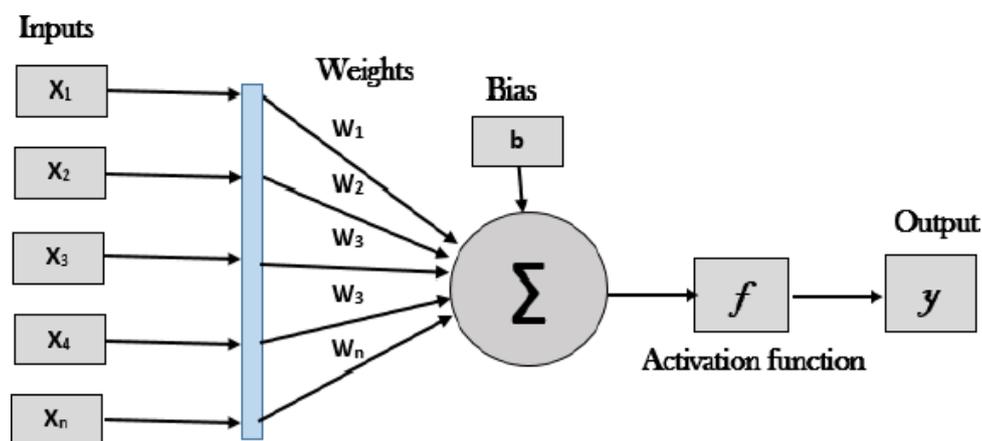


Figure. 4.10. Architecture d'un neurone formel [57].

Comme le montre l'équation (4.1) :

$$y = f(x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n + bias) \tag{4.2}$$

Un rôle important des fonctions d'activation dans la structure. La plupart des réseaux de

neurons utilisent la fonction sigmoïde comme fonction d'activation [57]. Les fonctions les plus fréquemment utilisées sont présentées dans (Figure 4.11).

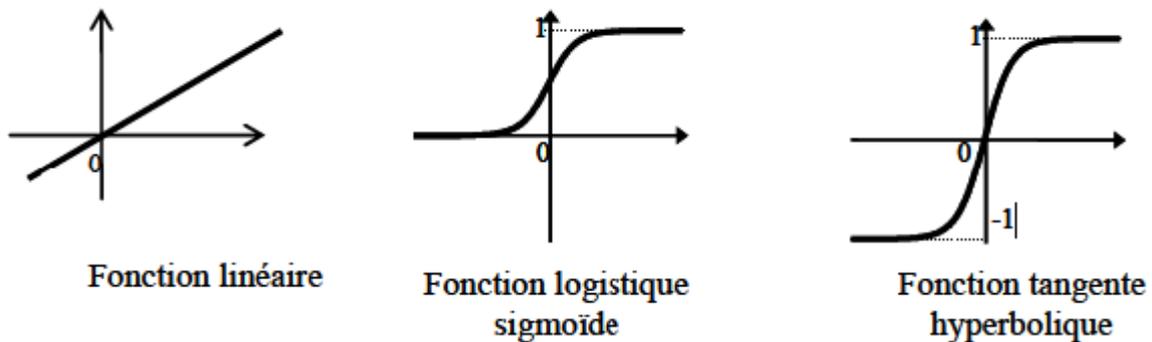


Figure 4.11. Exemple de fonctions d'activations [58].

En pratique, les lois de fonctionnement des capteurs à CF par raisonnement, le modèle utilisé doit être non linéaire. Il existe une structure RN qui peut modéliser ce genre de problème [92].

4.4.3 Composition d'un réseau de neurones Multicouches:

Généralement un RN se compose de trois couches :

- ✓ **Une couche d'entrée** : Il se compose de tous les neurones du réseau qui encaissent les données en question.
- ✓ **Une couche de sortie** : Il est constitué de tous les neurones de sortie du réseau. C'est cette couche qui produit les résultats du complication.
- ✓ **Une ou plusieurs couches cachées** : En consacré, les fonctions d'activation de ces couches sont non linéaires.

Dans cet exemple, il y a 3 entrées, 4 neurones dans la 1ère couche cachée, 3 neurones dans la 2ème couche cachée et 4 neurones. Comme illustre la figure (4.12)

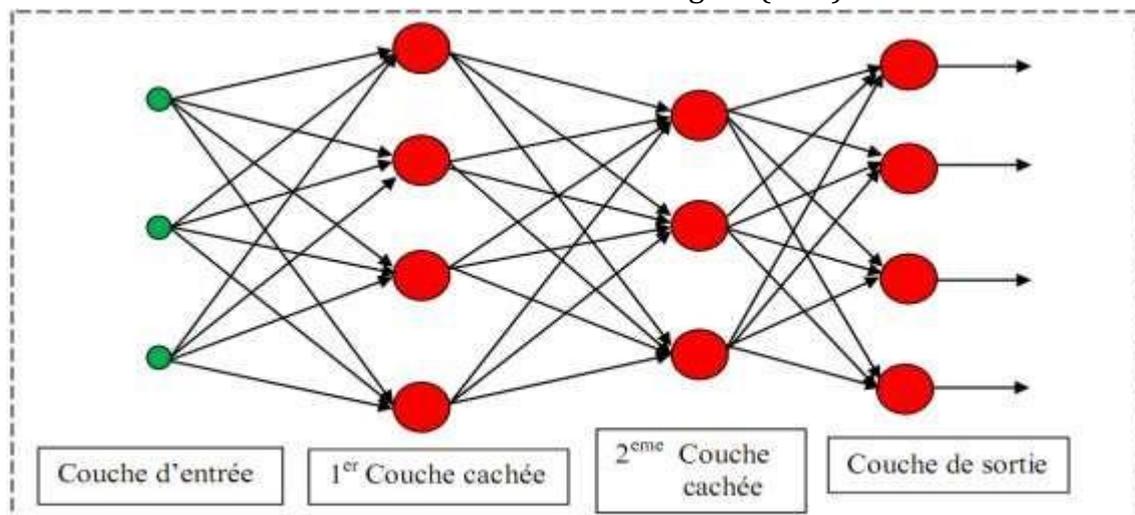


Figure 4.12. Réseau MLP avec deux couches cachées.

4.4.4 Validation et Tests:

Le réseau neuronal doit être testé pour vérifier la qualité des prédictions du modèle neuronal une fois qu'il a été créé. Nous devons être en mesure d'évaluer la qualité du réseau obtenu dans cette dernière étape. Une grande proportion de prédictions correctes est produite par des validations rigoureuses du modèle créé [102]. Comme l'indique la figure (4.13)

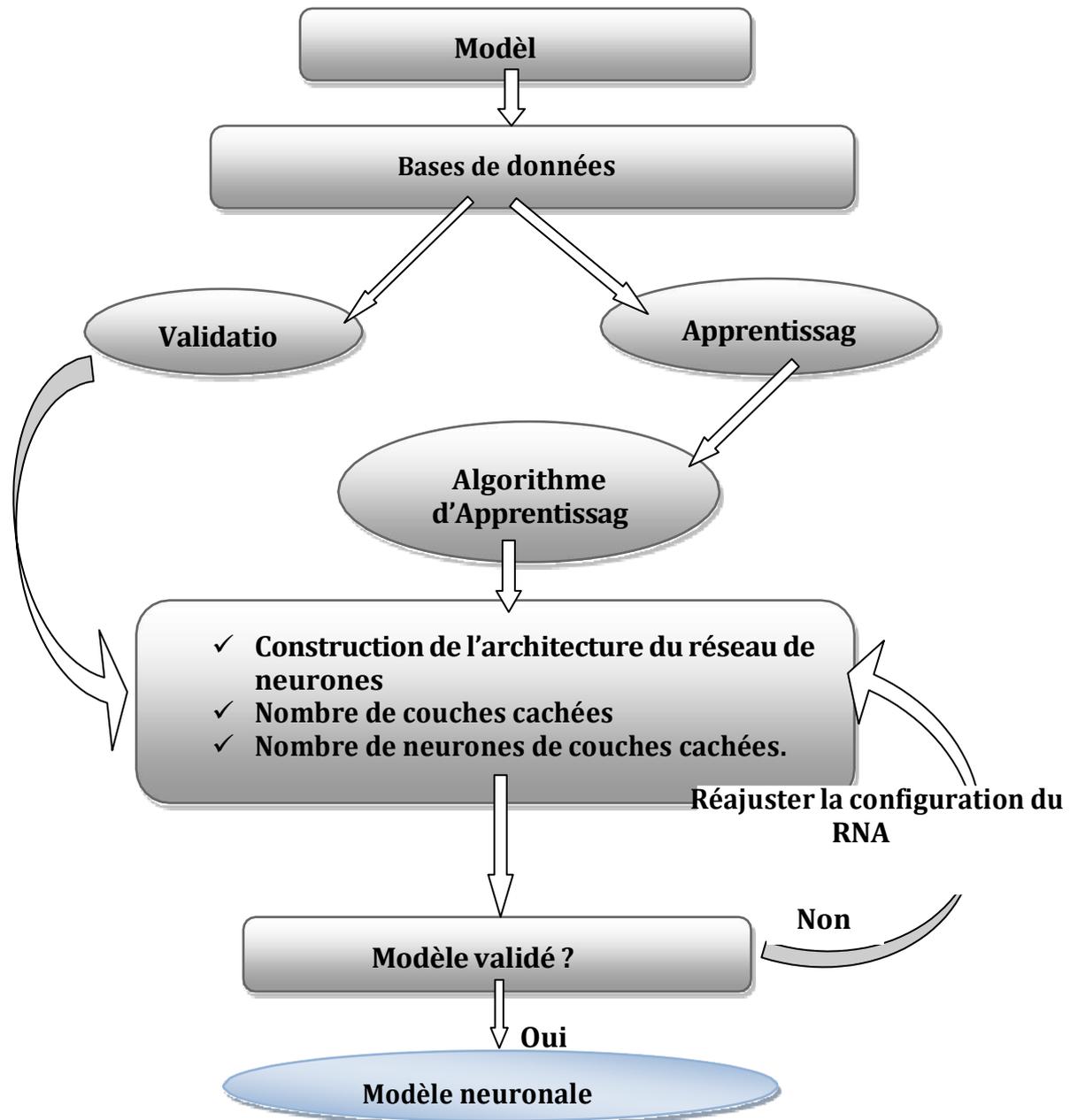


Figure 4.13. Organigramme de l'entraînement du réseau de neurones.

4.5 La méthode de Nelder-Mead:

Il s'agit d'un algorithme d'optimisation non linéaire publié en 1965 par John Nelder et Mead. Il s'agit d'une technique heuristique numérique qui vise à réduire une fonction continue dans un

espace multidimensionnel. [88]. Cet algorithme, également une Downhill Simplex, utilise un polyèdre à $N + 1$ sommets dans un espace à N dimensions. Autrement dit, les sommets se déforment, se déplacent et se rétrécissent progressivement jusqu'à ce qu'ils approchent du point où la fonction est localement minimisée.

Cette méthode déterministe directe, j'essaie en trouver les valeurs de la fonction objectif sans utiliser la dérivée. La robustesse, la facilité de programmation, la faible consommation de mémoire et le temps de calcul court sont tous des avantages de cette méthode.

4.5.1 Principe:

Le simplexe de départ, une figure géométrique, est utilisé dans la méthode "Nelder-Mead". C'est un ensemble de points linéairement affranchis ($n+1$), où le nombre de paramètres est n :

- Le premier sommet (point de départ) du simplex initial peut être spécifié en additionnant les longueurs dans chaque direction des n coordonnées.
- Le schéma des différents pas est illustré dans la figure 4.14.
- Soit par exemple x_{moy} l'isobarycentre des points x_i avec $i \neq n+1$, Le point attentif x_r est déterminé point x_{n+1} du Simplex.

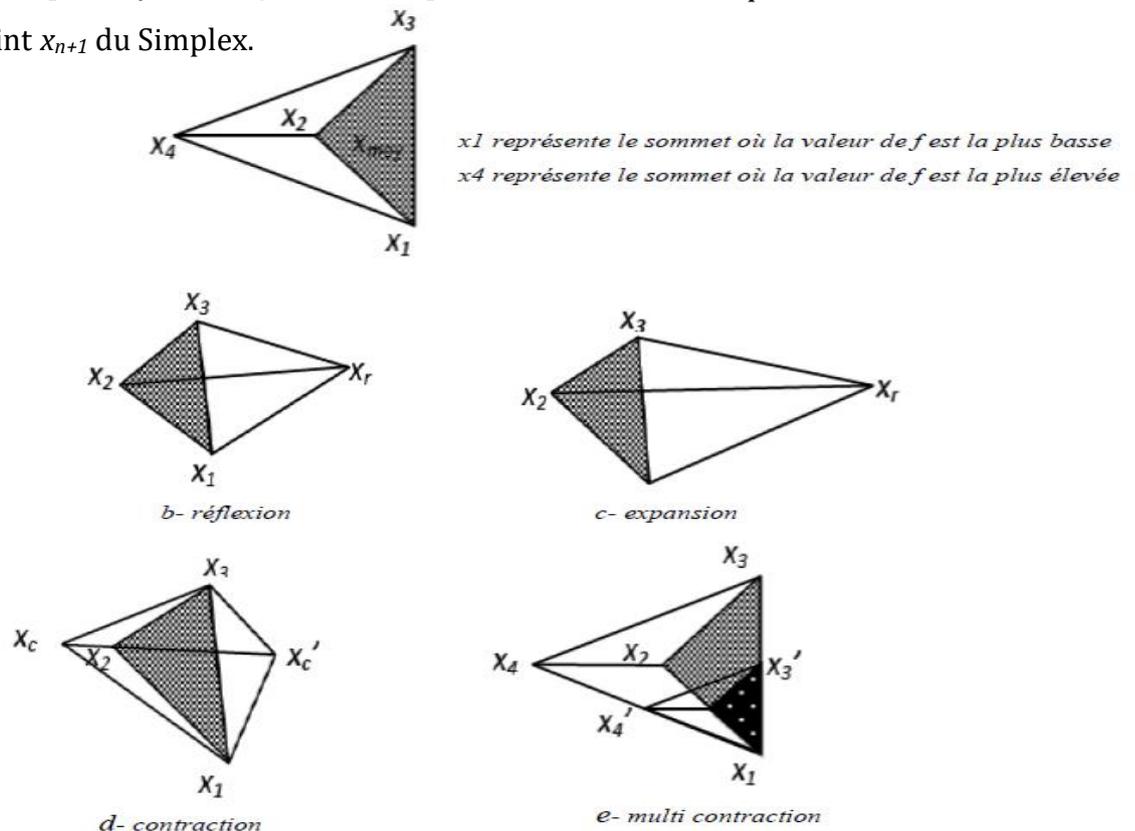


Figure 4.14. Schéma du principe de la méthode de Nelder Mead.

4.5.2 Avantages et Inconvénients de la méthode de Nelder Mead :

Avantages

- La généralité : une fonction continue (sans évaluer ses dérivées).
- La simplicité de la mise en œuvre.
- L'efficacité pour une fonction non dérivable.
- L'interprétation géométrique.
- L'assurance d'obtenir une série décroissante de valeurs.

Inconvénients

- La donnée « arbitraire » d'un simplexe de départ.
- Une dégradation des performances lorsque la dimension N augmente (paramètres).
- Le risque de se piéger dans un minimum local.

4.6 L'optimisation par essaim de particules (PSO):

L'optimisation par essaim de particules est une méthode métaheuristique. La plupart des métaheuristicques utilisent des processus aléatoires et itératifs comme moyens de rassembler de l'information, d'explorer l'espace de recherche et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire.

Une méta heuristique peut être adaptée pour différents types de problèmes, tandis qu'une heuristique est utilisée à un problème donné. Plusieurs d'entre elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels dans de nombreux domaines tels que : la biologie (algorithmes évolutionnaires et génétiques) la physique (recuit simulé), et aussi l'éthologie (algorithmes de colonies de fourmis). Un des enjeux de la conception des métaheuristicques est donc de faciliter le choix d'une méthode et le réglage des paramètres pour les adapter à un problème donné.

L'optimisation par essaim de particules développée à partir de l'intelligence en groupe qui est basée sur le comportement du déplacement des oiseaux ou des poissons pour la recherche de la nourriture.

Comme les oiseaux se déplacent d'un endroit à l'autre à la recherche de nourriture, il y a toujours quelqu'un qui peut sentir la nourriture et savoir où elle se trouve. En raison de l'échange constant d'informations entre eux, ils finissent par se rassembler là où il y a de la nourriture. Tout au long de la course, une bonne information correspond aux solutions les plus optimistes, et la nourriture correspond aux solutions les plus optimistes.

La méthodologie introduite par Kennedy et Eberhart vise à reproduire le comportement social

en examinant l'environnement et les environs immédiats. Cette approche conduit à la création d'une méthode de recherche qui observe les tendances des individus proches pour déterminer la solution optimale. L'algorithme qu'ils ont développé a ensuite été étendu à une technique d'optimisation simple et efficace.

4.6.1 Principe de l'optimisation (PSO):

L'optimisation PSO est fondée sur un groupe d'individus initialement organisés de manière uniforme et aléatoire, appelés particules dans le cadre de cette méthodologie. Chaque particule dans l'espace a la capacité de devenir une solution potentielle. Ces particules ont la capacité de communiquer avec d'autres particules dans leur environnement immédiat. Ils ont également un souvenir de leur solution la plus visitée. Sur la base des données fournies, la particule est encline à se déplacer dans une certaine direction. Cette direction est influencée par deux facteurs : son désir de revenir à sa solution optimale, et sa tendance à imiter les solutions trouvées dans son environnement immédiat. Lorsque l'ensemble de particules rencontre des optima locaux et empiriques, telle que référencée par les sources [95] et [90].

4.6.2 La solution et Avantage de PSO:

Chaque particule représente une solution dans l'espace des solutions et chaque particule a un ajustement qui peut être calculé par la fonction objectif. Chaque particule enregistre sa meilleure performance (pBest ou xBest). Elle connaît aussi la meilleure performance du groupe (Gbest). Les particules ajustent leur vitesse en fonction de leurs meilleures performances et des meilleures performances des meilleures particules. Les avantages de cette méthode sont :

- Simple à mettre en œuvre.
- Avec peu de paramètres
- Adapté pour l'optimisation de fonction, la formation ANN et les systèmes de contrôle fuzzy

4.6.3 Formulation de PSO:

L'essaim de particules est constitué de n particules et la position de chaque particule représente une solution dans l'espace de recherche. Les particules changent d'état selon les trois principes suivants:

- Garder son inertie
- Changer d'état en fonction de sa position la plus optimiste
- Changer d'état selon la position la plus optimiste du groupe.

La position de chaque particule est affectée à la fois par la position la plus optimiste lors de son mouvement (expérience individuelle) et la position de la particule la plus optimiste dans ses environs (expérience globale). La mise à jour de la position $x_i(t)$ et la vitesse $v_i(t)$ d'une particule p_i est représentée par les équations (4.2) et (4.3)

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c1r1[\chi p_i(t) - \chi_i(t)] + c2r2[g(t) - \chi_i(t)] \quad (4.3)$$

$$\chi_i(t+1) = \chi_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.4)$$

où ω est l'inertie, $c1$ et $c2$ sont des coefficients constants fixés par l'utilisateur, $r1$ et $r2$ sont des nombres aléatoires dans la plage $[0, 1]$, $g(t)$ est la meilleure solution trouvée jusqu'à l'instant t et $\chi p_i(t)$ est la meilleure solution trouvée par la particule p_i . Soit $f(x)$ la fonction objectif à optimiser (fitness) et n le nombre de particules.

L'algorithme ci-dessous présente les principales étapes de l'optimisation par PSO :

1. La population et les vitesses des particules sont initialisées aléatoirement.
2. Remarquer la somme de fitness idéale f à $t=0$.
3. Intervention

Répéter jusqu'à la fin du test. Pour chaque particule, répéter.

Utilisez l'équation (4.3) pour calculer la nouvelle valeur de la vitesse.

Calculez la nouvelle position avec l'équation (4.4).

Trouvez le meilleur endroit pour chaque particule.

Final. trouver la meilleure position. Fin.

4.6.4 Configuration des paramètres:

4.6.4.1 Nombre de particules:

La détermination du nombre de particules nécessaires à la résolution principalement de deux facteurs : l'étendue de l'espace et le expertise entre la puissance de traitement de l'ordinateur et le temps de recherche alloué. Il n'existe aucune directive établie pour régir ce paramètre, et il est souvent déterminé par essais et erreurs. Grâce à des expérimentations répétées, on peut acquérir typiquement le nombre de particules est choisi au hasard.

4.6.4.2 Taille et topologie de voisinage:

La configuration de la communauté locale façonne le cadre du réseau social et détermine quels individus peuvent interagir les uns avec les autres. Il existe de nombreuses permutations, dont certaines sont énumérées ci-dessous. Selon la figure 4.15, ce sont les plus fréquemment utilisés.

a) **La topologie en étoile** : est caractérisée par le fait que chaque particule est connectée à toutes les autres particules.

b) **La topologie en anneau**: est une configuration de réseau couramment utilisée où chaque particule est connectée à un total de n particules, généralement trois.

c) **La topologie Ray** : est un système de communication utilisé par des particules dans lequel chaque particule communique uniquement avec une particule centrale.

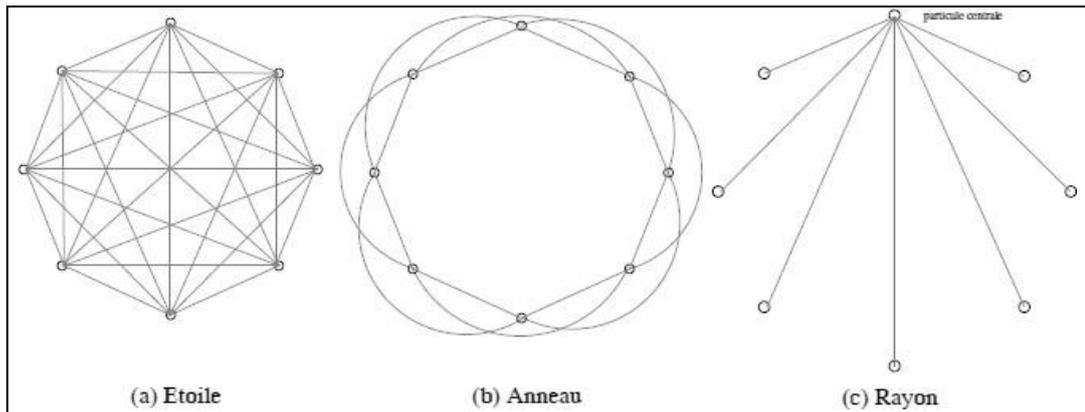


Figure 4.15. Topologies de voisinage.

4.6.4.3 Coefficients de confiance et coefficient d'inertie:

Les coefficients c_1r_1 et c_2r_2 de l'équation (4.1) sont nommés coefficients de confiance, ils admettent les prédispositions et organisé des particules. Les coefficients r_1 , r_2 sont des variables par loi cohérent sur le domaine $[0, 1]$. Le rapport d'conservatisme tendance ω pour la détruit vue antérieurement permet de occasionner la capacité d'approfondissement de tout parcelle en vue d'essayer la liaison de la règle

4.6.5 Amélioration des algorithmes PSO:

La manipulation de transformation PSO il vérifiable un aléa de inégalité ou de évolution pressé qui permet de contenir chez un sommet dialectal, de ce histoire maints améliorations ont été fixées à mécanisme de l'algorithme de base. Comme l'indique la figure (4.16).

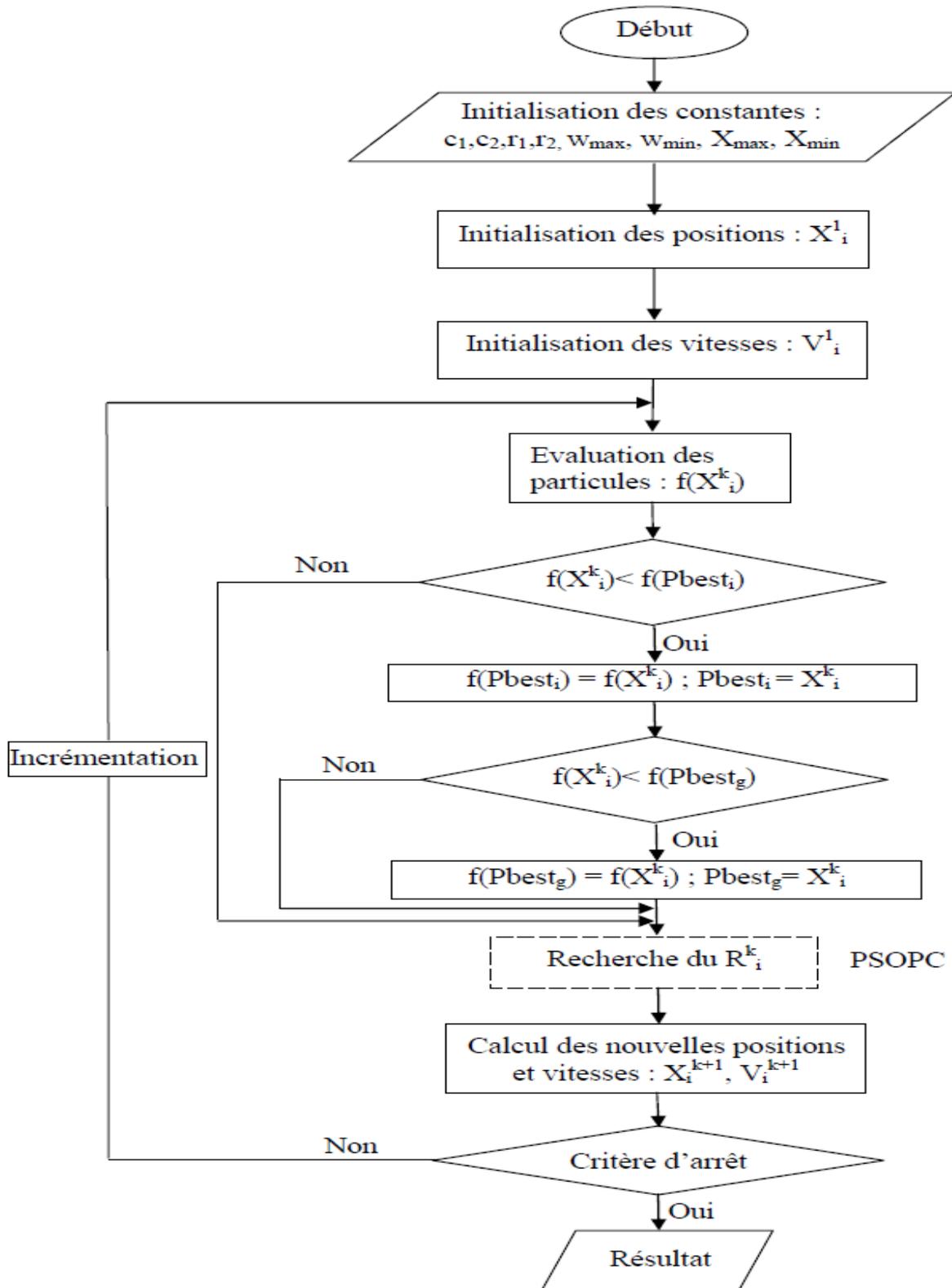


Figure 4.16. Organigramme de l’algorithme à essaim de particules.

4.6.5.1 Confinement des particules:

L'introduction d'un nouveau paramètre appelé V_{max} , peut empêcher les particules de se déplacer rapidement de leur place et, par conséquent, de quitter tout l'espace de recherche. Ce

paramètre définit un plafond sur la vitesse pour chaque dimension, facilitant ainsi le contrôle des particules.

Un compromis efficace entre intensification et diversification peut être atteint en contrôlant la divergence de l'algorithme. Il est important de noter que l'intervalle $[V_{i_{min}}, V_{i_{max}}]$, ne limite pas les valeurs de x_i .

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour introduire une stratégie de confinement des particules, qui permet de faire sortir les particules de l'espace de recherche. Cette stratégie permet la possibilité d'un confinement des particules :

- Ne pas évaluer la diligence cible de la particule laissée en dehors de l'espace de recherche signifie qu'elle est incapable d'attirer des particules au-delà de cet espace. Par conséquent, les autres particules ne peuvent pas être influencées par celui-ci.
- La limite arrête la particule et, par la suite, ses composantes liées à la vitesse sont annulées.
- Un coefficient aléatoire est appliqué dans la plage de $[-1,0]$ aux composantes de vitesse correspondantes après que la particule entre en collision avec la limite et s'arrête.

4.6.5.2 Coefficient de constriction:

Pour passer la divergence algorithmique, comme l'introduction du paramètre V_{max} que nous avons vu au paragraphe précédent et permettant la divergence de restriction des particules.

La dynamique des particules est liée à l'étude des conditions de convergence des essais.

Le processus de recherche peut ajuster les paramètres ω , $c1$ et $c2$. Le facteur de confinement χ (ou facteur de confinement) peut être utilisé pour mieux contrôler la divergence de l'essaim et s'affranchir de la définition de V_{max} . PSO standard est le type de PSO le plus courant dans la recherche [66]. En utilisant ce coefficient, l'équation (4.3) devient :

$$v_i(t+1) = \chi(v_i(t) + \phi_1 r_1 [\chi p_i(t) - x_i(t)] + \phi_2 r_2 [g(t) - x_i(t)]) \quad (4.5)$$

Avec:

$$\chi = \frac{2}{\Phi - 2 + \sqrt{\Phi^2 - 4\Phi}} \quad (4.6)$$

ou: $\phi_1 + \phi_2 = \Phi$ et $\Phi > 4$

4.6.5.3 Coefficient d'inertie:

L'objectif de l'ajout de ce paramètre est de réussir à équilibrer la recherche locale (extraction) avec découverte.

Il commence avec une valeur proche de 0,9 et diminue progressivement jusqu'à 0,4. Cette stratégie a largement amélioré les significations de PSO dans un certain quantité de problèmes d'optimisation. Selon la formule suivante, le coefficient d'inertie ω échange linéairement avec le temps :

$$\omega = \omega \min + (\omega \max - \omega \min) \frac{iter}{iter \max} \quad (4.7)$$

où $iter$ est l'itération courante et $itermax$ est le nbre maximal d'itérations. Les coefficients $mmax$ et $mmin$ signalent des max et min du coefficient m . [96].

4.6.6 Stratégie Entièrement informe l'essaim particule (FIPS):

Le FIPS est une nouvelle façon d'utiliser la topologie g (la meilleure dans l'ensemble) présentée par cette méthode. Il utilise une partie des données de chaque voisin, plutôt que de s'appuyer uniquement sur les données des voisins les plus proches et des expériences les plus étendues du particule. Il est effectivement employé en FIPS, mais il n'est pas le seul.

Par conséquent, chaque voisin contribue à ajuster la vitesse d'une particule :

$$v_i^{t+1} = \chi \left[v_i^t + \sum_{n=1}^{N_i} \frac{U(0, \Phi)(P_{nbr(n)}^t - x_i^t)}{N_i} \right] \quad (4.8)$$

ou N_i est le nombre de voisins de la particule i , $P_{nbr(n)}^t$ est la nième particule voisine de la particule i et Φ est la constante d'accélération [106].

4.7 Algorithme TRIBES:

Un essaim de particules dans TRIBES est divisé en plusieurs sous-essaims, connu sous le nom de « tribus ». La taille et l'évolution des souches varient avant de prendre une décision globale, l'objectif est de rechercher les zones de l'espace (principalement les optima locaux). En fait, les tribus qui s'efforcent d'améliorer leurs résultats produiront davantage de particules de recherche. Diverses tribus créent des particules qui forment de nouvelles tribus qui communiquent avec leurs parents [108].

Il existe deux suggestions pour améliorer les performances de cet algorithme :

- ✓ Afin de garantir la méthode a été introduit récemment. En fait, les particules sont initialisées pour être le plus espacées limites de l'espace.
- ✓ L'autre concept consiste à mettre en œuvre une nouvelle approche du déplacement. Cette stratégie repose sur une combinaison avec un algorithme qui estime la distribution

pour s'assurer que l'essaim conserve sa diversité pendant toute la durée du processus.

4.8 Optimisation par essaim de particules à convergence rapides:

La technique d'optimisation connue sous le nom d'optimisation de l'essaim de particules à convergence rapide (FCPSO) repose sur le maintien des locus de la particule individuelle. Il a été démontré que ce paramètre améliore considérablement les performances globales du PSO. Comme l'indique la figure(4.17)

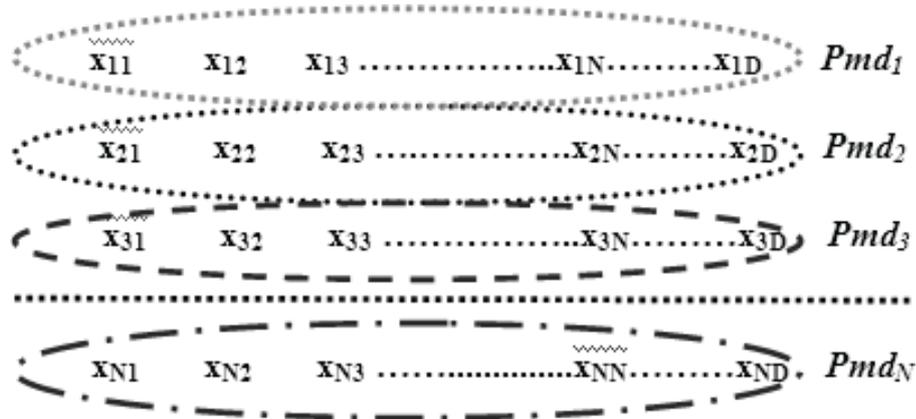


Figure 4.17. Calculer la dimension moyenne des particules pour N particules [108].

En plus de suivre x_{pi} et g , les particules peuvent suivre les particules sélectionnées dans l'essaim depuis la création de t jusqu'à $t + 1$ après la mise à jour de l'essaim. Les équations suivantes produisent le paramètre $PMDi$ de particules i^{eme} et l'équation de vitesse :

$$PMD_i = (\chi_{i1} + \chi_{i2} + \chi_{i3} + \dots + \chi_{iD}) / D \tag{4.9}$$

$$v_i(t+1) = \omega \chi v_i(t) + c1r1[\chi p_i(t) - \chi_i(t)] + c2r2[g(t) - \chi_i(t)] + c3r3[PMD_i(t) - \chi_i(t)] \tag{4.10}$$

où c_3 est un coefficient constant fixé par l'utilisateur tel que : $c_1 + c_2 + c_3 \geq 4$. r_3 est un nombre aléatoire dans la plage [0 1] tiré à chaque itération.

χ_{pi} , g et $PMDi$ augmentent la quantité d'informations en fournissant des informations à la génération suivante après avoir transformé $PMDi$ en équations de taux. Cela permet de trouver la meilleure solution rapidement.

4.8.1 Hybridation de PSO avec algorithme génétique:

Ces dernières années, une tendance observée est l'hybridation des algorithmes d'optimisation, qui a attiré pour améliorer les significations vise à optimiser les avantages en combinant les

propriétés de deux méthodes différentes.

4.9 Algorithme génétique:

Les algorithmes génétiques utilisent des évaluations de population pour optimiser une fonction objective (fitness). Les meilleurs individus sont choisis comme parents appropriés, produisant une meilleure progéniture parmi laquelle une solution acceptable au problème à résoudre est trouvée.

Les étapes suivantes peuvent être utilisées pour résumer un algorithme génétique :

I. Codage et population initiale : La codification de chaque solution est un élément crucial. Un similitudes entre un ensemble d'individus dans une population naturelle et un ensemble de solutions à un problème pour coder des informations sur chaque solution. Le code utilisé peut être binaire ou réel en fonction du problème étudié.

L'Algorithme Génétique (AG) commence par initialiser une population d'individus dans le codage qui a été sélectionné. La vitesse de l'algorithme est fortement influencée par cette population initiale. La population initiale étant souvent non homogène, il est impératif de maintenir la diversité dans les générations suivantes pour explorer en profondeur l'espace de recherche.

II. L'évaluation d'une population : constitue le processus d'évaluation de chaque solution présente en son sein. La mesure de la performance de la solution est dépendante de la valeur de la fonction objectif. Cette étape cruciale est essentielle pour assurer l'amélioration continue de la population dans son ensemble. [110]

III. L'objectif premier de la sélection :est d'identifier les individus aptes à la reproduction. Ce processus ne génère pas de nouveaux individus mais identifie plutôt ceux qui possèdent une fonction d'adaptation supérieure aux autres. Les individus les mieux adaptés sont ensuite choisis pour la reproduction, tandis que les individus les moins adaptés sont rejetés.

IV. Créer une nouvelle personne : Après avoir fait vos choix, suivez ces étapes pour créer une nouvelle personne.

➤ **Croisement** : L'union des deux parents donne naissance à ces nouveaux individus, ou descendants. $[1; l+1]$ où la longueur de l'individu est l . Les bits sont permutés de la position $k+1$ à l pour effectuer le croisement.

➤ **La mutation** : est une action aléatoire qui change la valeur des bits. Ce processus est important dans les algorithmes génétiques, bien qu'il ait un rôle mineur.

L'algorithme génétique détaillé est représenté ci-dessous :

1- Favoriser un nombre de paramètre N pour déterminer l'occurrence pour chaque paramètre :

$$\{x_{1\min}, x_{1\max}\}, \{x_{2\min}, x_{2\max}\}, \dots, \{x_{N\min}, x_{N\max}\},$$

2- La population initiale des paramètres est constituée par cet ensemble de valeurs « parents » : x_1, x_2, \dots, x_N

3- Calculer la solution associée avec les paramètres « parents ».

$$X = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

4- Pour chaque paramètre "parent", ajouter une variable normalement distribuée a de moyenne 0 et de variance (à l'étape 1) choisie δ pour créer une descendance.

$$x'_i = x_i + a(0, \delta), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

5- Calculer la solution associée.

$$X' = f(x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$$

6- Comparez la solution "mère" et la solution "descendante", si la solution 'descendante' est meilleure que la solution 'parente'. Sinon, gardez la population dans le paramètre "parent".

4.9.1 Algorithme GA-PSO:

L'inconvénient de l'algorithme génétique est un peu lent quand la taille de la population devient grande. En effet, l'idée d'hybridation en insertion est venue pour minimiser le temps de calcul et aussi pourquoi ne pas améliorer les résultats de la fonction objective.

Cependant nous avons choisi d'hybrider les deux algorithmes heuristiques GA et PSO en insérant le PSO dans le GA. En d'autre terme à la place de faire la dernière étape de la mutation on la remplace par les mécanismes du PSO [99]. L'idée est de remplacer l'étape de mutation citée précédemment dans l'algorithme génétique par les mécanismes du PSO, la démarche de cet algorithme est présentée par les étapes suivantes :

- Initialisation et sélection.
- Evaluation.
- Croisement.
- Processus PSO : mise à jour des vitesses et des positions des particules
- Retour à l'étape d'évaluation jusqu'à la convergence du processus.

4.10 Cas d'application (pièce avec défaut) :

Dans ce chapitre, en étudiant le CND par CF induits dans la pièce, on va s'intéresser à l'identification et l'estimation des paramètres physiques et géométriques d'une pièce avec défaut en utilisant l'approche inverse par optimisation. Le modèle électromagnétique basé sur les équations de Maxwell est résolu par MEF. Une transformation inverse itérative est une transformation inverse optimisée.

Sous MATLAB/PDE Tools, on a programmé les commandes MEF en 2D appropriées à notre système (problème direct) ; ensuite, on a combiné ce modèle avec l'algorithme d'optimisation par essaim de particule (problème inverse).

La fonction objectif utilisée par l'algorithme est la différence entre la valeur réelle désirée et celle calculée.

4.10.1 Description du système étudié:

Dispositifs qui appliquent le modèle d'inversion par optimisation est un système axisymétrique constitué d'un capteur dont le courant injecté : $j_s = 10^7(A/m^2)$, fréquence : 50kHz et d'une pièce (cible) magnétique qui est endommagée par un défaut sur la surface externe de celle-ci des figures (1.18) et (1.19).

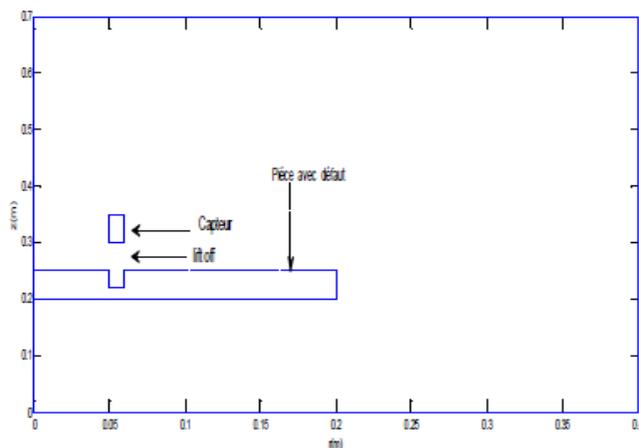


Figure 4.18 : Modèle d'étude.

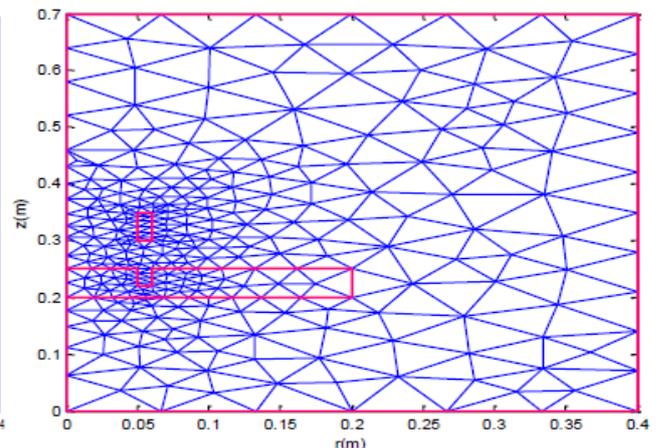


Figure 4.19 : Maillage du domaine de résolution.

4.10.2 Résultats et simulation du problème direct :

Les figures (4.20) et (4.21) représentent lignes du potentiel vecteur et densité de puissance successivement .

➤ **Simulation d'un capter-pièce magnétique sans défaut**

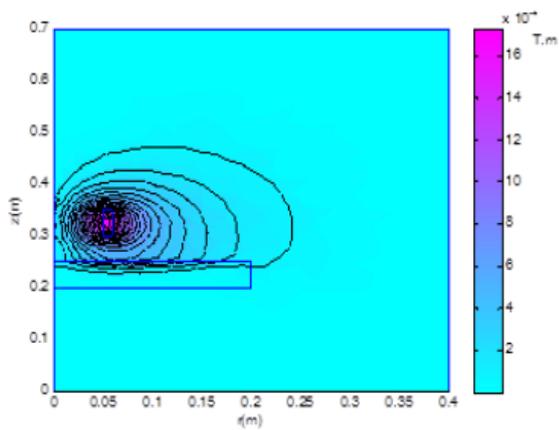


Figure 4.20 Lignes du potentiel vecteur magnétique.

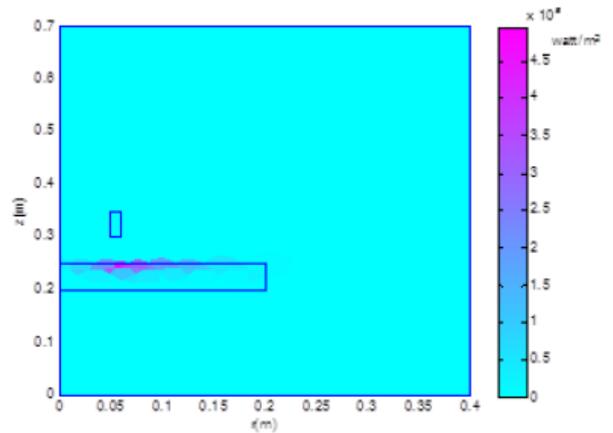


Figure 4.21 Densité de puissance dans la pièce.

Les figures (4.22) et (4.23) représentent la distribution du champ magnétique, le défaut et embrassent juste les surfaces internes du défaut puisque sa perméabilité magnétique est faible par rapport à la pièce.

➤ **Simulation d'un capter-pièce magnétique avec défaut**

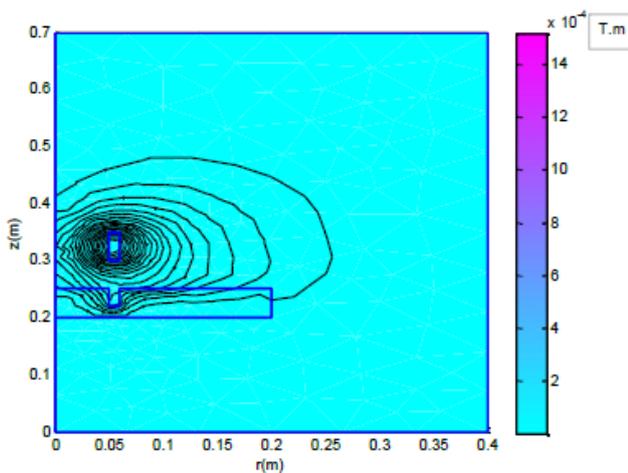


Figure 4.22 Lignes du potentiel vecteur magnétique.

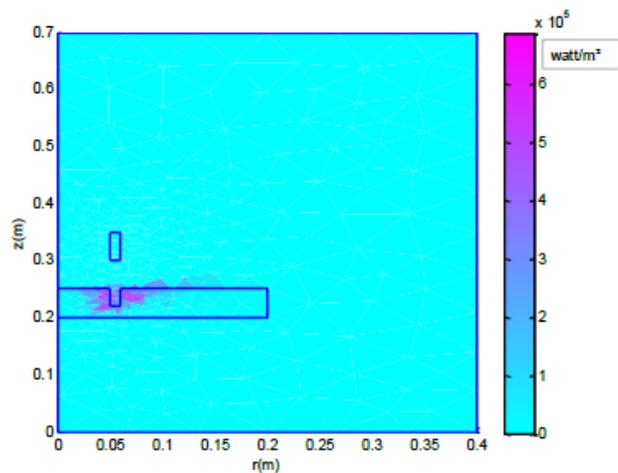


Figure 4.23 Densité de puissance dans la pièce.

➤ **Impédance du capteur :**

Le tableau(4.1) suivant montre la variation de Z ce qui constitue une autre signature du défaut.

Tableau (4.1). Variation de Z

Type de pièce	pièce sans défaut	pièce avec défaut
Z (Ω)	7.500884e-002	7.069316e-002

4.10.3 Résolution du problème inverse (capteur et pièce avec défaut):

Les figures (4.24) et (4.25) représentent la fonction objectif et conductivité électrique avec itérations.

➤ **Identification de la conductivité électrique de la pièce :**

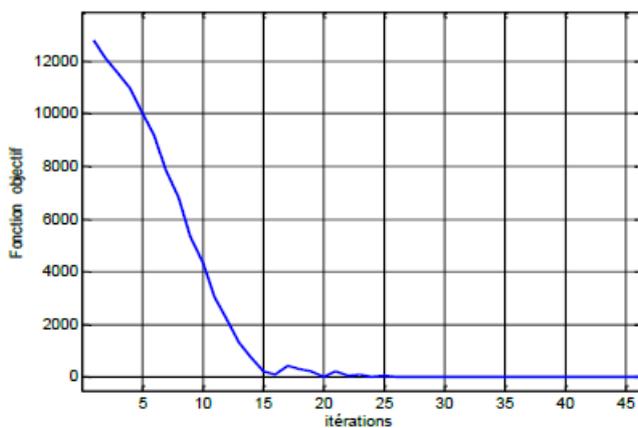


Figure 4.24 La chute de la fonction objectif avec les itérations.

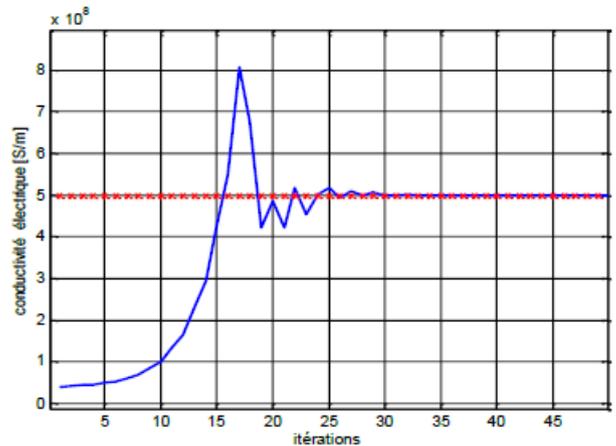


Figure 4.25 L'évolution de la conductivité électrique avec les itérations.

Le tableau(4.2) suivant donnée les résultats de la conductivité électrique.

Tableau (4.2) : Résultats obtenus par l'identification de la conductivité électrique

Test N°	Parameter à identifier	Valeur initiale	Valeur optimale (réelle)	Valeur calculée
1	σ (S/m)	4.10^7	50.10^7	$50,002.10^7$

Les figures (4.26) et (4.27) représentent la chute de fonction objectif et l'évolution de l'épaisseur de pièce avec itération.

➤ **Identification de l'épaisseur de la pièce :**

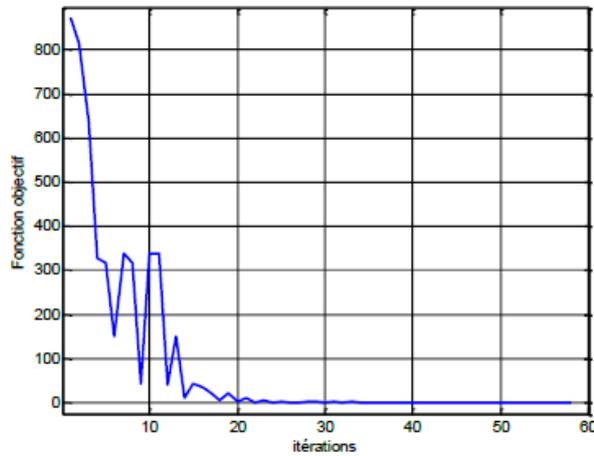


Figure 4.26 La chute de la fonction objectif avec les itérations.

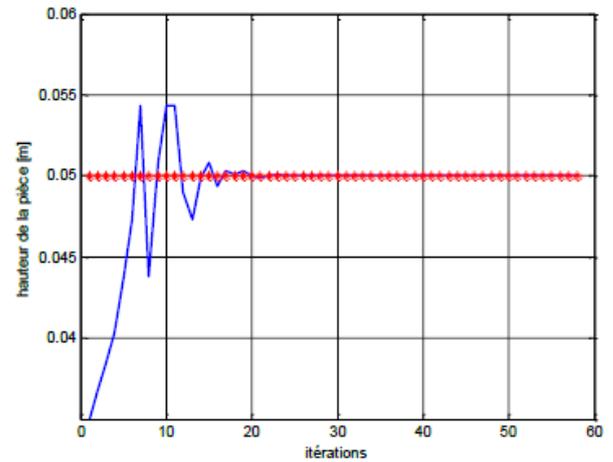


Figure 4.27 L'évolution de l'épaisseur de la pièce avec les itérations.

Le tableau(4.3) suivant donnée les résultats obtenus de l'épaisseur de la pièce.

Tableau (4.3) : Résultats obtenus par l'identification de l'épaisseur de la pièce

Test N°	Parameter à identifier	Valeur initiale	Valeur optimale (réelle)	Valeur calculée
2	Ep (m)	0.035	0.05	0.05

Les figures (4.28) et (4.29) représentent la chute de fonction objectif et l'évolution de largeur de pièce avec itération.

➤ **Identification de largeur de la pièce :**

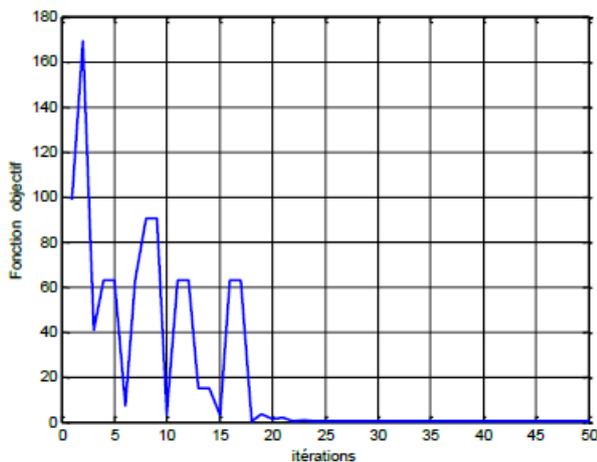


Figure 4.28 La chute de la fonction objectif avec les itérations

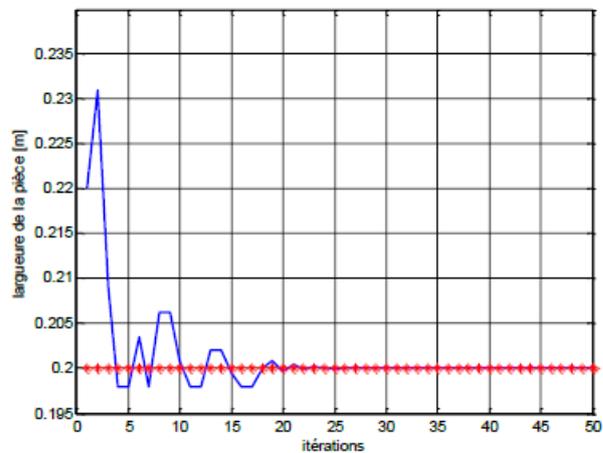


Figure 4.29 L'évolution de largeur de la pièce avec les itérations.

Le tableau(4.4) suivant donnée les résultats obtenus de largeur de la pièce.

Tableau (4.4) : Résultats obtenus par l’identification de largeur de la pièce

Test N°	Parameter à identifier	Valeur initiale	Valeur optimale (réelle)	Valeur calculée
3	L _p (m)	0.22	0.20	0.20

A travers ces résultats d’identification des paramètres de la cible avec défaut, on observe globalement que toutes les fonctions objectif convergent vers l’optimum global et l’algorithme ne nécessite pas beaucoup d’itérations et donc d’aboutir avec précision aux solutions optimales qui sont les valeurs des paramètres réelles recherchées.

4.10.4 Évaluation Facteurs d’intensité de contrainte:

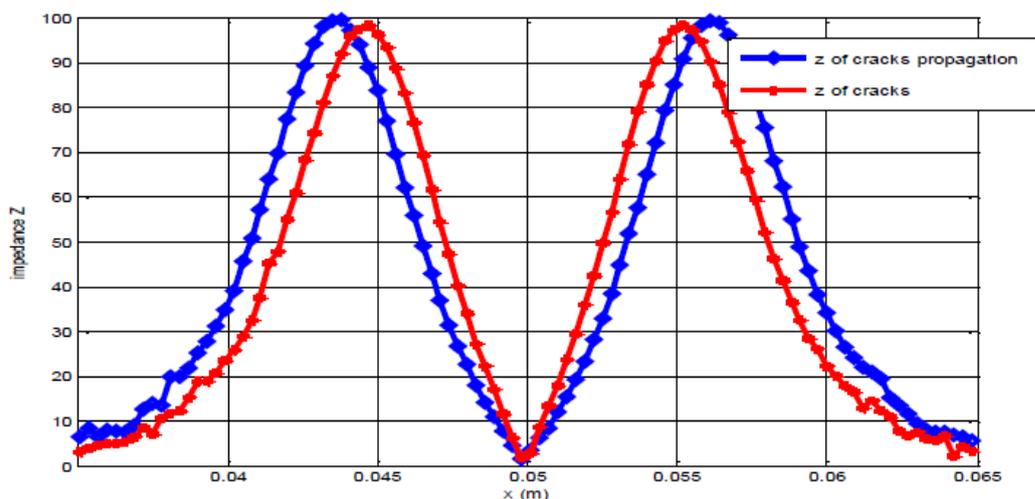


Figure 4.30. Evaluation de ΔZ en fonction de déplacement.

Les facteurs d’intensité de constraints K_I et K_{II} peuvent être déterminés de l’extrapolation de déplacement près du bout de la fissure, illustre par la figure(4.30). Ces FIC sont exprimés par :

$$K_I = \frac{E}{3(1+\nu)(1+\kappa)} \sqrt{\frac{2\pi}{l}} \left(4(u_a - u_c) - \left(\frac{u_b - u_d}{2} \right) \right)$$

$$K_{II} = \frac{E}{3(1+\nu)(1+\kappa)} \sqrt{\frac{2\pi}{l}} \left(4(v_a - v_c) - \left(\frac{v_b - v_d}{2} \right) \right)$$

Dans cette exemple, nous obtenons;

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}}{\kappa+1} \left[\frac{(\sqrt{r^{a,c}} \Delta u^{a,c}(y) + \sqrt{r^{b,d}} \Delta u^{b,d}(y))}{(r^{b,d} + r^{a,c})} \right]$$

Donnée : $E = 130000 \text{ MPa}$; $\nu = 0.33$; $\kappa = (3-4\nu)$; $\mu = E/2*(1+\nu)$; $r^{ac} = 2(1/4)$; $r^{bd} = 2$;

$$\Delta U^{ac} = 0.166 - 0.139 ; \Delta U^{bd} = 0.1774 - 0.1274 .K = 1641.6 \text{ N/mm}^{3/2}$$

Dans le tableau(4.5) sont représenté le calcul de FIC par intégral-J et par RN.

Tableau (4.5). FIC obtenu par Intégral – J et celui obtenu par RN et méthode analytique

Crack Length (mm)	10	11	12	13	14
SIF By Theoretical Methods	1744.4	1920.8	2082.0	2252.4	2433.7
SIF by RN $\text{N/mm}^{3/2}$	1788.1	1893.2	2154.38	2286.2	2563.67
SIF by J-integral $\text{N/mm}^{3/2}$	1679.34	1829.0	1962.60	2134.10	2479.04
Error $\text{SIF}_{EC} / \text{SIF}_{J-INT} \%$	6.48	3.5	9.77	7.6	3.4

On distingue l'évaluation de FIC par PSO et comparé pa méthode analytique suivant figure (4.31).

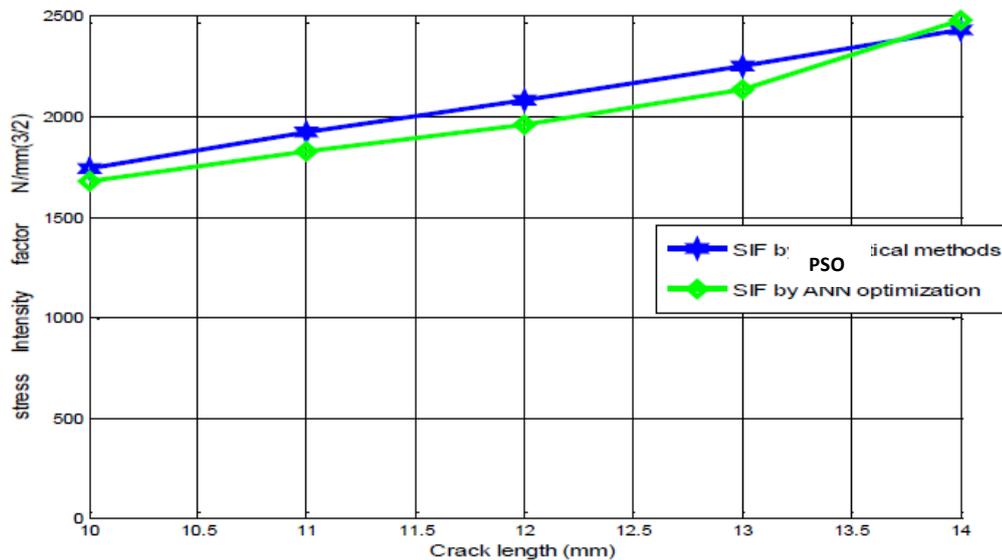


Figure 4.31 . Évaluation le Fic obtenu par PSO et celui obtenu par méthode analytique .

4.11 Conclusion:

Ce chapitre développe une application de l'optimisation des essaims de particules (PSO) dans le domaine (CND-CF). La tâche consiste à estimer les dimensions du défaut de matériau (profondeur et longueur) afin de reconstruire sa géométrie.

Le PSO a été résolu à cette fin. Dans cette section, cette fonction d'activation est utilisée. Nous avons choisi deux capteurs différentiels pour ce travail. Cohérence entre les données du problème directes et les données de l'optimisation dans le temps (PSO). Les résultats obtenus montrent que des objectifs plus importants tels que la caractérisation des défauts, qui n'étaient pas possibles avec le modèle direct, peuvent être atteints, et montrent une similitude exemplaire entre les modèles direct et PSO. Cependant, GA est extrêmement lent car la fonction

objectif prend plus de temps à calculer à chaque fois pour chaque itération.

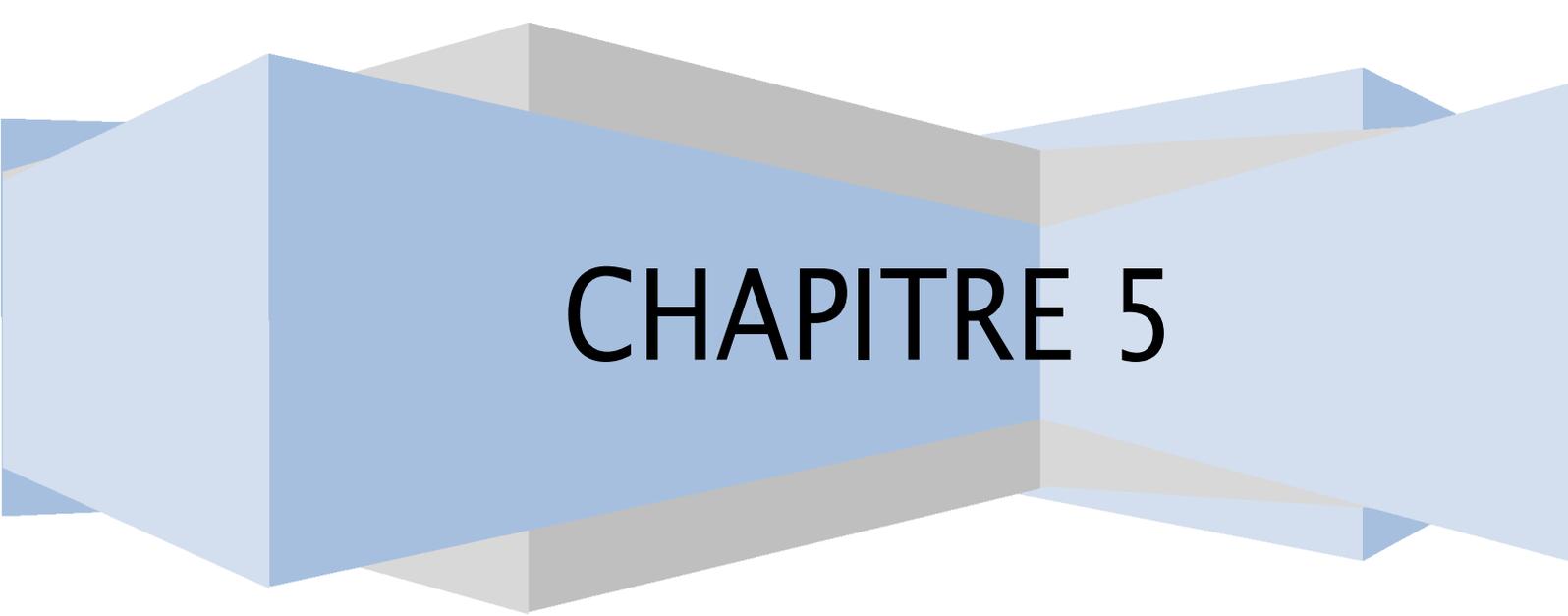
Sur la base des résultats, nous pouvons conclure que l'algorithme d'essaim de particules PSO produit de très bonnes solutions optimales.

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est l'une des méthodes heuristiques qui ont une forte capacité à trouver l'optimum global bien que moins supérieure à trouver le minimum local. En attendant, GA est très lent car le temps de calcul de la fonction objectif est plus à chaque itération

Sur la base des résultats, nous pouvons conclure que les résultats générés en utilisant l'algorithme d'essaim de particules PSO sont extrêmement efficaces en termes de solution optimale. En effet, ces résultats confirment la fiabilité et la robustesse de la procédure d'inversion.

Dans cet article on a présenté les différents algorithmes d'optimisation par essaim de particules qui ont rencontré un succès remarquable depuis leur création, grâce à leur simplicité et facilité d'implémentation des différents traitements sans que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

Les résultats de simulation obtenus montrent que l'algorithme GA-PSO donne les meilleurs résultats dans un temps de calcul relativement court par rapport aux autres algorithmes utilisés.

An abstract graphic design featuring several overlapping, three-dimensional geometric shapes. The shapes are primarily light blue and grey, with some darker blue accents. They are arranged in a way that creates a sense of depth and movement, resembling a stylized, modern architectural structure or a series of interconnected planes. The overall composition is clean and minimalist.

CHAPITRE 5

Chapitre 5

Applications et Discussion des Résultats

5.1 Introduction:

L'analyse des variations d'impédance des capteurs dans les essais non destructifs (CND) utilisant des capteurs à courants de Foucault (CF) fournit des informations utilisables au contrôleur.

Dans ce chapitre, nous proposons la technique non destructive comme moyen de contrôle des fissures ou des défauts dans les matériaux. Pour cela, une simulation par une approche numérique telle que les éléments finis du contrôle non destructif en utilisant les courants de Foucault est la mieux indiquée pour la détection des fissures et éventuellement l'étude de leur propagation par la détermination des paramètres de fissure tels que le Facteur d'intensité de contrainte et l'intégrale J . [104]

Nous présentons une nouvelle méthode pour calculer les paramètres de mécanique de la rupture tels que le Facteur d'intensité de contrainte (FIC) et le taux de rejets d'énergie (J) en mesurant et en examinant les courants de Foucault relatifs. C'est une nouvelle méthode basée sur le courant de Foucault pour évaluer le FIC et le J -Integral par la variation de l'impédance. Dans le processus, un vecteur magnétique est formulé théoriquement et des résultats obtenus des applications appropriées sont examinés pour assurer l'uniformité de théorie. De l'autre côté, une simulation par une approche numérique basée sur la méthode d'élément fini est utilisée pour détecter des fissures en matériaux et pour étudier par la suite leur propagation par un paramètre crucial SIF et J -Integral. Cette méthode a émergé en tant qu'une des techniques les plus efficaces pour l'inspection des fissures en matériaux et la prédiction du niveau critique de la direction de la croissance des fissures pour déterminer la croissance constante des fissures à l'aide du modèle classique de Paris. [105]

Dans ce chapitre, nous présentons l'estimation des paramètres de la mécanique de rupture pour la détection de l'orientation de la fissure. Pour cette raison, nous avons proposé une approche inverse pour détecter l'orientation de la fissure dans un modèle axisymétrique basé sur l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Pour cela, une simulation par une approche numérique telle que les éléments finis du contrôle non destructif en utilisant les courants de Foucault. Les résultats obtenus à cause de la méthode d'optimisation par essaim de particules PSO (plus simple, facile à implémenter, moins coûteuse en terme d'espace mémoire et de vitesse, etc), cette approche nous donne de bon résultat par rapport à la méthode directe pour prédire l'orientation des fissures lorsqu'il est difficile de trouver l'orientation des fissures par courants de Foucault.

5.2 Cas d'application :

Notre travail se base sur deux niveaux :

- Dans un premier temps, nous chercherons le vecteur magnétique potentiel A à adopter par la méthode des éléments finis 3D, à partir duquel nous pouvons qui seront utilisés pour la détection et l'orientation des fissures sur les matériaux étudiés. Dans le processus, un vecteur magnétique est formulé théoriquement et des résultats obtenus par la nouvelle méthode basée sur le courant de Foucault pour évaluer le FIC et le J-Integral par la variation de l'impédance.
- La deuxième étape présente une solution au problème. Nous utilisons une nouvelle méthode évolutive appelée optimisation par essaim de particules (l'algorithme de cette méthode est décrit au chapitre 4).

Premier partie :

5.2.1 Evaluation vecteur magnétique potentiel avec MEF

Afin de valider les résultats obtenus par le programme réalisé, un exemple est donné comme suit. Il s'agit d'une tube avec une fissure débouchant indiqué dans la figure 5.1, Elle est place un capteur caractérisé par la conductivité élevée 10^6 Sm^{-1} et la perméabilité caractérisée par un charge sinusoïdal de densité $J = 2,71 \cdot 10^6 \text{ A/m}$ et une fréquence de 10 Khz. [4].

Les paramètres mécaniques et électriques du tube axisymétrique sont mentionnés dans le tableau (5-1)

Tableau (5.1) : Les propriétés mécaniques et électriques du tube

Propriété mécaniques		Propriété électriques	
Young's Modulus (E)	130 (GPa)	Magnetic permeability μ	$1 \text{ V.s.A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Shear Modulus (G)	39 (GPa)	Conductivity σ	10^6 Sm^{-1}
Poisson's Ratio (ν)	0,33	Frequency	10 kHz
Fracture Toughness K_{IC}	$2400 \text{ N} \cdot \text{mm}^{(-3/2)}$		

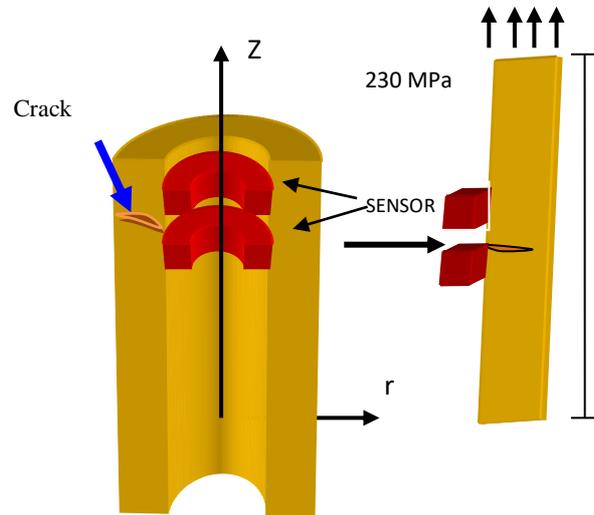


Figure 5.1. System tube avec une fissure

Le modèle et maillage 3D de tube cylindrique et représenter du champ et flux magnétique sont illustrées dans les figures 5.2 et 5.3, 5.4 et 5.5.

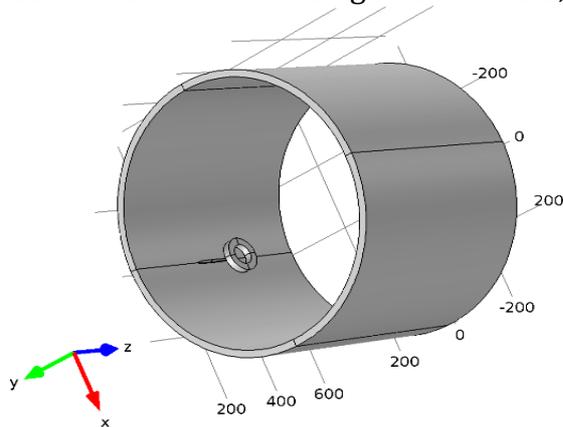


Figure 5.2 Modèle de présentation.

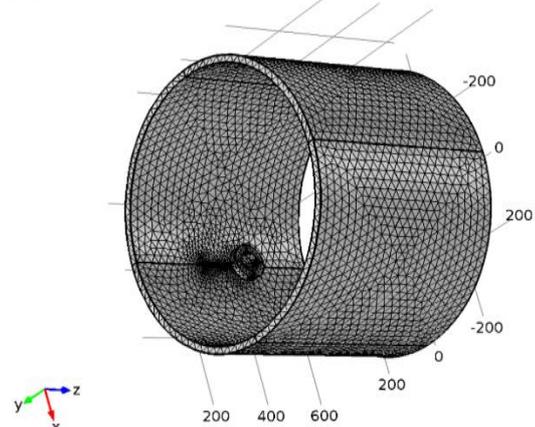


Figure 5.3 Maillage en 3D de tube cylindrique.

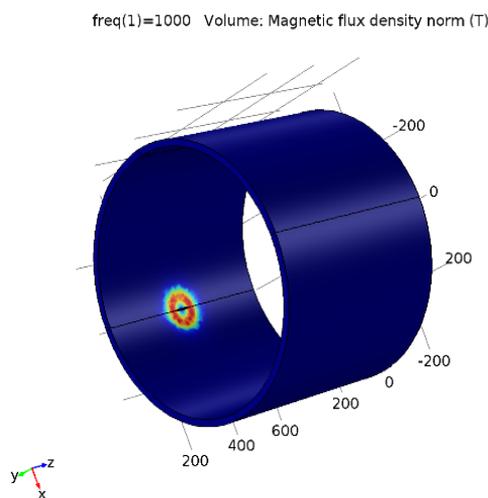


Figure 5.4 Représentation du potentiel vecteur magnétique.

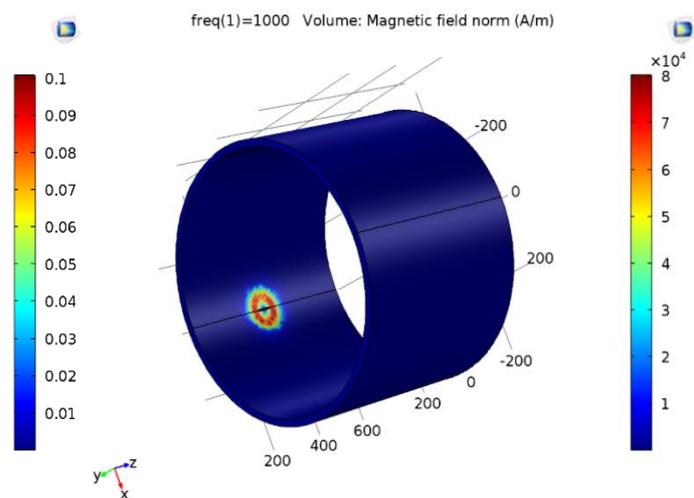


Figure 5.5 Le champ magnétique.

La densité de courant dans un tube selon l'axe X et Y-Z et résultant N sont illustrées dans les figures 5.6 et 5.7, 5.8 et 5.9.

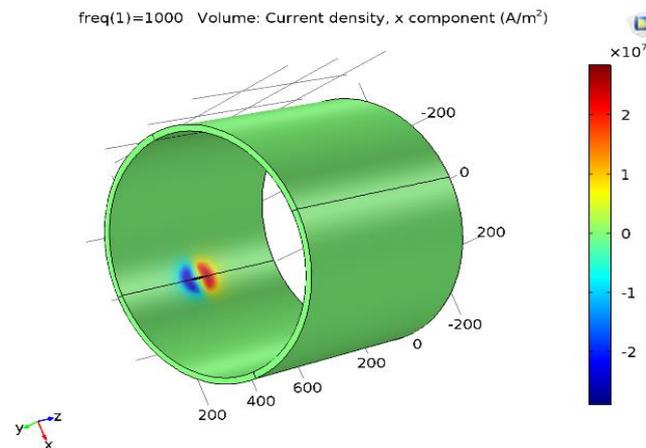


Figure 5.6 La densité de courant résultante J_X.

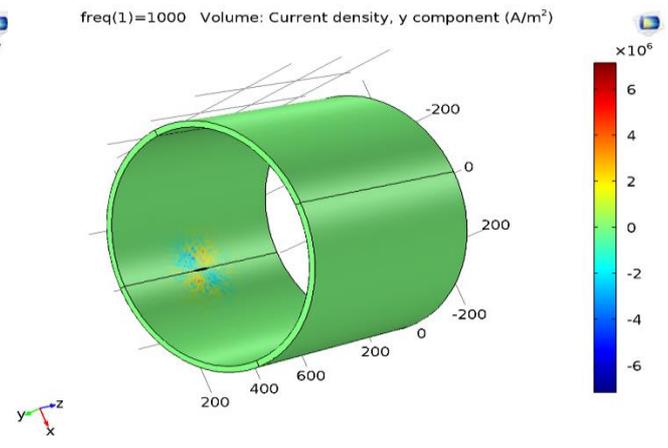


Figure 5.7 La densité de courant résultante J_Y.

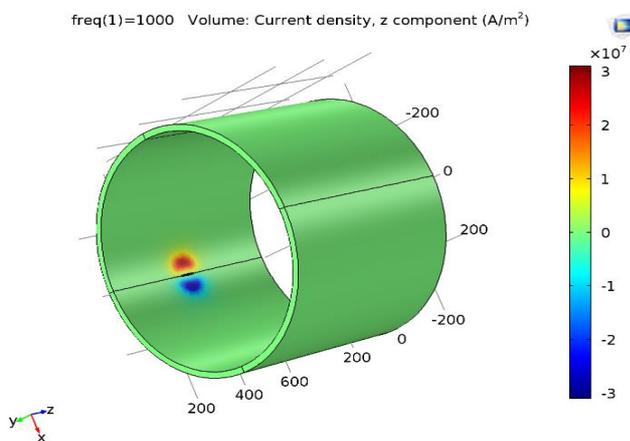


Figure 5.8 La densité de courant résultante J_Z.

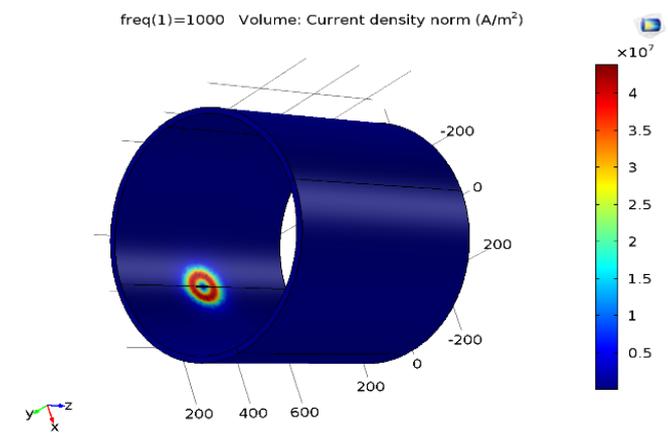


Figure 5.9 La densité de courant résultante N.

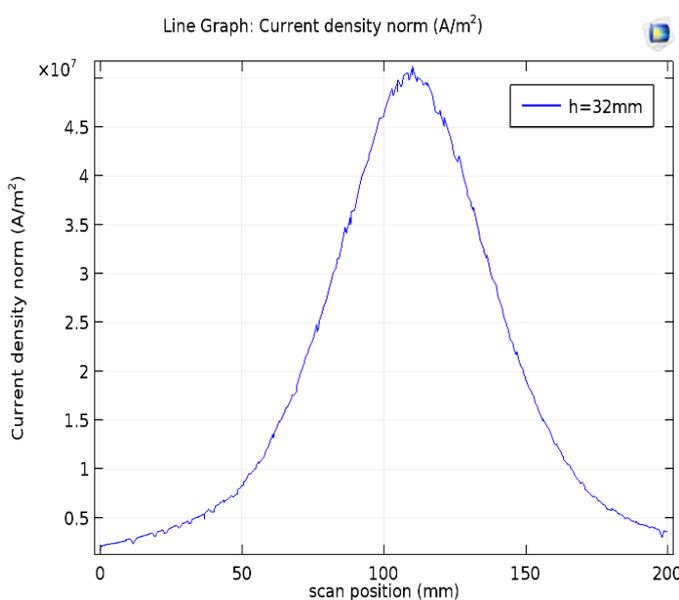


Figure 5.10 La densité vs fissure.

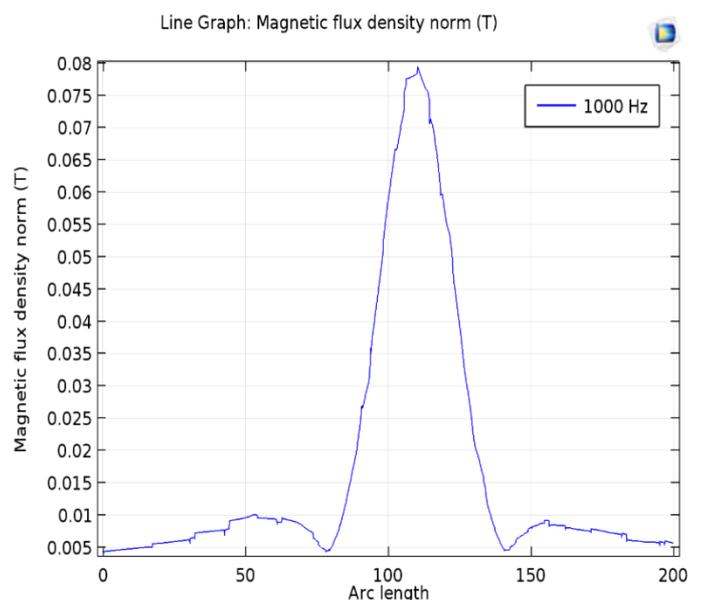


Figure 5.11 Le champ magnétique vs fissure.

5.2.2 Interprétation de résultats :

Les résultats de la simulation pour une fissure de tube avec un champ magnétique sont affichés ci-dessous :

- L'orientation et la distribution de la norme de densité de flux magnétique et du champ magnétique sont illustrées dans les figures 5.10 et 5.11.

Nous avons développé un code sous COMSOL multiphysique pour simuler la configuration illustrée ci-dessus. Après simulation nous avons obtenu les résultats suivants dont la fissure et le déplacement du capteur, ont été pris en considération :

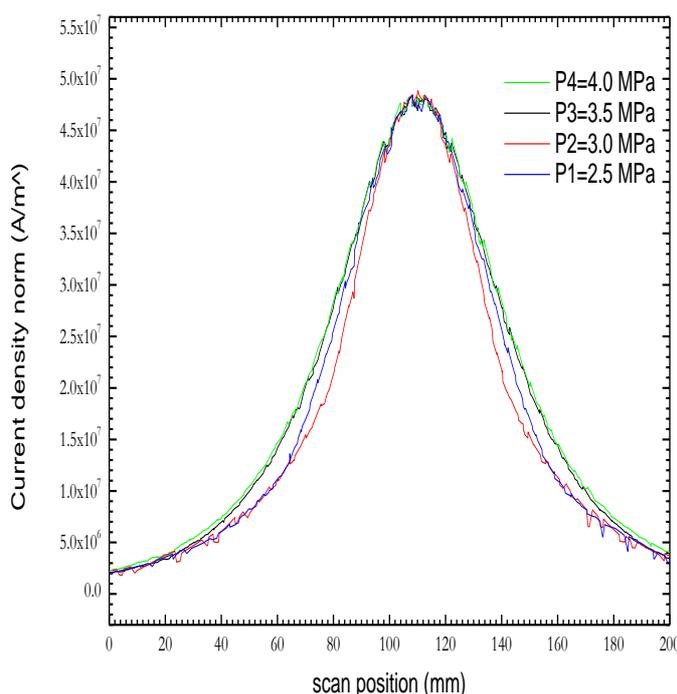


Figure 5.12 La densité vs Propagation de fissure.

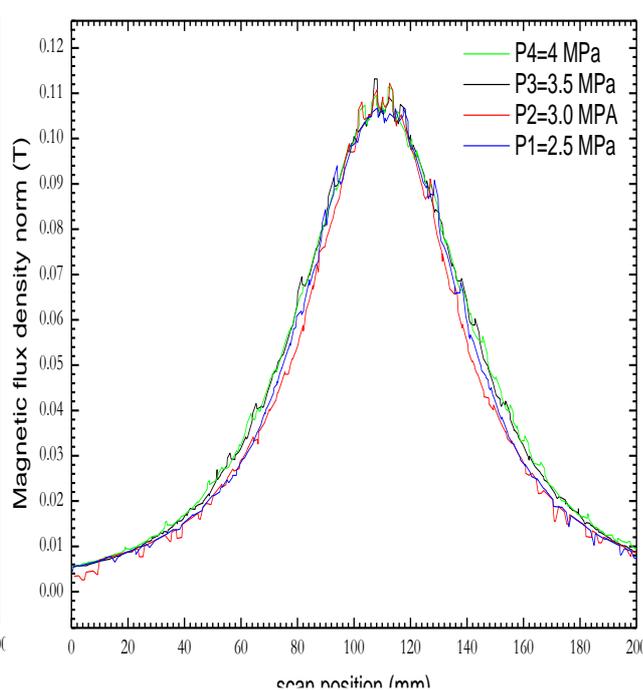


Figure 5.13 Le champ magnétique vs Propagation de fissure.

- Les figures 5.12 et 5.13 montrent que lorsque la croissance des fissures augmente sous la pression du gaz, les courants de Foucault augmentent également proportionnellement au même rythme. Il est clair que la propagation des fissures a un impact important sur l'amplitude des courants de Foucault.
- Nous avons développé un code sous Matlab pour simuler la configuration illustrée ci-dessus. Après simulation nous avons obtenu les résultats suivants dont la fissure et le déplacement du capteur ont été pris en considération. Comme l'indique les figures (5.14) et (5.15)

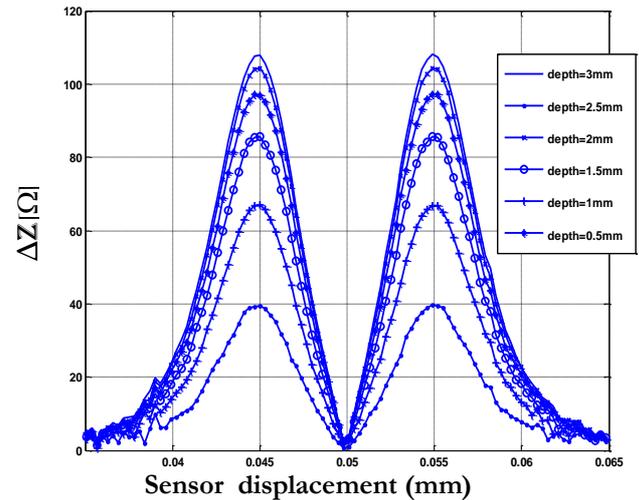
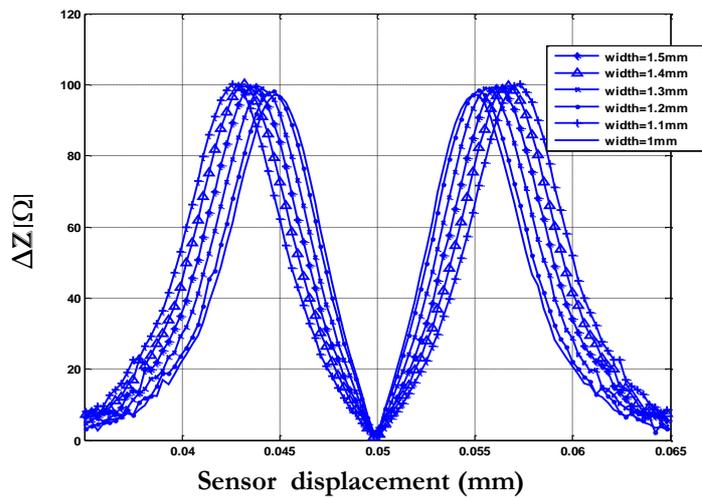


Figure 5.14 Impédance Z vs largeur de fissure. **Figure 5.15** Impédance Z vs profondeur de fissure.

- Il est clair que la différence d'impédance ΔZ dépend de la largeur du défaut. Ce dernier augmente ΔZ et par conséquent influence l'impédance. D'autre part, la différence d'impédance ΔZ dépend de la largeur du défaut. Ce dernier augmente ΔZ et, au contraire, lorsqu'il diminue ΔZ diminue également. Il est prouvé que la profondeur du défaut influence l'impédance.

5.2.3 Evaluation l'orientation de la fissure:

Pour clarifier plus précisément l'effet de l'orientation de la fissure, la Figure 5.16.a et 5.16.b montre la variation de la longueur de fissure en fonction des contraintes.

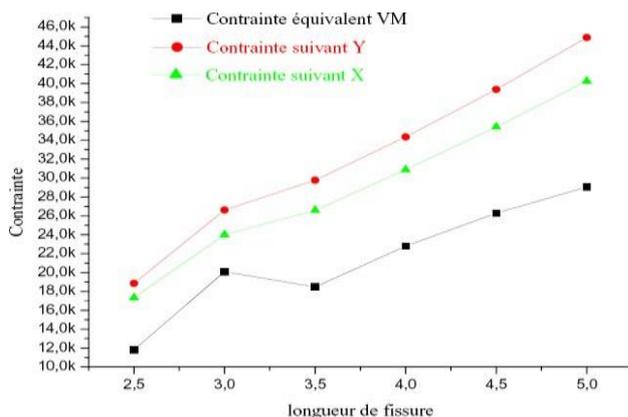


Figure 16.a. Variation des contraintes en fonction de la longueur de la fissure.

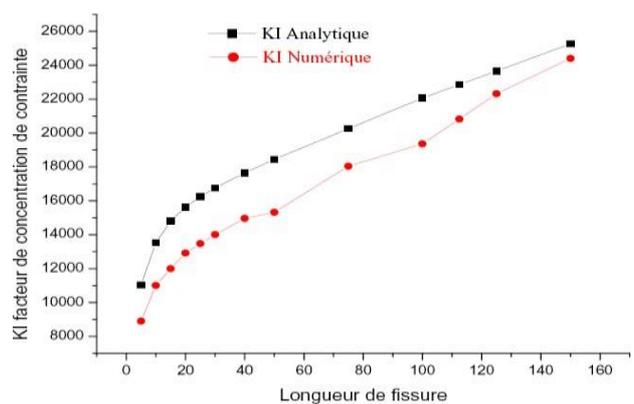


Figure 16.b. Variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la variation d'angle de propagation.

Sur l'intervalle d'angle , la croît approximativement de façon linéaire tandis qu'elle décroît relativement de façon exponentielle, et inversement pour l'intervalle . Tous ces faits peuvent s'expliquer par l'expression et la géométrie du modèle. En effet, à partir de l'équation (5.1) on peut obtenir l'expression de comme :

$$(A) = \frac{(F)}{[M] + jw[L]} \tag{5.1}$$

D'après les expressions des matrices et , mentionnées dans le chapitre précédent, on peut les symboliser comme des fonctions linéaires en fonction des entrées du problème comme :

$$A = \frac{g(J_s)}{h\left(\frac{1}{\mu_{under}}\right) + jm(f, \sigma_{under})} \tag{5.2}$$

with g, h, m fonctions linéaires en fonction de la source de courant J_s , fréquence f , and perméabilité $\frac{1}{\mu_{under}}$, conductivité σ_{under} de plaque entre le capteur et la fissure interne.

La partie imaginaire est plus affectée par l'angle de fissure que la partie réelle. Cela est dû, d'une part, au fait que la région entre la fissure et le capteur. la conductivité de cette région diminue fortement chaque fois qu'on inclut plus d'éléments finis de fissure (les éléments n'ont pas de conductivité) pendant la rotation de fissure. D'autre part, la partie réelle dépend de l'inverse de la perméabilité de la même région. Cette perméabilité augmente légèrement lorsqu'on inclut plus d'éléments finis de la fissure lors de sa rotation.

En utilisant trois niveaux de raffinement du maillage, nous obtenons le résultat de la Figure 5.17.a et 5.17.b.

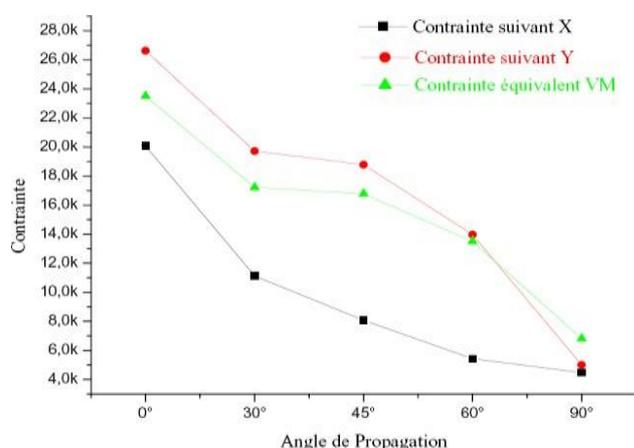


Figure 5.17.a. Variation des contraintes en fonction de l'angle de propagation.

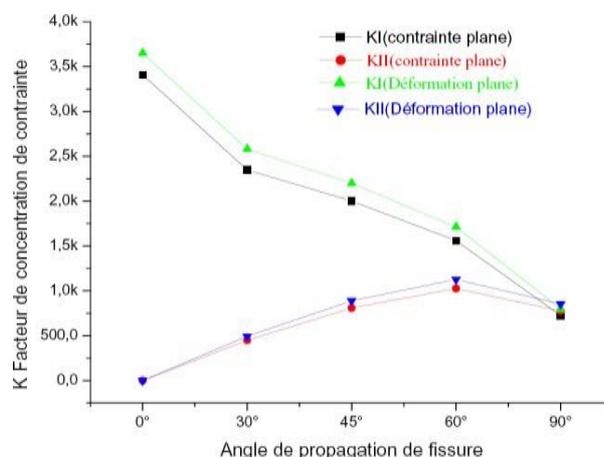


Figure 5.17.b. Variation du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la variation d'angle de propagation.

Pour une fissure initié à l'angle de 45° engendre deux modes (mode I et mode II) ou en l'appel le mode mixte, et en faisant varier l'angle de propagation on observe que le mode I à l'angle 0° KI est de valeur maximale, puis elle diminue progressivement jusqu'à l'angle 90°, et le mode II à 0° le facteur KII est de valeur minimale puis elle augmente, et elle coïncide avec le mode I à l'angle 45° puis elle continue son augmentation jusqu'à l'angle 90° ou KII devient supérieur à KI (Figure 18.a et 18.b).

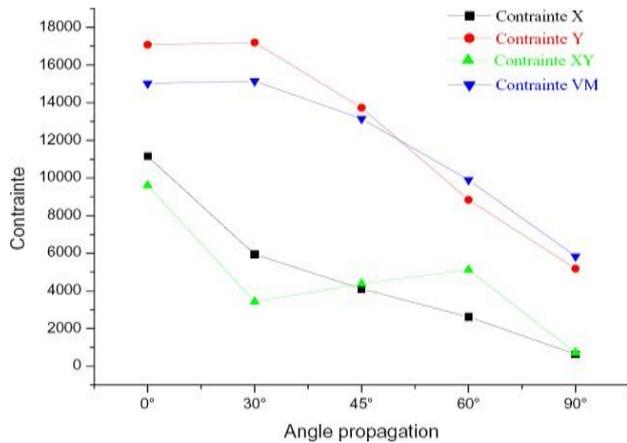


Figure 18.a. Variation des contraintes en fonction d'angle.

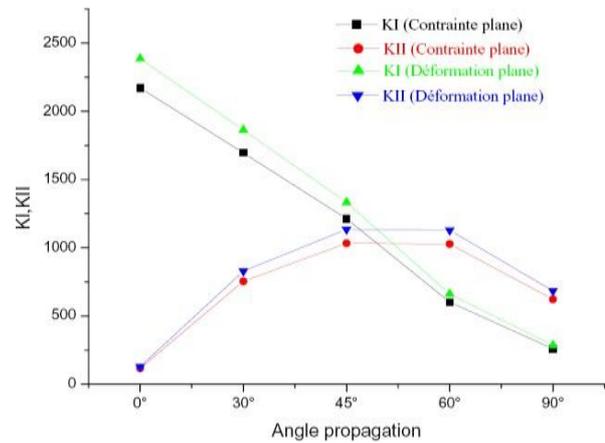


Figure 18.b. Variation de facteur de concentration de contraintes en fonction d'angle.

5.2.4 Evaluation Facteur d'intensité de contraint (FIC) :

Utilisez la formule suivante et les mêmes données que ci-dessus comme ;

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$F = 1.12 - 0.231 \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.95 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

For $a = 10 \text{ mm}$ and $w = 50 \text{ mm}$, $\sigma = 230 \text{ N/mm}^2$.

$$F = 1.12 - 0.231 \left(\frac{10}{50}\right) + 10.55 \left(\frac{10}{50}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{10}{50}\right)^3 + 30.95 \left(\frac{10}{50}\right)^4$$

$$K = 1744.4 \text{ N/mm}^{3/2}$$

Le calcul de FIC par Eddy current et J-intégral sont mentionnés dans le tableau (5-2)

Tableau (5.2) : Calcul de FIC par MN et Eddy current et par intgral de J

Largeur de fissure (mm)	FIC (K) par Méthode théorique ($N/mm^{3/2}$)	FIC (K) par EDDY CURRENT ($N/mm^{3/2}$)	FIC (K) BY J-INTEGRAL ($N/mm^{3/2}$)	Error
10	1744.4	1788.10	1679.34	6.48
11	1920.8	1893.20	1829.00	3.50
12	2082.0	2154.38	1962.60	9.77
13	2252.4	2286.20	2134.10	7.60
14	2433.7	2563.67	2479.04	3.40

Nous obtenons le résultat de la Figure 5.19 et 5.20, concernant le calcul de FIC par la variation de l'impédance.

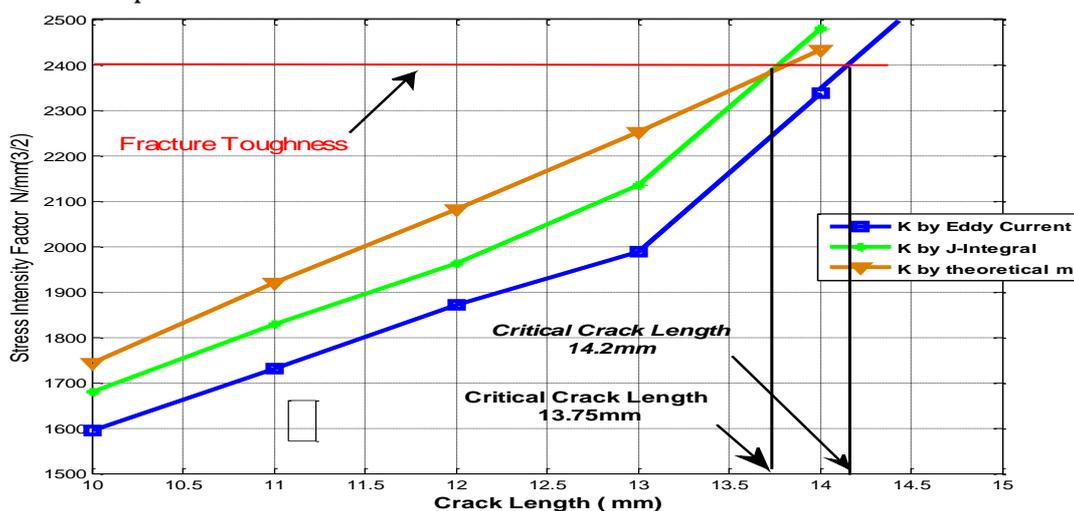


Figure 5.19 Calcul de FIC à largeur de la fissure en Mode I.

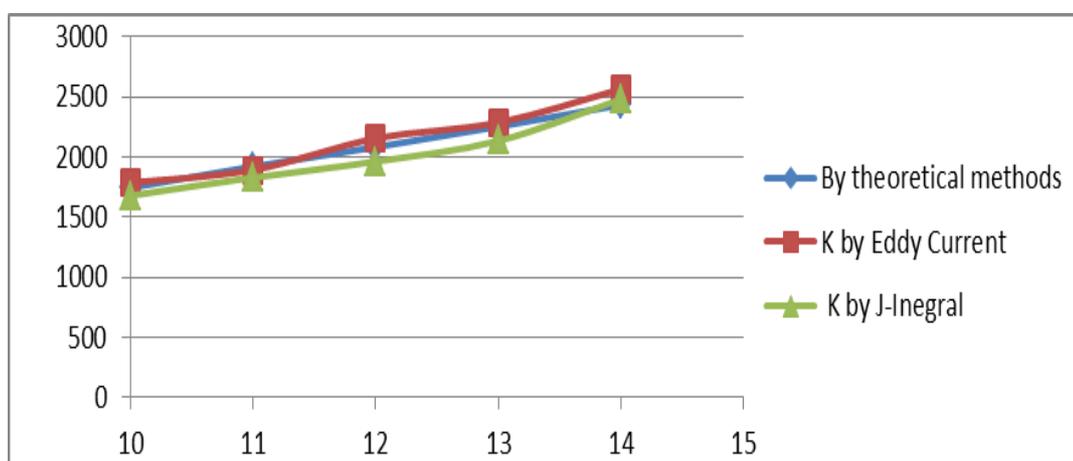


Figure 5.20 : FIC par variation de l'impédance, J-Intégral et méthode théorique ($\sigma = 230N/mm$).

- A partir de la LEFM de tels calculs se sont avérés capables de mesurer **facteur d'intensité de contraint (FIC)** à proximité d'un fond de fissure et d'analyser la croissance de la fissure. Grâce à ces paramètres, nous pouvons déterminer l'état des fissures et d'autres éléments matériels importants tels que le champ de déplacement et le champ de contrainte autour de la bord fissure, illustre dans les figures(5.21-5.22-5.23-5.24) ci-dessous.

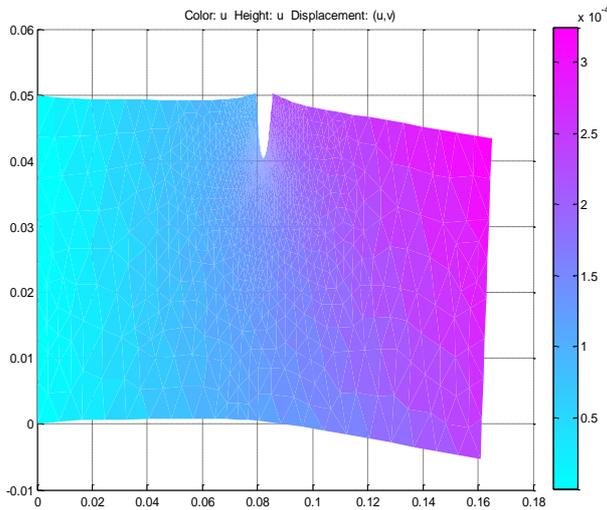


Figure 5.21 Le champ de déplacement U_{xx} au bord fissure.

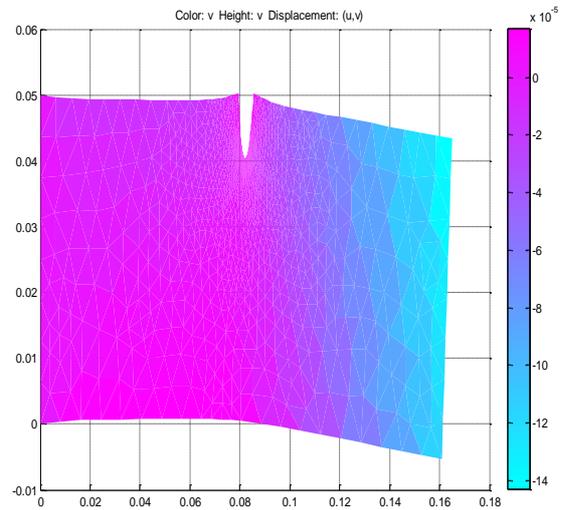


Figure 5.22 Le champ de déplacement U_{yy} au bord fissure.

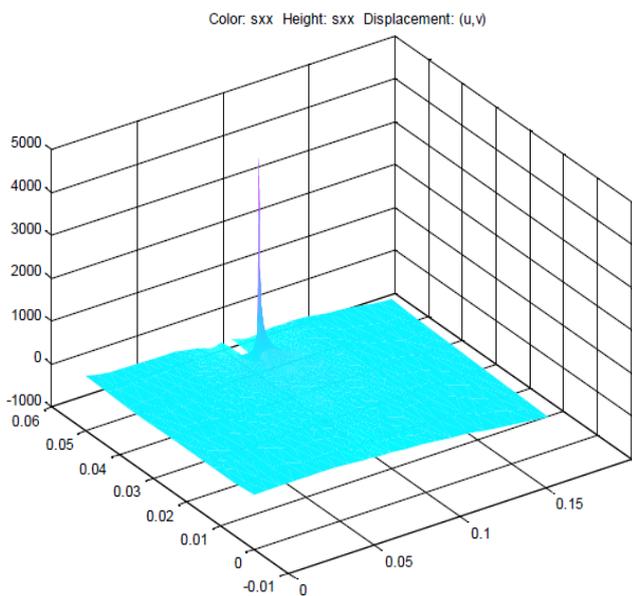


Figure 5.23 Représentation le champs des des contraintes σ_{xx} (N/mm²).

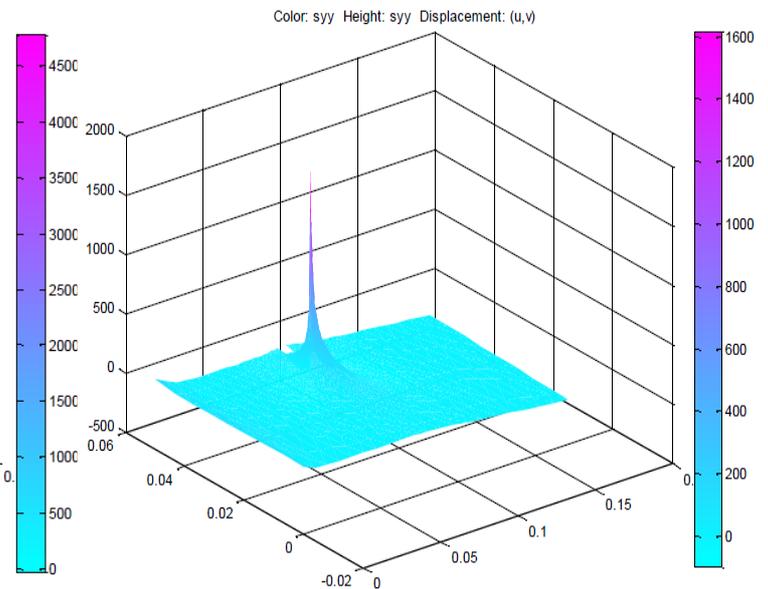


Figure 5.24 Représentation le champs des contraintes σ_{yy} (N/mm²).

Deuxième partie :**5.2.5 Application de l'optimisation de l'essaim de particules (PSO) :**

Cela signifie que les particules examinent à la fois leurs propres meilleures réponses et la meilleure solution que l'essaim a trouvée. PSO analyse le comportement social à l'aide d'une équation mathématique qui permet de contrôler les particules tout au long de leur processus de déplacement [92]. Le déplacement d'une particule est gouverné par trois composantes comme montre de la figure (5.25) Chacune de ces composantes représente une section de l'équation de vitesse de la particule(2).

- La particule a tendance à suivre sa direction actuelle de déplacement.
- La composante cognitive : la particule gravitera au meilleur endroit.
- La composante sociale : la particule sera attirée vers l'emplacement optimal déterminé par ses voisins.

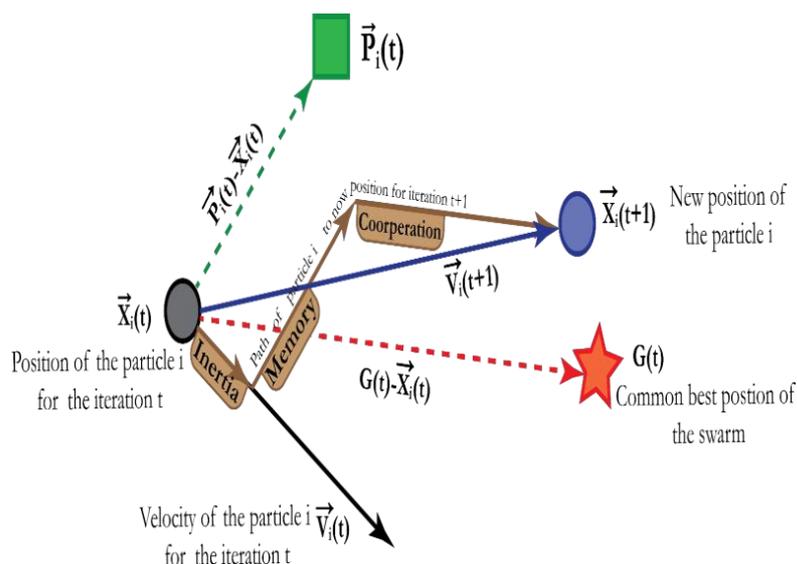


Figure 5.25 Déplacement et vitesse d'un particule (i).

Le déplacement et la vitesse de la particule i entre les itérations t et t + 1 sont donnés, respectivement, par les équations (5.3) et (5.4) :

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c1r1[\chi p_i(t) - \chi_i(t)] + c2r2[g(t) - \chi_i(t)] \quad (5.3)$$

$$\chi_i(t+1) = \chi_i(t) + v_i(t+1) \quad (5.4)$$

La nouvelle vitesse de chaque particule dans l'espace de recherche est composée des éléments suivants :

1. $\omega v_i(t)$ la vitesse de la particule d'origine ou cour de mouvement .
2. La particule de meilleure position précédente est donnée par $c1r1[\chi p_i(t) - \chi_i(t)]$ et utilisée pour mettre à jour la vitesse vers l'emplacement optimal de la particule.
3. La position de la meilleure valeur de attitude donnée par $c2r2[g(t) - \chi_i(t)]$

Les particules se déplacent très rapidement lorsque la vitesse mise à jour a de grandes valeurs, conduisant à passer la meilleure solution. Ainsi, la vitesse des particules doit être limitée à la plage $[-V_{max}, V_{max}]$. La région de recherche augmente avec les valeurs élevées de V_{max} , ce qui fait que les particules s'échappent de la solution optimale et ne parviennent pas à converger vers la solution optimale.

Cependant, la valeur inférieure de V_{max} amène les particules à enquêter dans une minimum région de recherche, ce qui entraîne une convergence plus lente. Ainsi, un choix judicieux de V_{max} doit être fait. Toutes les positions et vitesses des particules sont modifiées à plusieurs reprises jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint [91,93,99]. L'équation (5.2) donne les nouveaux emplacements de toutes les particules en additionnant la vitesse et la position précédente de chaque particule. La méthode PSO utilise le courant pour rechercher de meilleurs emplacements en poussant continuellement les particules vers la meilleure solution $\chi p_i(t), v_i(t), \chi_i(t)$.

Nous avons choisi d'utilisation de tel algorithmme pour résoudre le problème inverse et, par conséquent, trouver la meilleure orientation de fissure.

5.2.6 Description du problème:

L'équations gouvernantes de l'électromagnétique tout d'abord, nous présentons brièvement le problème direct, qui est la modélisation par éléments finis de la détection de l'orientation des fissures dans le modèle axisymétrique à l'aide du CND par CF, comme le montre la figure 5.26. Ce modèle fait partie du tube cylindrique étudié comme illustré à la figure 5.26. L'équation magnétodynamique des problèmes 3D dans le cas d'une source est donnée par l'équation 5.5.

Ainsi l'équation (3.42) qui décrit le problème 2D axisymétrique (plan r,z) dans le cas du tube cylindrique (Fig. 5.26), devient :[15]

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} \right) \right] + \mu\sigma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = -\mu \mathbf{J}_{s\varphi} \tag{5.5}$$

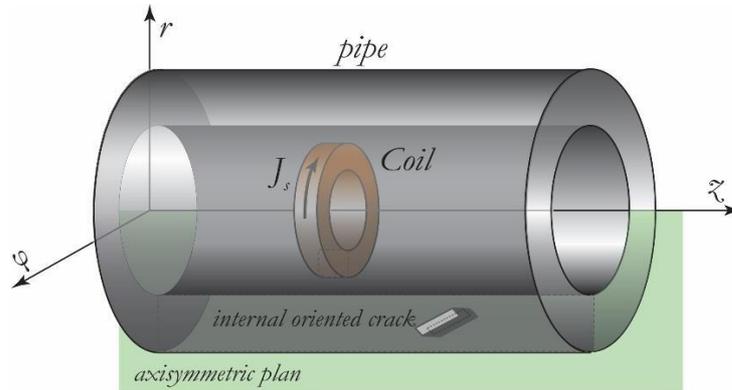


Figure 5.26 Application de courants de Foucault FC.

Un capteur inductif est caractérisé par son impédance donnée par :

$$Z = -\frac{j\omega}{I^2} \int_{\Omega_{coil}} A J_s d\Omega \tag{5.6}$$

Pour la détection d'un problème axisymétrique Dans notre modèle d'étude, a tube avec une fissure interne et orientée sous contrôle par CF est indiquée sur la Fig.4.a.

Nous avons choisi la méthode MEF pour simuler ce processus. Lorsque ce type de problème est considéré comme 2D axisymétrique, nous prenons un seul plan rz (Fig.5.27) pour analyser la détection de l'orientation de la fissure par courants de Foucault en utilisant 2D-FEM. [16,17,18,19]

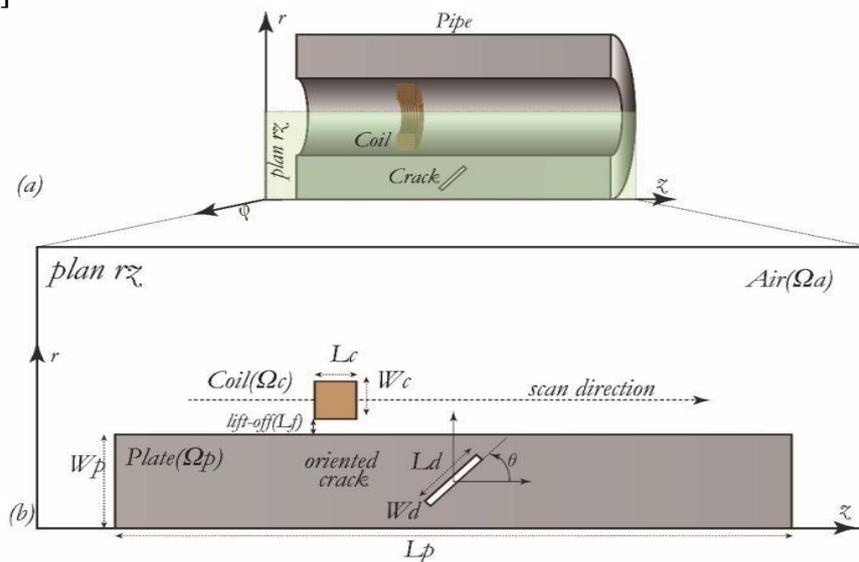


Figure 5.27 Modèle axisymétrique du pipe testé utilisant un capteur absolu.

La simulation qui a été effectuée dans cet article est basée sur la topologie de bobine susmentionnée et l'échantillon de plaque d'aluminium avec une fissure interne orientée ($Ld = 4mm, Wd = 2mm$).

Un courant alternatif est utilisé pour assurer l'excitation de la bobine qui est définie comme suit : $I = I_0 \cos(2\pi ft)$

Pour prendre en compte l'approche d'approximation par MEF, nous utilisons la méthode de Galerkin pour l'équation 4.3 (voir le chapitre 4).

Avec A_j sont des valeurs nodales, $\alpha_j(r, z)$ fonctions de forme pour l'élément e . On arrive à la donnée matricielle suivante :

$$[M]\{A\} + j\omega[L]\{A\} = [F] \quad (5.7)$$

Pour le maillage, on utilise des éléments triangulaires à 3 nœuds, et pour le raffinement du maillage en fonction de la complexité des géométries et des zones de concentration de champ magnétique.

Dans le cas où il n'y a pas de relation uniforme entre l'orientation de la fissure et l'impédance du capteur, donc utilise une méthode alternative pour détacher la difficulté inverse de la détection de l'orientation de la fissure, qui est l'algorithme PSO pour trouver l'angle de fissure optimal. Par exemple et pendant le processus de balayage, le capteur absolu a enregistré la valeur maximale suivante d'impédance normalisée $dZ_{exp} = 0.8114\Omega$.

D'après le problème direct, traité précédemment, cette valeur correspond à l'angle $\theta_{exact} = 30^\circ$.

La question ici est de trouver le meilleur angle d'orientation de fissure correspondant θ_{gb} en utilisant l'optimisation de l'essaim de particules **PSO** avec les paramètres donnée :

- **T = 00-12 Le nombre D'itération.**
- **$V_{max} = 6-8$ La valeur maximale de la vitesse de la Particule.**
- **N = 00-12 Le nombre de Particules.**
- **$\omega = [0.1, 0.9]$ La plage de Poids D'inertie.**
- **$C_1 = 1, C_2 = 2$ Le facteur de cognition et d'apprentissage social respectivement.**
- **$lb = 0, ub = \pi/2$ La bande inférieure et la bande supérieure de la zone de recherche des angles d'orientation des fissures, respectivement.**

Dans cet exemple, la fonction de l'aptitude est donnée par :

$$fit = \left| \frac{dZ_{est} - dZ_{exp}}{dZ_{exp}} \right| \quad (5.8)$$

où dZ est l'impédance normalisée estimée à l'aide du **PSO** et dZ_{exp} est la valeur numérique de l'impédance normalisée qui est calculée directement par courants de Foucault.

5.2.7. Interprétation de résultats :

Nous avons tracé des courbes des valeurs de la fonction-objectif au cours de l'évolution des générations pour les deux programmes du PSO et du PSOPC, les figures (5.28.a et b et c et d).

La comparaison des deux courbes de chaque graphe de la figure, nous permet de constater que la convergence du programme de PSOPC est plus rapide par rapport à celle du programme de PSO. Cette convergence montre l'influence positive du rassemblement passif sur le temps de la recherche des solutions optimales. Ainsi nous pouvons dire que le rapprochement des particules au cours de l'évolution de l'essaim conduit à un regroupement plus rapide. Mais ce rassemblement a un effet négatif sur l'aspect de la diversité des solutions optimales ce qui justifié la fiabilité des résultats trouvées par la méthode du PSO en comparaison avec celle du PSOPC.

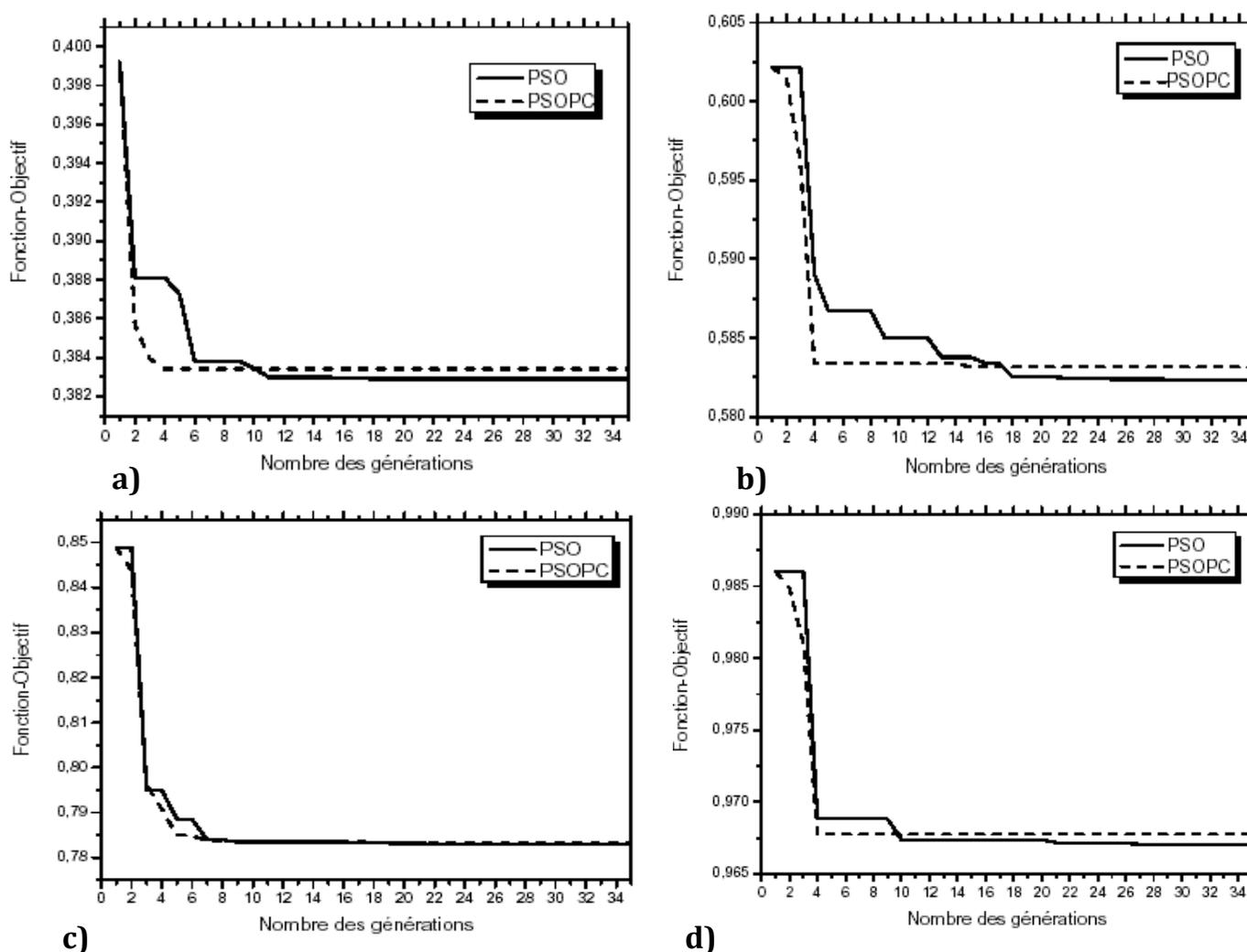


Figure 5.28 Les graphes de la fonction objectif en fonction de nombre de génération.

L'altitude décroît exponentiellement avec le nombre d'itérations ce qui prouve que le PSO converge rapidement du fait de la simplicité du problème inverse traité.

La figure (5.29.a et 29.b et 29.c-29.d) représente les courbes comparatives des valeurs du coût et du temps de production trouvées par les trois méthodes de résolution utilisées : la méthode du gradient MG, l'algorithme génétique GA et l'algorithme à essaim de particules PSO pour chaque particule.

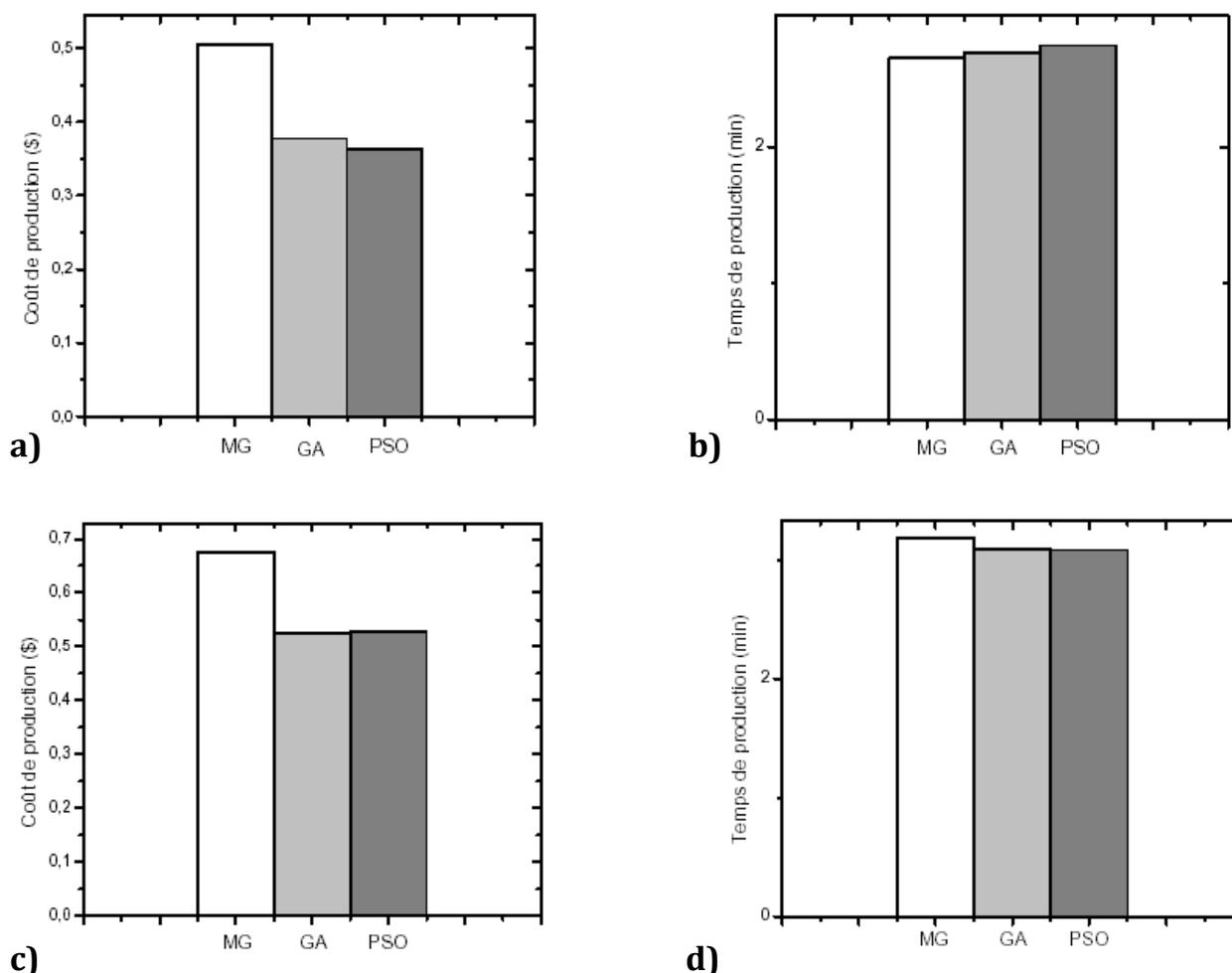


Figure 5.29 Résultat global du PSO pour chaque itération.

Cela est dû au fait que l'angle de fissure se situe au milieu de la zone de recherche $[0, \pi/2]$ et au caractère aléatoire de la recherche qui provoque cette anomalie. Le temps de calcul pour 12 particules et 12 itérations correspondant à 965 s. Il peut être considéré comme relativement important, mais il est acceptable si l'on considère la taille du problème traité et la précision des résultats obtenus.

Les résultats précédents nécessitent plus d'analyses sur la forme physique personnelle et la meilleure solution de chaque particule et étudient également l'effet du nombre de particules,

du nombre d'itérations sur la exactitude des conséquences et le temps nécessaire pour le calcul. Dans un premier temps, les tableaux 5.3 et 5.4 présentent respectivement la fitness (attitude) personnelle et la meilleure solution pour chaque particule à chaque itération .

Tableau 5.3 : Attitude personnel des particules à chaque itération

Itérations (t)												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.10175	0.12891	0.17438	0.18899	0.08841	0.11801	0.13162	0.06922	0.00485	0.02202	0.02151	0.01902
2	0.15721	0.11878	0.01283	0.07996	0.00940	0.05106	0.03055	0.05391	0.04348	0.02909	0.02348	0.02019
3	0.29383	0.03872	0.22570	0.27986	0.23390	0.18577	0.20300	0.00426	0.08130	0.05772	0.04130	0.03772
4	0.31075	0.10470	0.24988	0.06565	0.18708	0.27809	0.05372	0.20131	0.12371	0.08561	0.09371	0.08061
5	0.15273	0.14750	0.03796	0.06820	0.03471	0.08869	0.02614	0.00370	0.01901	0.01393	0.01101	0.01063
6	0.28615	0.10104	0.25773	0.27217	0.23111	0.26044	0.28602	0.12783	0.24807	0.14803	0.11807	0.09853
7	0.30983	0.27422	0.18692	0.30305	0.25482	0.26491	0.27807	0.03172	0.12136	0.04489	0.03136	0.02469
8	0.12645	0.10050	0.01168	0.04677	0.03122	0.01424	0.02550	0.05085	0.04284	0.04809	0.03984	0.02709
9	0.07335	0.07335	0.07165	0.04089	0.01242	0.00505	0.00198	0.00020	0.00022	0.00042	0.00012	0.00011
10	0.30537	0.21405	0.09650	0.23487	0.28001	0.31259	0.30473	0.22073	0.04517	0.03517	0.02537	0.02216
11	0.27325	0.24750	0.09165	0.24069	0.29252	0.32505	0.31198	0.21040	0.04026	0.03745	0.02632	0.02631
12	0.29547	0.25405	0.10650	0.26481	0.30021	0.34269	0.36573	0.22163	0.04917	0.03816	0.02737	0.02712

Tableau 5.4 : Attitude personnel pour meilleur solution des particules à chaque itération

Itérations (t)												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	55.864	29.776	28.136	52.459	54.809	33.624	50.645	45.387	43.289	46.223	50.645	52.459
2	55.007	44.045	38.694	45.709	49.567	42.443	49.840	48.887	42.529	49.304	49.840	45.709
3	48.624	23.927	77.681	23.192	28.493	64.461	45.336	38.578	50.039	40.995	45.336	23.192
4	35.911	16.696	40.021	62.329	11.464	49.823	64.245	55.574	52.176	40.445	64.245	62.329
5	57.871	48.555	39.826	48.276	52.485	47.523	44.477	43.580	46.245	45.990	44.477	48.276
6	37.023	72.366	13.581	23.499	72.854	-10.367	33.909	70.575	32.073	49.472	33.909	23.499
7	14.142	62.411	84.808	71.565	13.962	76.647	48.002	34.552	49.006	48.953	48.002	71.565
8	53.533	46.052	40.889	47.956	46.272	42.996	49.547	41.329	40.759	51.145	49.547	47.956
9	51.043	50.872	48.826	44.023	44.597	44.873	44.986	44.025	44.967	44.995	44.986	44.023
10	66.549	36.711	19.274	77.480	90.338	6.330	67.624	49.032	42.041	43.163	67.624	77.480
11	57.871	48.555	39.826	48.276	52.485	47.523	44.477	43.580	46.245	45.990	44.477	48.276
12	53.533	46.052	40.889	47.956	46.272	42.996	49.547	41.329	40.759	51.145	49.547	47.956

D'après les tableaux 5.3 et 5.4, nous observons que la fitness personnelle et la meilleure solution de toutes les particules diminuent en passant de l'itération 1 à l'itération 12. Néanmoins, il existe des fluctuations dues au caractère aléatoire de et dans l'expression de la vitesse. Pour plus de précisions sur l'observation précédente, les figures 5.30 et 5.31 illustrent respectivement l'aptitude personnelle et la meilleure solution personnelle des particules au cours des 12 itérations.

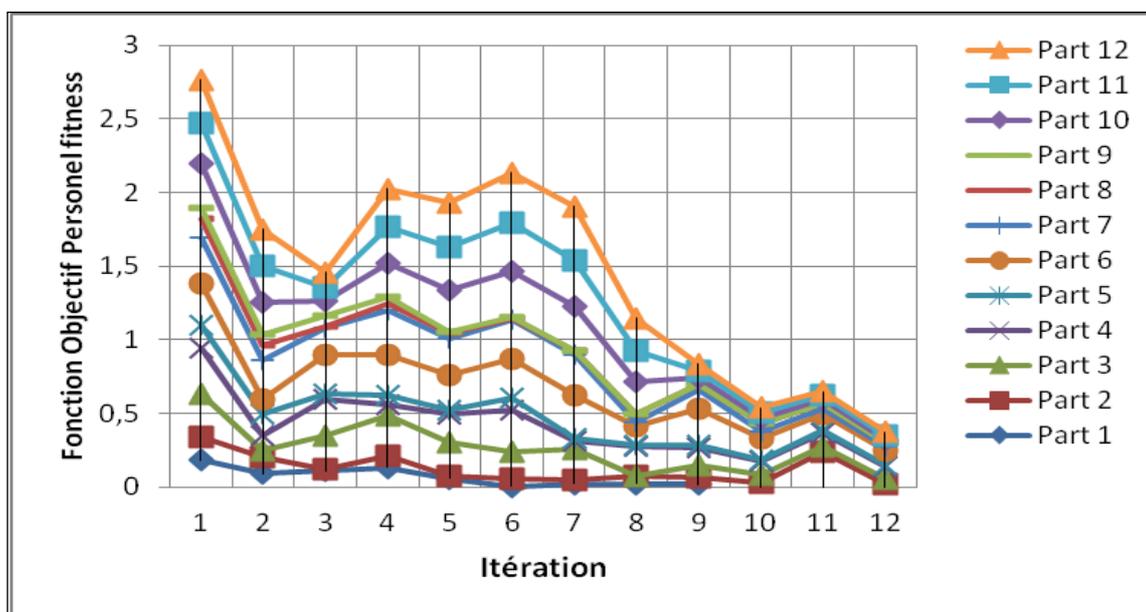


Figure 5.30 : Fitness personnel des particules pour chaque itération.

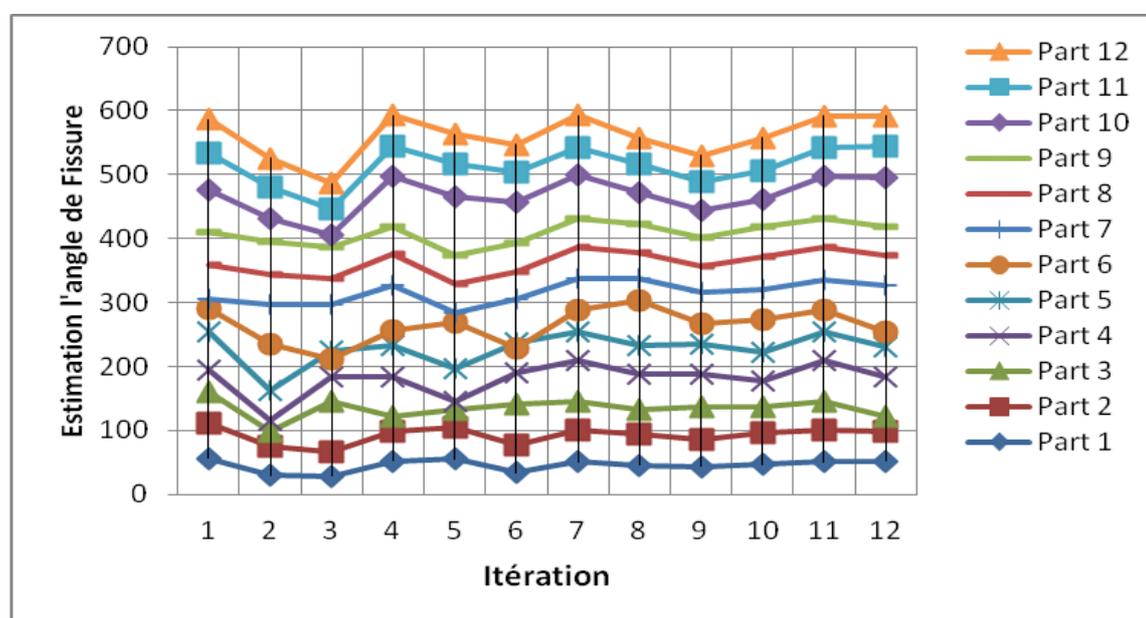


Figure 5.31 : Estimation de Angle de fissure des particules pour chaque itération.

Il obtenu clairement de la figure 5.31 que toutes les meilleures solutions personnelles (angle de fissure) convergent vers la valeur exacte et que la particule 7 a le taux de convergence le plus rapide.

La figure 5.32 présente l'aptitude pour une plage de 00 à 200 itérations avec un pas de 40 itérations et un nombre fixe de particules égal à 12. La recherche paramétrique sur l'itération et le nombre de particules est maintenant abordée.

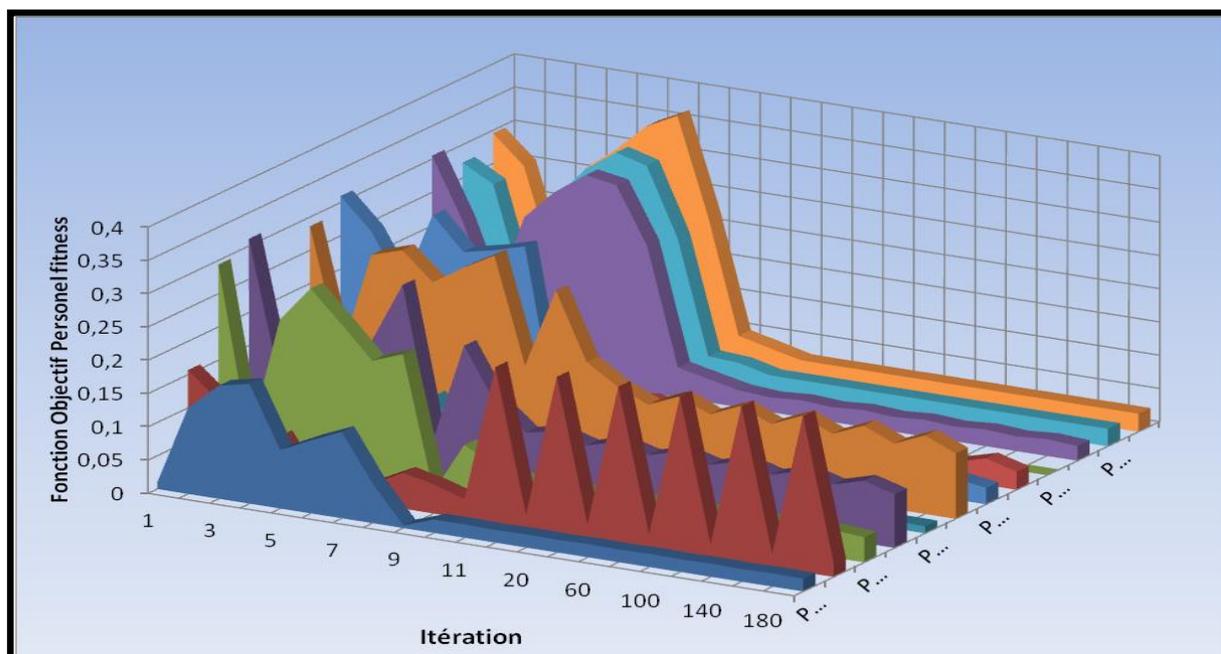


Figure 5.32 Effet du nombre d'itérations sur la fonction d'objectif.

Premièrement, l'altitude diminue continuellement quel que soit le nombre final d'itération, mais selon un schéma différent. Cela s'explique par le caractère aléatoire de la vitesse des particules.

Deuxièmement, la plupart des éléments convergent vers la valeur de fitness minimale à 30 itérations. Par conséquent, 30 itérations suffisent à ce type de problème pour fournir une précision adéquate des résultats. L'effet du nombre d'itérations sur les trois facteurs critiques, à savoir la meilleure solution (orientation de la fissure).

Les interprétations de ces résultats savent être résumées également suit : D'après la figure 5.32, les convergences PSO, avec une dynamique stable, vers le meilleur angle, atteignent pratiquement celui de l'itération 40, un fait conforme aux déclarations précédentes extraites de la figure 5.32. De plus, le temps de calcul amplifie linéairement avec le nombre d'itérations, ce qui est un fait logique, car les itérations ne sont pas liées.

La meilleure solution de propagation de fissure autour de la valeur exacte et y converge à 60 particules. La fluctuation dépend de la nature aléatoire des vitesses des particules. Cette fluctuation disparaît au-dessus de 60 particules et cela indique que les mises à jour de vitesse deviennent très faibles. Ceci marque donc la fin de l'opération d'optimisation.

L'erreur relative oscille au-dessus de la valeur zéro et converge, également, vers sa valeur minimale au-dessus de 60 particules.

Le temps de calcul consommé augmente linéairement avec le nombre d'itérations car les particules interagissent indépendamment les unes des autres.

5.3 Conclusion

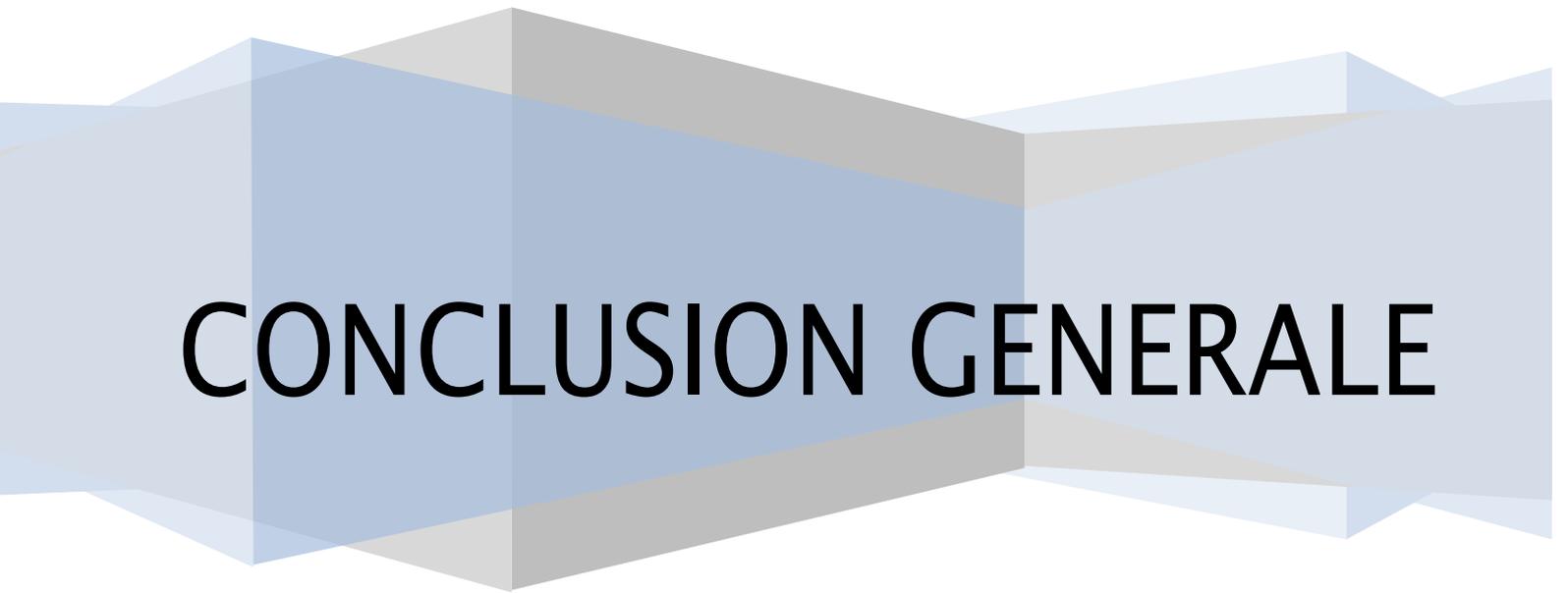
Pour faire aux difficultés de l'ingénieur à utiliser les approches directes proposées, en particulier pour ce présent travail, nous proposons une méthode alternative basée sur PSO pour traiter le problème inverse du modèle axisymétrique en utilisant des contrôle non destructifs (courants de Foucault). L'approche proposée nous permet de trouver et même de prédire l'orientation des fissures cachées en utilisant les valeurs mesurées de l'impédance du système. Nous avons choisi l'impédance composant la signature de la fissure afin d'établir une comparaison entre les données directes du problème et celles acquises par le PSO en un temps raisonnable. De plus, les résultats démontrent sa viabilité et son caractère raisonnable.

Les résultats de simulation obtenus montre que l'algorithme PSO donne les meilleurs résultats dans un temps de calcul relativement court par rapport aux autres algorithmes utilisés.

Les essaims de particules ont pour particularité d'être l'un des algorithmes métaheuristiques le plus simple en terme de complexité d'équations. Ainsi seule la mémorisation du meilleur globale g et du meilleur individuel x_{pi} est nécessaires pour le calcul de l'itération suivante en utilisant uniquement deux équations. Cette particularité est intéressante dans le cadre d'une implémentation dans un système à faibles ressources informatiques ou encore soumis à des contraintes de type temps réel.

Cette stratégie est structurée en trois parties, la première a été consacrée à la modélisation du système électromagnétique (bobine+matériau+fissure) par éléments finis 3D en vue de la construction d'une base de données pour l'inversion. Cette modélisation nous a permis d'étudier la sensibilité du modèle concernant les différentes grandeurs de la fissure, en l'occurrence la longueur, la profondeur et l'épaisseur, sur le signal issu du capteur CF. Le choix adéquat de la représentation du signal issu du capteur a été déterminant dans la suite de l'élaboration de cette stratégie. Cette étude a montré que dans le cas des fissures minces, on peut tirer les enseignements suivants :

- Le signal CF est indépendant de l'épaisseur de la fissure.
- Le signal CF dépend fortement de la longueur de la fissure.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Afin d'effectuer des essais non destructifs (CND) à l'aide de l'essai de Eddy current, il faut avoir une compréhension des divers phénomènes qui peuvent se produire pendant l'évolution de détection. Il s'agit spécialement des effets électromagnétiques et thermiques. En utilisant la technique CND pour détecter les fissures, les appareils électriques peuvent être protégés contre les dommages et la sécurité du personnel peut être améliorée.

Nos études s'intéressent à l'application de la technique CND par courants de Foucault sur des matériaux conductibles. Cette méthode exploite un phénomène électromagnétique axisymétrique qui opère à travers deux dimensions. Notre dispositif de contrôle est composé à la fois d'un capteur à bobine et d'une charge conductrice, qui peut être un tube solide ou creux. Pour modéliser notre système, y compris le capteur, la charge et l'air, nous avons utilisé la méthode des éléments finis.

Notre étude s'est basée sur la méthode du CND par courant de Foucault, appliquée aux matériaux conducteurs, exploitant le phénomène électromagnétique axisymétrique en deux dimensions. Notre dispositif de contrôle est constitué d'un capteur (bobine) et une charge. Cette dernière est une pièce conductrice (un tube creux ou plein). Les méthodes avec lesquelles on a modélisé notre système (capteur, charge et air) sont la méthode des éléments finis.

Les paramètres qui affectent le contrôle propriété des matériaux doivent être pris en compte lors du contrôle des matériaux, tels que : les propres électriques, géométriques et mécaniques des dispositifs de contrôle et les fissures pour assurer une bonne réponse du capteur.

L'utilisation de ces techniques dans la recherche CND présente de nombreux avantages par rapport aux autres façons. La simulation a été limitée aux cas de capteurs absolus et différentiels.

Le capteur doit être excité à haute fréquence pour détecter les défauts externes. L'emplacement du défaut (interne, intermédiaire ou externe) influence considérablement l'impédance. Les résultats montrent que le capteur différentiel a une grande sensibilité à détecter les défauts de surface. En raison de son faible coût et de sa précision (erreur minimale), ce capteur est très apprécié pour ses applications industrielles.

Connaître les propriétés géométriques (profondeur et longueur) et physiques (conductivité, transmittance) des cibles du domaine CND-CF est l'un des possibilités qui attrapent les industriels. Cela conduit au fait que la solution du problème direct est limitée, nous devons

CONCLUSION GENERALE

donc passer au problème inverse la chose à avoir.

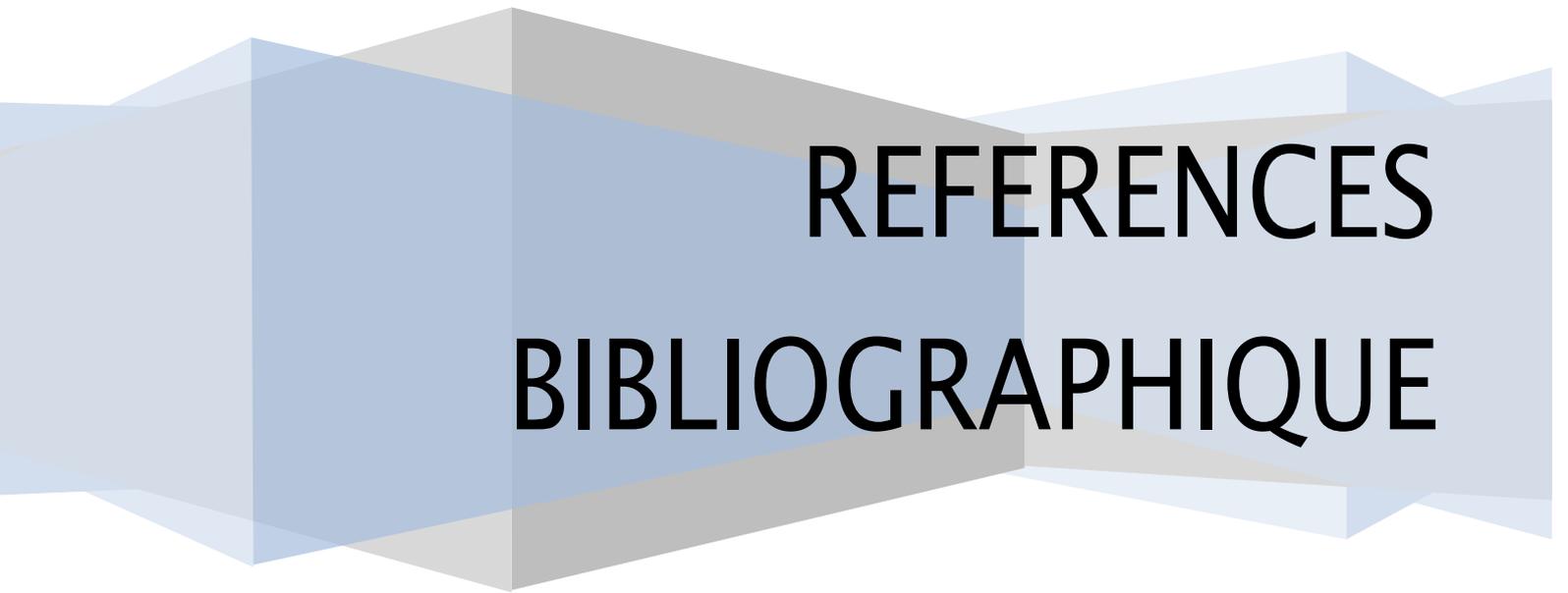
Par conséquent, nous avons pris la décision d'utiliser l'IA pour résoudre ce problème. Il vise à caractériser géométriquement les défauts axisymétriques, comme l'optimisation des essaims de particules PSO.

En termes de complexité des équations, les essaims de particules appartiennent aux algorithmes métaheuristiques les plus simples. Par conséquent, il suffit de retenir le meilleur global et le meilleur x_{pi} individuel pour calculer la prochaine itération avec seulement deux équations. La mise en œuvre de cette fonction dans des systèmes à faibles ressources de calcul ou des limitations de type temps réel est intéressante.

Le facteur d'intensité de contrainte peut alors être déterminé en détectant le déplacement à fond de fissure comme paramètre alternatif à la mécanique linéaire de la rupture par la variation de l'impédance Z . Le changement de l'impédance traduit le changement du champ de déplacement. Donner de ce fait un plus précis pour déterminer le champ de contrainte et le champ de déplacement. Par ces concepts mécaniques nous pouvons également calculer le facteur d'intensité de contrainte et tous les paramètres de la mécanique de la rupture avec une grande précision.

Des perspectives à ces travaux peuvent être suggérées :

- Optimisation de différentes grandeurs des fissures utilisant les algorithmes génétiques ou les algorithmes de fourmis.
- Modélisation de la propagation dynamique ou sous l'effet thermique et la fatigue mécanique de la fissure par les notions de la mécanique de la rupture.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [01] Y. Choua, „Application de la méthode des Eléments Finis pour la Modélisation de Configurations de Contrôle non Destructif par Courants de Foucault“. Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud 11, France, 2010.
- [02] T. Bouchala, „Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault“. Thèse de Doctorat, Université El-Hadj Lakhder, Batna, 2014.
- [03] A Zaoui, „Contribution à la Modélisation de CND par Matrice à Courants de Foucault“. Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Octobre 2008.
- [04] H. Zaidi, „Méthodologies pour la Modélisation des Couches Fines et du Déplacement en Contrôle non Destructif par Courants de Foucault : Application aux Capteurs Souples“. Thèse de Doctorat, Université, Paris- Sud, 2012.
- [05] A. Abdelhak, „Contrôle non Destructif par courants de Foucault Etude et Réalisation d'un Capteur Inductif“. Mémoire de Magister. Université El-Haj Lakhder, Batna, Septembre 2006.
- [06] S. Harzallah , „Analyse des fissures par la technique non-destructive : Utilisation des capteurs à courant de Foucault en mode différentiel“, Mémoire de Magister Université Des Sciences et De la Technologie Houari Boumediene. 2013.
- [07] N. Benhadda, „Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND) ,Thèse de Doctorat, Université El-Haj Lakhder, Batna,2015.
- [08] CH. Zorni, „Contrôle non Destructif par Courants de Foucault de Milieux Ferromagnétiques : de l'Expérience au Modèle d'Interaction“. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, 2012.
- [09] Y. Le Diraison. „Imagerie à Courants de Foucault pour l'Evaluation non Destructive de Structures Rivetées Aéronautiques“, Thèse de Doctorat. de l'Ecole Supérieure de Cachan, 2008.
- [10] J. Kerouedan, „Conception et Réalisation de Sondes Hyperfréquences pour la Détection de Micro-Fissures de Fatigue à la Surface des Métaux“. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale (UBO), 2009.

Références bibliographiques

- [11] PH. Beltrame, „Modélisation de la Perturbation Electromagnétique au Voisinage d'une Fissure Mince dans un Matériau Conducteur. Application au Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault“. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon. France, 2002.
- [12] L. S. Rosadoa, A. Filipe. Cardoso, Susana Cardoso, Pedro M. Ramosa, Paulo P. Freitas, Moisés Piedade, „Eddy currents testing probe With Magneto-Resistive Sensors and Differential Measurement“. Sensor and Actuators, A, Phys. Elsevier, 2014, pp. 58-67.
- [13] S. Bensaid, “Contribution à la Caractérisation et à la Modélisation Electromagnétique et Thermique des Matériaux Composites Anisotropies”. Thèse de Doctorat, à l'IREENA Saint- Nazaire, Université de Nantes, 2006.
- [14] B. Halifa „ Simulation par éléments finis de la mesure par courants de Foucault des fissures débouchantes dans les matériaux conducteurs“. Thèse de Doctorat, USTHB, 2012.
- [15] L.Okhellou, "Paramétrisation et Classification de Signaux en Contrôle non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courant de Foucault", Thèse de Doctorat, en science de l'université Paris XI Orsay, 04 juillet 1997.
- [16] CV. Dodd and WE. Deeds, „Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problem“. Journal of Applied Physics; Vol. 39: pp. 2829–39. 1968.
- [17] L. Tekoing, „Formulation Intégrale Surfaccique des Equations de Maxwell pour la Simulation de Contrôles non Destructifs par Courants de Foucault. Étude Préliminaire à la Mise en Œuvre de la Méthode Multipôle Rapide“. Thèse de Doctorat de L'Ecole Polytechnique, Paris Tech. 2011.
- [18] A. Toufik, “ Optimisation Des Conditions DE Coupe EN Utilisant LE Calcul Evolutionnaire”, Mémoire de Magister. Université Biskra, 2005.
- [19] S. Harzallah, F.B.M Belgacem ,M. Chabaat, “Nondestructive Technique for Cracks detection by en Eddy current in differential mode for steel frames”, ICNPAA 2014: 10th international Conference on Mathematical Problems in Engineering and Aerospace, Narvik, Norway, July 15-18, (2014): AIP Conference Proceedings 1637, pp. 1406-1415, (2014).
- [20] Y. Le Bihan, J. Pavo, C. Marchand, “Calculation of ECT Signal of a Minute Crack by FEM-BIM hybrid Method”, Eur. Phys. J. Appl. Phys., vol. 28, pp. 355-360, 2004.
- [21] S.. Bougiadeh, „ Inversion PAR Optimisation Appliquée AU Controle Non Destructif PAR Courants DE Foucault (CND-CF)“. Mémoire de Magister, Université de OUM EL BOUAGHI, 2017

Références bibliographiques

- [22] K. E. Atkinson, „The Numerical Solution of Integral Equations of the Second Kind“. Cambridge University Press, 1997.
- [23] S. Harzallah¹, M. Chabaat, S. Benissad, “Formulation for Stress Intensity Factors and J-Integral Calculation by Eddy Current Testing”, International Journal of Key Engineering Materials. Vol 660 (2015) pp 225-230
- [24] S. Pommier, Mécanique des matériaux, Université Pierre et Marie Curie, 2009-2010.
- [25] C. Bathias, J. P. Bailon, Fatigue des matériaux et des structures, Edition Maline, 1980.
- [26] H. D. Bui, Mécanique de la rupture fragile, Edition Masson, 1978.
- [27] C. Gardin, Introduction à la mécanique de la rupture, ENSMA, Poitiers, France, 2005.
- [28] N. K. Mukhopadhyay, S. K. Maiti and A. Kakodkar, 2000. Review of SIF evaluation and modeling of singularities in BEM, Journal of Computational Mechanics, Vol. 25, 4, pp. 358-375.
- [29] A.A. Griffith. 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions, Series A 221: 163–198.
- [30] G.R. Irwin. “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate”, Journal of Applied Mechanics. vol. 24, pp. 361-364, September 1957.
- [31] G.C. Sih, P.C. Paris & G.R. Irwin, 1965. “On cracks in rectilinearly anisotropic bodies”, International Journal of Fracture Mechanics 1: 189–203
- [32] H.M. Westergaard (1939), “ Bearing pressures and cracks”. Transactions ASME, Journal App. Mech., A 49.
- [33] Xian- Kui Zhu, James A. Joyce, “Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization “ : Engineering Fracture Mechanics, 85(2012)1–46.
- [34] J.R. Rice, “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”, Journal of Applied Mechanics, 35 (1968), p. 379-386
- [35] J.R. Rice. “Mathematical analysis in the mechanics of fracture”. London Academic press, Vol. 2, pp 191-311, 1968.
- [36] H.D. Bui. Dualité entre les intégrales de contour. Compte Rendu Acad. Sciences, T.276, Paris, Mai 1973.
- [37] G.C. Sih et J.R. Rice “The bending of plates of dissimilar materials with cracks”, J. Appl. Mech., pp. 477-482, 1964.
- [38] F. Erdogan. “ Stress distribution in bonded dissimilar materials with cracks”, J. Appl. Mech., 32, p. 418, 1965.
-

Références bibliographiques

- [39] M. Comninou – The interface crack, *J. Appl. Mech.*, pp. 631-636, 1977.
- [40] L. Banks-Sills, “Update application of the finite element method to linear elastic fracture mechanics”, *Applied Mechanics Reviews* 2010; 63(2), 020803, doi:10.1115/1.4000798.
- [41] R. Branco, F. V. Antunes, “ Finite element modeling and analysis of crack shape evolution in mode-I fatigue Middle Cracked Tension specimens ”, *Engineering Fracture Mechanics* 2008;75 (10): pp. 3020-3037.
- [42] Y. M. Chen, “ Numerical computation of dynamic stress intensity factors by a Lagrangian finite difference method ”, *Engineering Fracture Mechanics* 7 (1975) 653–660.
- [43] P. F. P. De Matos, M. G. P. Moreira, A. Portela and S. T. De Castro, 2004, “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.
- [44] C. E. Inglis (1913), “Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners”. *Trans. Institution of Naval Architects* 55, pp 219-242.
- [45] 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
- [46] S. Glodez, Srečko, M. Sraml and J. K. Ramberger, “A computational model for determination of service life of gears, *International Journal of Fatigue* ” , Vol. 24, n° 10, pp. 1013-1020. 2002.
- [47] M. H. Aliabadi, 2002, *Boundary Elements method: Application in Solids and Structures*, Vol. 2. Chichester, Edition John Wiley & sons, 580 p.
- [48] T. L. Anderson 2005, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, 3rd. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 621 p.
- [49] J. Rethore, “Méthode éléments finis étendus en espace et en temps : Application à la propagation dynamique des fissures ” , *Thèse de Doctorat à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 2005.
- [50] P. Fedelinski, M. H. Aliabadi, D. P. Rooke, “Single-region time domain BEM for dynamic crack problems ” , *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 32, n° 42 pp. 3555-3571, 1995.

Références bibliographiques

- [51] T. L. Anderson, 2005: Fracture mechanics: fundamentals and applications, 3rd. Boca Raton, FL. Taylor & Francis, pp. 621,
- [52] N. K. Mukhopadhyay , Maiti S. K., Kakodkar , “ Review of SIF evaluation and modeling of singularities in BEM”, Journal of Computational Mechanics, Vol. 25, 4, pp. 358-375, 2000
- [53] M. H. Aliabadi, “Boundary element formulations in fracture mechanics, Applied Mechanics Reviews”, Vol. 50, n° 2, p. 83-96, 1997.
- [54] A. Zeghloul, (2003-2004): Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, édité par University de METZ .
- [55] J. R. Rice, “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks” , Journal of Applied Mechanics, 35, pp. 379-386, 1968.
- [56] 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
- [57] G. Ventura, B. Moran, T. Belytschko, “ Dislocations by partition of unity” .Int J Numer Math. Eng; 62: 1463–87 (2005).
- [58] 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.
- [59] Dréau K., Chevaugeon N., Moës N., “Studied X-FEM enrichment to handle material interfaces with higher order finite element”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering , 1922–1936 , 2010, Vol. 199.
- [60] S. Geniaut, Notice d’utilisation de la méthode X-FEM, Code Aster , 01/08/2011.
- [61] A. Combescure, A. Gravouil, D. Grégoire D. J. Réthore, “X-FEM a good candidate for energy conservation in simulation of brittle dynamic crack propagation “ ,; Journal of Computational Methods Applied Mechanics Engineering, 309–318, s. l. Vol. 197, 2008.
- [62] E. De. Luycker , D. J. Benson, T. Belytschko, “X-FEM in isogeometric analysis for linear fracture mechanics”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 87, Issue 6, pp. 541–565, August 2011

Références bibliographiques

- [63] Soheil Mohammadi 2008: Extended finite element method for fracture analysis of structures, by Ed. Blackwell Publishing Ltd.
- [64] K. Dréau , N. Chevaugeon, N. Moë ; “Studied X-FEM enrichment to handle material interfaces with higher order finite element ”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 199, 2010.
- [65] J. L. Asferg. “ Modeling of Concrete Fracture Applying the eXtended Finite Element Method ” . Ph. D. Thesis , Technical University of Denmark 2006.
- [66] J. LASRY . “Calculs des plaques fissurées en flexion avec la méthode Des éléments finis étendue (XFEM) ”. Thèse de Doctorat l’Université de Toulouse,2011.
- [67] D. Waidelich. “measurement of coating thickness by use of pulsed eddy currents”. Materials Evaluation, Vol.14,pp. 14-15, 1956.
- [68] F. Thollon. “ Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans les pièces amagnétiques ” . Thèse de doctorat, Ecole centrale de lyon, 1995.
- [69] V. Doirat, “,Contribution à la Modélisation de Systèmes de Contrôle non destructif par Courants de Foucault Application à la Caractérisation Physique et Dimensionnelle de Matériaux de L’aéronautique” . Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2007.
- [70] V. Thomas, “, Système Multicapteurs et Traitement des Signaux Associé pour L’imagerie par courants de Foucault de Pièces Aéronautiques ” . Thèse de Doctorat, Ecole Normale de Cachan, 2010.
- [71] Zh. Zeng, Yiming Deng, Xin Liu, Lalita Udpa, Fellow, IEEE, Satish S. Udpa, Benjamin E. C. Koltenbah, Richard H. Bossi, and Gary Steffes, “,EC-GMR Data Analysis for Inspection of Multilayer Airframe Structures” , IEEE Transactions on Magnetics, pp.4745-4752, Vol. 47, NO.12, 2011
- [72] B. Maouche and M. Feliachi, “,A Half Analytical Formulation for the Impedance Variation in Axisymmetrical Modeling of Eddy Current non Destructive Testing” . European Physical Journal Applied Physics, February, Vol. 33, pp. 59-67, 2006
- [73] B. Helifa , “ Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault Vue de la Caractérisation des Fissures débouchantes” . Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2012.

Références bibliographiques

- [74] S.Harzallah, M. Chabaat, "Eddy Current Sensor Modeling for the Nondestructive Evaluation of Stress Intensity Factor". Journal AASRI Procedia .Elsevier Ltd. Volume 9, pp 57- 63, 2014.
- [75] K. R. Shao, G. Youguang. and J. D. Lavers, "Multiresolution Analysis for Reconstruction of Conductivity Profiles in Eddy Current Nondestructive Evaluation using Probe Impedance Data". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, 2004. 2101-2103
- [76] S.Harzalla, M.Chabaat; "Nondestructive Technique for the Determination of Cracks Parameters by Eddy Current in Differential Mode", Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 532, pp. 81-87, (2014).
- [77] Y. Noritaka, M. Kenzo, "Discussion on the Equivalent Conductivity and Resistance of Stress Corrosion Cracks in Eddy Current Simulations". NDT & E Int.Vol 42. pp. 9-15, 2009.
- [78] S .Harzallah, M.Chabaat , Belgacem, F.B.M, " Eddy current modeling by finite element method for evaluation of mechanical properties of the structure cracked in absolute probe", ICNPAA 2014: 10th international Conference on Mathematical Problems in Engineering and Aerospace, Narvik, Norway, July 15-18, (2014): AIP Conference Proceedings 1637, pp. 1416-1425, (2014).
- [79] Uwe Tröltzsch, Frank Wendler and Olfa Kanoun, "Simplified Analytical Inductance Model for a Single Turn Eddy Current Sensor". Elsevier, Sensors and Actuators A, Vol. 191, 2013, pp.11-21.
- [80] S. Harzallah , M.Chabaat " Cracks Detection Using a Non Destructive Technique by Eddy Currents in Differential Mode" , 12th U.S. National Congress on Computational Mechanics, USNCCM12 July 22-25, 2013 Raleigh , North Carolina.
- [81] F.Z. BOUARAB, "Optimisation des paramètres de coupe et de la géométrie de l'outil sur la qualité des produits déroulés des chênes algériennes". Thèse de Doctorat, Université de Boumerdes, 2021
- [82] S. Harzallah, M. Chabaat, " Eddy current modeling for the nondestructive evaluation of stress intensity factor", Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 661, pp. 86-92, (2014)
- [83] F. Villone, "Simulation of Thin Cracks with Finite Resistivity in Eddy Current Testing". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 1706- 1709, July 2000 .
- [84] D. A. Ibukun and Y. T. Gui, "Decoupling the Influence of Permeability and Conductivity in Pulsed Eddy-Current Measurements". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 3, 2013.

Références bibliographiques

- [85] S. Harzallah, M.Chabaat ,,, Contrôle non destructif de propagation des fissures par un courant de Foucault en mode différentiel pour inspection des structures en charpente métallique après le dégât sismique "", 6ème symposium international sur la construction en zone sismique (SICZS 2013) , les 9 et 10 octobre 2013.
- [86] Javier G.-M., Jaime G.-G. and Ernesto, V.-S, ""Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing"". Sens. J., 2011, pp.2525–2565.
- [87] Y. Noritaka and M. Kenzo, ,,,Discussion on the Equivalent Conductivity and Resistance of Stress Corrosion Cracks in Eddy Current Simulations"". Elsevier, Vol.42, pp. 9-15. 2008.
- [88] L. Udpa. and W. Lord, ,,,Impedance and Mesh Structure Considerations in the Finite Element Analysis of Eddy Current NDT Probe Phenomena"". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-21, No.6, 1985, pp. 2268-2272.
- [89] S. Harzallah, M.Chabaat ,,,, Non destructif technique for cracks detection by eddy current in differentiel mode for steel frames , The Second International Workshop on Fracture mechanics , Chlef University From 23-25 Novembre 2013.
- [90] N. Ida and W. Lord, ,,,A Finite Element Model for Three-Dimensional Eddy Current NDT Phenomena"". IEEE Transactions on Magnetics. Vol. MAG-21, No. 6, 1985, pp. 2635.
- [91] S. Harzallah ,M.Chabaat , S.Benissad, "Inverse Problems using Neural Networks for Cracks Characterization in Materials", International Journal of Key Engineering Materials.Vol 660 (2015) pp 361-365.
- [92] Harzallah S, Chabaat M., Belgacem, F.B.M, S.Benissad,"Computational Inverse Techniques in Nondestructive Evaluation Using Neural Networks for detection of cracks ", ICCIT 2015: 4th international Conference on Communication and information technology. Dubai 2015.
- [93] A. Trillon, " Reconstruction de Défauts a Partir de Données Issues de Capteurs à Courants de Foucault avec Modèle Direct Différentiel", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012
- [98] M. Parizeau, ,,,Le Perceptron Multicouche et son Algorithme de Rétro propagation des Erreurs"", Cour, Département de Génie Electrique et Génie Informatique, Université Laval. 2004
- [99] R. Bellomi, ,,,Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe "", Mémoire de MAGISTER, Université de Batna 2, 2011

Références bibliographiques

- [100] A., Ayad, F .Benhamida. A .Bendaoud. Y .Le Bihan. and M .Bensetti ,“Solution of Inverse Problems in Electromagnetic NDT Using Neural Networks”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 9a/2011.
- [101] S .Ratnajeevan, H .Hoole, “Artificial Neural Networks in the Solution of Inverse Electromagnetic Field Problems ”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 2, 1993.
- [102] T. Chady, M .Enokizono , and R .Sikora , “Neural Network Models of Eddy Current Multi-Frequency System for Nondestructive Testing”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36,No. 4, 2000.
- [103]T. Chady, Enokizono M, Sikora R, Todaka T and Tsuchida Y, “Natural Crack Recognition Using Inverse Neural Model and Multi-Frequency Eddy Current Method”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37,No 4, 2001.
- [104] S. Harzallah, M. Chabaat, K. Chabane “Numerical study of eddy current by Finite Element Method for cracks detection in structures”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 39 (2017) 282-290;DOI: 10.3221/IGF-ESIS.39.26
- [105] Chabane, K., Harzallah, S., Chabaat, M., “3D eddy current testing by FEM for detection of cracks in materials”, *International Journal of Key Engineering Materials*, 703 (2016) 349
- [106] Harzallah, S., Chabaat, M “3-Deddy current modeling for evaluating the Fracture parameters by a new method based On the variation of the impedance” *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*,53 (2016) 1–15.
- [107] Jaballah,M. S., Harzallah, S., Bachir, N “Soil-Structure Interaction Effects on the Vibration Control of Building Structures”" *Advanced Computational Techniques for Renewable Energy Systems* (pp.493-500).
- [108] Jaballah,M. S., Harzallah, S., Bachir, N “Vibration Control and Seismic Damages Reduction for Structural Buildings Based on Optimal Fractional-Order Controller and a Graphical User Interface Development" *Journal of Vibration Engineering & Technologies | Springer* DOI:[10.1007/s42417-022-00819-y](https://doi.org/10.1007/s42417-022-00819-y)
- [109] Harzallah, S ,Chabaat ,M., Saidani, M, Moussaoui ,M.L “Numerical investigation of the seismic vulnerability of bridge piers strengthened with steel fibre reinforced concrete (SFRC) and carbon fibre composites (CFC)" June 2022 -[Case Studies in Construction Materials](https://doi.org/10.1007/s42417-022-00819-y) 17(1):16

Références bibliographiques

- [110] Jaballah, M. S., Bachir, N., Harzallah, S., Guettala, S. "Hybrid Vibration Control of Structures Using Fractional Order PI λ D μ Controller" Springer | Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities (pp.569-577)
- [111] Jaballah, M. S., Harzallah, S., Bachir, N. "Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities: Case Study" Conference: International conference on Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities
- [112] Guesmi, M. S., Harzallah, S., Kouzou, A. "New non-destructive testing approach based on eddy current for crack orientation detection and parameter estimation" " International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 53 (2016) 1-15.
- [113] Zegnani, A., Harzallah, S., Mhimidi, A. "STUDY OF ENTROPY GENERATION DURING ADSORPTION REFRIGERATION CYCLE" Conference: 1er Colloque International _Maitrise de l'Energie & Applications des Energies Renouvelables (CIE'09) At: Tunisia
- [114] H. Mehaddene, "Étude du Contrôle et de l'Évaluation Non-Destructifs dans les Milieux Magnétiques". Thèse de Doctorat, Tizi-ouzou, 2021
- [115] Y. Yating and D. Pingan, "Optimization of an Eddy Current Sensor using Finite Element Method". Proceedings of the (2007) IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5 - 8, 2007, Harbin, China, pp. 3775-3800.
- [116] C. Ravat, "Conception de Multicapteurs à Courants de Foucault et Inversion des Signaux Associés pour le Contrôle non Destructif". Thèse de Doctorat, Paris-Sud 11, 2008.
- [117] C. Touzet, "Les Réseaux de Neurones Artificiels, Introduction au Connexionnisme, Cours, Exercices et Travaux Pratiques", juillet 1992.
- [118] M. Didier, "Utilisation d'un Réseau de Neurones Artificiels comme Fonction d'Evaluation d'un Jeu". EPFL-DMA, CH-1015 Lausanne, 1992.
- [119] A. Rosell and G. Persson, "Finite Element Modeling of Closed Cracks in Eddy Current Testing". International Journal of Fatigue, Elsevier, 41, 2012, p. 30-38.
- [120] Salaheddine Harzallah (2013) DETERMINATION DE LA DEFORMATION LATÉRALE ULTIME DES PILES DES PONTS PAR ANALYSE STATIQUE NON LINEAIRE
- [121] S Harzallah - 2013 Analyse des fissures par la technique non-destructive: utilisation des capteurs à courant de Foucault en mode différentiel
- [122] Salaheddine, Harzallah, and Chabaat Mohamed. "Nondestructive technique for the determination of cracks parameters by eddy current in differential mode." Applied

Références bibliographiques

- Mechanics & Materials 532 (2014).
- [123] Harzallah, Salaheddine, and Mohamed Chabaat. "Eddy Current Modeling for the Nondestructive Evaluation of Stress Intensity Factor." *Applied Mechanics and Materials* 621 (2014): 83-88.
- [124] Harzallah, Salaheddine Contribution à l'analyse des endommagements par la technique du contrôle non-destructif et l'utilisation des capteurs à courant de Foucault [ressource textuelle, sauf manuscrits] : investigation numérique et expérimentale / Salaheddine Harzallah; Dir. Mohamed Chabaat; Ed. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène.-Alger :USTHB,2017.-154146-154 Doctorat : Construction et Matériaux : Faculté de Génie Civil : 2017
- [125] Mohamed Guesmi, Kamel Guesmi, Sallaheddine Harzallah, Boubakeur Benchikh. Detection of crack orientation using the non- destructive testing by eddy current. International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics, 2022, Skikda, Algeria.
- [126] Mohamed Guesmi, Kamel Guesmi, Salaheddine Harzallah, Boubakeur Benchikh. Numerical analysis of 2D crack orientation detection using the particle swarm optimization,. International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, 2022, Tamanrasset, Algeria.
- [127] Jaballah, M., Harzallah, S., Bachir, N. (2023). Soil-Structure Interaction Effects on the Vibration Control of Building Structures. In: Hatti, M. (eds) *Advanced Computational Techniques for Renewable Energy Systems. IC-AIRES 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 591. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21216-1_51
- [128] Amor, M., S. Harzallah, and Abbase Chedaad. "Numerical Analysis of Crack Orientation Detection Using Eddy Current Testing and Particle Swarm Optimization." *International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering* 12.1 (2023): 34-41.
- [129] Seghir, J.M., Bachir, N., Salaheddine, H., Salim, G. (2022). Hybrid Vibration Control of Structures Using Fractional Order $\{\mathrm{PI}\}^{\{\uplambda\}}\{\mathrm{D}\}^{\{\mu\}}$ Controller. In: Hatti, M. (eds) *Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities. IC-AIRES 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 361. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92038-8_57

Références bibliographiques

- [130] Harzallah, Salaheddine, Mohamed Chabaat, and Fethi Bin Muhammad Belgacem. "Eddy current modeling by finite element method for evaluation of mechanical properties of the structure cracked in absolute probe." AIP Conference Proceedings. Vol. 1637. No. 1. American Institute of Physics, 2014.
- [131] Chabane, Kahina, Salaheddine Harzallah, and Mohamed Chabaat. "3D Eddy Current Testing by FEM for Detection of Crack's in Materials." Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Ltd., August 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.703.349>
- [132] Guesmi, Mohamed, Salaheddine Harzallah, and Abdellah Kouzou. "New non-destructive testing approach based on eddy current for crack orientation detection and parameter estimation." International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 67.4 (2021): 431-451.
- [133] Jaballah, Mohamed Seghir, Salaheddine Harzallah, and Bachir Nail. "A Comparative study on hybrid vibration control of base-isolated buildings equipped with ATMD." Engineering, Technology & Applied Science Research 12.3 (2022): 8652-8657.
- [134] Jaballah, M.S., Harzallah, S. & Nail, B. Vibration Control and Seismic Damages Reduction for Structural Buildings Based on Optimal Fractional-Order Controller and a Graphical User Interface Development. J. Vib. Eng. Technol. 11, 4349-4370 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00819-y>
- [135] Harzallah, Salaheddine, Mohamed Chabaat, and Sekoura Benissad. "Inverse problems using neural networks for cracks characterization in materials." Key Engineering Materials 660 (2015): 361-365.
- [136] Harzallah, Salaheddine and Chabaat, Mohamed. '3-D Eddy Current Modeling for Evaluating the Fracture Parameters by a New Method Based on the Variation of the Impedance'. 1 Jan. 2017 : 371 – 385
- [137] Harzallah, S., Chabaat, M. and Benissad, S., 2015. Formulation for stress intensity factors and J-integral calculation by eddy current testing. Key Engineering Materials, 660, pp.225-230.
- [138] Harzallah, S., & Chabaat, M. (2014). Eddy current sensor modeling for the nondestructive evaluation of stress intensity factor. AASRI Procedia, 9, 57-63.
- [139] Harzallah, S. and Chabaat, M., 2014. Nondestructive technique for the determination of cracks parameters by eddy current in differential mode. Applied Mechanics and Materials, 532, pp.81-87.

Références bibliographiques

- [140] Harzallah, S., M. Chabaat, and K. Chabane. "Numerical study of eddy current by Finite Element Method for cracks detection in structures." *Frattura e Integrità Strutturale* 39 (2017).
- [141] Harzallah, Salaheddine, and Mohamed Chabaat. "3D-FEM computation and experimental study of eddy currents for characterization of surface cracks." *International Journal of Structural Integrity* 8, no. 5 (2017): 603-610.
- [142] Harzallah, Salaheddine, et al. "Eddy current modelling using multi-layer perceptron neural networks for detecting surface cracks." *Frattura ed Integrità Strutturale* 12.45 (2018): 147-155.
- [143] Harzallah, S., et al. "Numerical investigation of the seismic vulnerability of bridge piers strengthened with steel fibre reinforced concrete (SFRC) and carbon fibre composites (CFC)." *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022): e01235.
- [144] S. Harzalla;F. Bin Muhammad Belgacem;M. Chabaat, Non destructive technique for cracks detection by an eddy current in differential mode for steel frames , *AIP Conf. Proc.* 1637, 1406–1415 (2014)<https://doi.org/10.1063/1.4907307>