

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



En vue de l'obtention de diplôme master

Filière: Électrotechnique.
Option: Réseaux Electriques.

Thème:

Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés.

Présenté par :

TITOUAH Lounis
ZIANE Abdeslam

En cadré par :

Mr : BOUZIDI Athmane

Année d'étude : 2013/2014.

Remerciement

*Nous tenons à remercier vivement notre promoteur **Mr ATHMANE BOUZIDI** pour ces conseils, orientations et sa disponibilité le long de l'élaboration de ce travail.*

Nos reconnaissances vont également aux membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de faire partie de jury.

On exprime notre sincère gratitude à nos parents et qui ont soutenu par tous les moyens afin qu'on réussisse dans nos études. Surtout, par leurs encouragements qui nous animent de volonté.

Nous ne manquerons pas d'adresser nos sincères remerciements à nos amis, pour leurs soutiens et encouragements.

Enfin à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin et à tous ceux qui nous ont incités même involontairement à faire mieux, veuillez trouver ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et symboles

Introduction Générale	1
Chapitre I : Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault	4
I-1 Introduction	5
I-2 Contrôle non destructif (CND).....	5
I-2-1 Examen visuel	6
I-2-2 Le ressuage.....	7
I-2-3 La magnétoscopie	7
I-2-4 La radiographie	7
I-2-5 La gammagraphie	8
I-2-6 L'holographie	8
I-2-7 L'échographie ultrasonore	9
I-2-8 L'émission acoustique	9
I-2-9 Par courants de Foucault	9
I.3 État de l'art du contrôle non destructif par courants de Foucault pulsés	10
I-4 Le contrôle non destructif par courant de Foucault CND-CF	11
I-4-1 Les courants de Foucault	11
I-4-2 Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault	12
I-4-3 L'effet de peau	14
I-4-4 Principe physique de CND-CF.....	14
I-4-4 Les modes de CND/END par CF	15
I-4-4-1 E&CND mono-fréquence.....	15
I-4-4-2 E&CND multifréquence	16
I-4-4-3 E&CND impulsionnels	17
I-4-5 Les capteurs à courants de Foucault	18
I-4-6 Types de capteurs	18
I-4-6-1 La bobine encerclante	18
I-4-6-2 Sonde interne	18
I-4-6-3 Sonde ponctuelle	19
I-4-6-4 Bobine plate	19
I-4-6-5 Sonde interne tournante	20

I-4-7 Fonctions du capteur	21
I-4-7-1 Capteur à double fonction	21
I-4-7-2 Capteur à fonctions séparées	21
I-5 Les défauts	22
I-6 Excitation en mode pulsé	24
I-7 La variation temporelle de la tension due à la présence d'une rainure	25
I-8 Paramètres permettant le contrôle par courants de Foucault pulsé	25
I-9 Conclusion	26
Chapitre 2 : Approche Analytique et Numérique du CND-CFP.....	27
II-1 Introduction	28
II-2 Equations de Maxwell et lois de comportement des milieux	29
II-3 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire	30
II-3-1 Hypothèses simplificatrices	30
II-3-2 Equations de Maxwell simplifiées	31
II-3-3 Equations électromagnétiques couplées	31
II-3-4 Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques	32
II-3-5 Equation de diffusion électromagnétique généralisée	32
II-3-6 Equation des différentes régions	34
II-3-6-1 Equation dans le vide	34
II-3-6-2 Equation dans l'inducteur.....	34
II-3-6-3 Equation dans la charge	34
II-4 Techniques de calcul d'impédance	35
II-4-1 Hypothèses	35
II-4-2 Les différents types de formulations de l'impédance	35
II-5 Bibliométrie des modèles existants	36
II-5-1 Les modèles directs	36
II-5-2 Méthodes inverses	37
II-6 Conclusion	39
Chapitre 3 : La Méthode des Circuit Electrique Couplé (MCEC).....	40
III-1 Introduction	41
III-2 Equations des circuits électriques couplés	41
III-2-1 Discrétisation spatiale	43
III-2-2 Forme matricielle de la MCEC	44
III-3 MCEC en mode harmonique	46

III-3-1 Cas d'un dispositif à capteur absolu	46
III-3-2 Cas d'un dispositif à capteur différentiel	46
III-4 Conclusion	48
Chapitre 4 : Méthodes d'Optimisations	49
IV-1 Introduction	50
IV-2 Optimisation	50
IV-3 Classification des méthodes d'optimisation	51
IV-3-1 Méthodes déterministes	51
IV-3-2 Méthodes stochastique	52
IV-3-2-1 Méthodes évolutionnistes	53
IV-4 Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation	54
IV-5 Opérateurs de recherche fondamentaux	54
IV-6 Algorithmes génétiques	55
IV-6-1 Introduction	55
IV-6-2 Présentation des algorithmes génétiques (AG)	56
IV-6-3 Description détaillée	57
IV-6-3 Codage des données	57
IV-6-3-1 Codage binaire	57
IV-6-3-2 Codage sous forme d'arbre	58
IV-6-4 Les opérateurs	59
IV-6-4-1 Opérateur de Sélection	59
IV-6-4-2 Opérateur de Croisement	60
IV-6-4-3 Opérateur de Mutation	61
IV-6-4-4 Organigramme d'un algorithme génétique	62
IV-6-5 Méthodes du simplexe	62
IV-6-5-1 Introduction	62
IV-6-5-2 Processus de résolution par la méthode du simplexe de Nelder et Mead.....	63
IV-6-5-3 Organigramme de la méthode de Nelder-Mead	65
IV-7 Conclusion	65

Chapitre 5 : Evaluations et interprétations.....	66
V. Evaluation Non Destructive et interprétations	67
V.1 Introduction.....	67
V.2 Etude des paramètres de la réponse du capteur en fonction des dimensions de la rainure	67
VI.3. Evaluation par Simplex de la largeur et la profondeur d'une rainure	72
V.4. Evaluation par Algorithme Génétique de la largeur et la profondeur d'une rainure	73
VI.5 La comparaison entre l'inversion par simplex et l'inversion par AG	75
V.6. Evaluation Non Destructive par inversion Simplex à trois dimensions (n=3)	76
V.6.1. Etude des paramètres de la réponse du capteur en fonction des positions radiales et des dimensions de la rainure	77
V.6.2. Evaluation de la position, la largeur et la profondeur d'une rainure (n=3)	79
V.7 Conclusion	81
Conclusion Générale.....	83
Références et bibliographes.....	85

Liste des figures

Figure 1 : le ressuage.....	7
Figure 2 : La magnétoscopie.....	7
Figure 3 : La radiographie.....	8
Figure 4 : La gammagraphie.....	8
Figure 5 : L'holographie.....	8
Figure 6 : L'échographie ultrasonore.....	9
Figure 7 : L'émission acoustique.....	9
Figure 8 : le contrôle Par courants de Foucault.....	10
Figure 9 : Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault.....	12
Figure 10: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique généré par ce courant.....	13
Figure 11: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z.....	14
Figure 12 : Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.....	15
Figure 13: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine.....	16
Figure 14 : Bobine encerclante.....	18
Figure 15 : Bobine interne glissante avec noyau.....	19
Figure 16 : Bobine simple avec noyau.....	19
Figure 17 : Bobine plate.....	20
Figure 18 : Capteur interne tournant.....	20
Figure 19 : Capteur à double fonction.	21
Figure 20 : Capteur à fonction séparée.....	21
Figure 21 : Influence du défaut sur la répartition des courants induits.....	22
Figure 22 : Influence de la position du défaut.....	22

Figure 23 : Plaque présentant un défaut cylindrique et sphérique.....	23
Figure 24 : Pièce cylindrique avec un défaut cylindrique et sphérique.....	23
Figure 25 : Forme du signal d'excitation en mode impulsionnel de rapport cyclique $\frac{1}{4}$;a) Excitation de forme semi sinusoïde.....	24
Figure 25.1 variation temporelle de la tension due à la présence d'une rainure.....	25
Figure 25.2 les paramètres d'évaluation.....	25
Figure 26 : Dispositifs d'étude.....	33
Figure 27 : Dispositifs d'étude.....	33
Figure 28 : Bobine à N spires jointives.....	35
Figure 29 : Schéma général d'un modèle direct.....	37
Figure 30 : Schéma général d'un modèle d'inversion de CND-CF.....	38
Figure 31 : Représentation des grandeurs électromagnétiques couplées.....	40
Figure 32 : Méthodes d'optimisation déterministes.....	51
Figure 33 : Méthodes d'optimisation stochastiques.....	52
Figure 34 : Principe de l'algorithme évolutionniste.....	53
Figure 35 : modèle de la boîte noire.....	54
Figure 36 : Illustrations du codage des variables d'optimisation.....	57
Figure 37 : Les quatre niveaux d'organisation des AG.....	57
Figure 38 : Le croisement en codage binaire.....	60
Figure 39 : La mutation en codage binaire.....	61
Figure 40 : Organigramme d'un algorithme génétique.....	62
Figure 41 : Organigramme de la méthode de Nelder-Mead.....	65
Figure 42.a : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la largeur pour différentes profondeurs.....	68

Figure 43 : Evolution temporelle de la variation de la tension du capteur due à la présence de la rainure en fonction de sa largeur et de sa profondeur.....	69
Figure 44 : Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la largeur d'une rainure pour différentes profondeurs.....	70
Figure 42.b : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la profondeur pour différentes largeurs.....	71
Figure 45 : Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la profondeur d'une rainure pour différentes largeurs.....	72
Figure 46 : Evaluation par Simplex-MCEC de la largeur et de la profondeur d'une rainure de position $r = 4$ mm située en bas de la pièce a) Evolution de la solution, b) Evolution de l'erreur.....	74
Figure 47 : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la Position radiale pour différentes largeurs et profondeur.....	77
Figure .48. Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la position radiale pour différentes positions en profondeur.....	78
Figure 49 : Evaluation par Simplex (n=3)-MCEC de la position, la largeur et de la profondeur d'une rainure située en bas de la pièce a) Evolution de la solution, b) Evolution de l'erreur.....	81

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau V .1 : Evaluation par Simplex de la largeur et la profondeur d'une rainure de position $r = 4$ mm.....	73
Tableau V .2 : Evaluation par AG de la largeur et la profondeur d'une rainure de position radiale 4.0 mm située en bas de la pièce.....	75
Tableau V 3 : Comparaison entre l'inversion par simplex et l'inversion par AG.....	76
Tableau V .4 : Evaluation par Simplex ($n=3$) de la position, la largeur et la profondeur d'une rainure située en bas de la pièce.....	80

Table des équations :

Equation (II. 1).....	29
Equation (II. 2).....	29
Equation (II. 3).....	29
Equation (II. 4).....	29
Equation (II. 5).....	30
Equation (II. 6).....	30
Equation (II. 7).....	30
Equation (II. 8).....	30
Equation (II. 9).....	30
Equation (II. 10).....	31
Equation (II. 11).....	31
Equation (II. 12).....	31
Equation (II. 13).....	31
Equation (II. 14).....	31
Equation (II. 15).....	31
Equation (II. 16).....	32
Equation (II. 17).....	32
Equation (II. 18).....	33
Equation (II. 19).....	33
Equation (II. 20).....	34
Equation (II. 21).....	34
Equation (II. 22).....	34
Equation (II. 23).....	35
Equation (II. 24).....	35

Equation (II. 25).....	35
Equation (III. 1).....	42
Equation (III. 2).....	42
Equation (III. 3).....	43
Equation (III. 4).....	43
Equation (III. 5).....	43
Equation (III. 6).....	43
Equation (III. 7).....	43
Equation (III. 8).....	43
Equation (III. 9).....	44
Equation (III. 10).....	44
Equation (III. 11).....	44
Equation (III. 12).....	44
Equation (III. 13).....	44
Equation (III. 14).....	44
Equation (III. 15).....	44
Equation (III. 16).....	45
Equation (III. 17).....	45
Equation (III. 18).....	45
Equation (III. 19).....	45
Equation (III. 20).....	45
Equation (III. 21).....	45
Equation (III. 22).....	46
Equation (III. 23).....	46
Equation (III. 24).....	46
Equation (III. 25).....	47

Equation (III. 26).....47

Equation (III. 27).....47

Notations et symboles :

CND : contrôle non destructif.

CND-CF : CND par courant de Foucault.

CND-CFP : CND-CF pulse.

H : Champ magnétique.

B: Induction magnétique.

E: Champ électrique.

D: Induction électrique.

φ : Flux magnétique.

V : Potentiel électrique scalaire.

J: Densité de courant électrique.

J_s : Densité de courant électrique de la source.

J_c : Densité de courant électrique dans la charge.

I : Intensité de courant électrique.

I_s : Courant électrique dans la source.

I_c : Courant électrique dans la charge.

A: Potentiel magnétique vecteur.

A_θ : Composante angulaire du potentiel magnétique vecteur.

J_θ : Composante angulaire de la densité de courant électrique.

A_s : Potentiel magnétique vecteur dans la source.

A_c : Potentiel magnétique vecteur dans la charge.

N : Nombre de spires.

N_s : Nombre d'éléments (spires) de la source (capteur).

N_c : Nombre d'éléments (spires) de la charge (pièce).

Z : Impédance électrique.

R : Résistance électrique.

X : Réactance électrique.

L : Inductance d'un bobinage en présence d'un matériau.

S : Section d'une spire.

Ω : Domaine d'étude.

Ω_c : Domaine de la charge (pièce).

Ω_s : Domaine de la source (capteur).

ΔZ : Variation de l'impédance.

μ : Perméabilité magnétiques.

μ_0 : Perméabilité magnétiques a vide.

μ_r Perméabilité magnétiques relative au milieu.

ε : Perméabilité électrique.

ε_0 : Perméabilité électrique du vide.

' C ' la vitesse de la lumière.

Introduction générale :

L'évaluation et le contrôle non destructif par courants de Foucault (E&CND-CF) sont utilisés dans toutes les pièces industrielles faites de matériaux électriquement conducteurs. Ils s'effectuent dès la fabrication des pièces, dans une installation et dans les chaînes de production en fonctionnement et au moment de la maintenance. L'E&CND-CF permet le contrôle de défauts, d'anomalies et de non homogénéité des pièces telles que les fissures, l'usure mécanique et la corrosion. Il peut être utilisé pour l'évaluation de l'état de surfaces, d'épaisseur de pièces ou de la profondeur des fissures, ainsi que les propriétés physiques d'un matériau. C'est une technique d'une importance capitale dans le domaine de l'ingénierie et de l'industrie et particulièrement dans les domaines de l'aéronautique, du nucléaire, des chemins de fer, etc. Ce qui le rend à l'heure actuelle nécessaire et indispensable dans les phases de production et de mise en service de tout produit [1, 2].

L'intérêt apporté à l'E&CND-CF est dû principalement à ces caractéristiques techniques comme la vitesse de contrôle, la sensibilité élevée et la faisabilité. Les méthodes de contrôle non destructif sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité), soit pour détecter la présence de défauts qui, s'ils sont jugés dangereux, provoque le rejet de la pièce ou un arrêt d'exploitation pour réparation. Dans le premier cas, on parle d'évaluation non destructive (END) et dans le second, de contrôle non destructif (CND) [2].

Les problèmes d'optimisations en électrotechnique présentent plusieurs difficultés liées aux besoins de l'utilisateur (recherche d'une solution globale, fiabilité et précision de la solution, diversité des problèmes traités, temps de calculs disponible,...), aux caractéristiques des problèmes d'optimisation (non linéarité, dérivées difficilement accessibles, ...) et aux temps de calculs importants. La résolution de telles difficultés a fait l'objet de nombreux travaux en utilisant divers méthodes d'optimisation.

Les méthodes déterministes s'appuient sur le calcul qui peut être fait dans une direction de recherche, généralement liée à la dérivée de certains variables d'état par rapport aux paramètres de dispositif. Elles ne sont réellement utilisables que dans le cas restreint où la

solution cherchée est réputée proche d'une solution connue. C'est pour lever cette difficulté, que nous avons choisi de nous intéresser aux méthodes stochastiques et d'étudier leur application aux problèmes de CND-CF rencontrés en électrotechniques [22].

En effet, les méthodes stochastiques permettent de localiser l'optimum d'une fonction dans l'espace des paramètres sans avoir recours aux dérivées de la fonction par rapport à ces paramètres. De plus, elles ne se laissent pas piéger par un optimum local et réussissent le plus souvent à déterminer l'optimum global de la fonction considérée. Leur principe consiste à travailler avec un ensemble de solutions, puis à les faire évoluer au moyen des règles heuristiques et probabilistes. Nous avons surtout retenu pour notre étude les algorithmes génétiques [22].

Dans le premier chapitre, nous allons présenter la définition, objectifs et différents techniques du CND, aussi expose les courants de Foucault, ainsi que les trois modes de contrôle non destructif par courants de Foucault: mono fréquence, multifréquence et impulsionnel, les type de capteurs et leur fonctionnements soit double ou sépare.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons brièvement les équations Maxwell, les lois de comportement des milieux régissant le phénomène des courants de Foucault et les simplifications relatives, ainsi que les différentes méthodes de résolution existantes. La résolution des équations de Maxwell, pour l'obtention des formulations intégrales des grandeurs électromagnétiques couplées, sera le but de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons les différent équations des circuits électriques couplée, Discrétisation spatiale et forme matricielle des méthodes des circuits électriques couplée MCEC, et MCEC en mode harmonique.

Dans le chapitre quatre nous définissons l'optimisation, classification des méthodes d'optimisation: méthodes déterministes et stochastiques, expose l'une des méthodes stochastiques, évolutionniste qu'est la méthode des algorithmes génétiques et une méthode déterministe qu'est la méthode simplex, qui seront l'objet du prochain chapitre.

Après avoir choisi deux méthodes d'optimisation nous nous intéresserons dans le quatrième chapitre à la mise en œuvre de ces derniers,

Dans le cinquième chapitre nous évaluons par méthode inverse, une pièce métallique (Aluminium) avec deux méthodes qui sont : inversion par Simplex et par Algorithme Génétique(AG), Les résultats obtenus par les deux méthodes d'inversion seront comparés et interprétés.

Nous terminerons notre travail par une conclusion sur le travail réalisé ainsi que sur les perspectives.

Chapitre 1:

Contrôle non destructif par Courant de Foucault

I-1 : Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) est un examen, un contrôle, ou une évaluation exécutée sur une pièce à contrôler sans la changer ou l'altérer de quelque façon que se soit. Il est effectué afin de déterminer la présence des discontinuités (défauts) ou des conditions qui peuvent avoir un effet sur l'utilisation future de cet objet. Des contrôles non destructifs peuvent également être effectués pour mesurer d'autres caractéristiques de la pièce, telles que la taille, les dimensions, la configuration ou la structure, y compris la dureté, la taille des grains, etc. Le plus simple de toutes les définitions est fondamentalement un examen qui est exécuté sur un objet de n'importe quel type, taille ou forme de matériel pour déterminer la présence ou absence des discontinuités, ou pour évaluer d'autres caractéristiques matérielles. Le contrôle non destructif (CND), l'inspection non destructive (IND) et l'évaluation non destructive (END) sont également des expressions généralement employées pour décrire cette technologie. Bien que ces divers termes soient conçus pour créer des distinctions, la plus part sont interchangeables. CND, END, et IND sont les plus communs et sont généralement non spécifiques. L'utilisation du terme END et CND est interchangeable et implique la plus large des définitions. [1]

I-2 Contrôle non destructif (CND) :

On regroupe sous le vocable essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire), l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure.

Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce. [3]

Les méthodes de CND sont très utilisées dans :

- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- l'industrie navale (contrôle des coques) ;
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc) ;
- l'aérospatiale et l'armée (dont la totalité des programmes sont confidentiels ou secret défense) ;
- l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.) ;
- le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies);
- autres (fabrication de mousquetons d'escalade, ouvrages d'art, etc.) ;

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant : [3]

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...) ;
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (BTP, nucléaire, canalisation de gaz...).

Il existe des différentes techniques :

La diversité des pièces à inspecter, leurs géométries, leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il ne s'agit pas ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND [4], mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement. Plusieurs méthodes sont utilisées dans l'industrie et leur champ d'utilisation s'étend à plusieurs applications. Chacune a son domaine d'action privilégié [5]. On distingue :

I-2-1 Examen visuel :

Cet examen permet l'appréciation de nombreux paramètres (forme, couleur, défauts externes).

I-2-2 Le ressuage :

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchantes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...); la pièce étant ensuite examinée visuellement, comme la montre la figure 1.

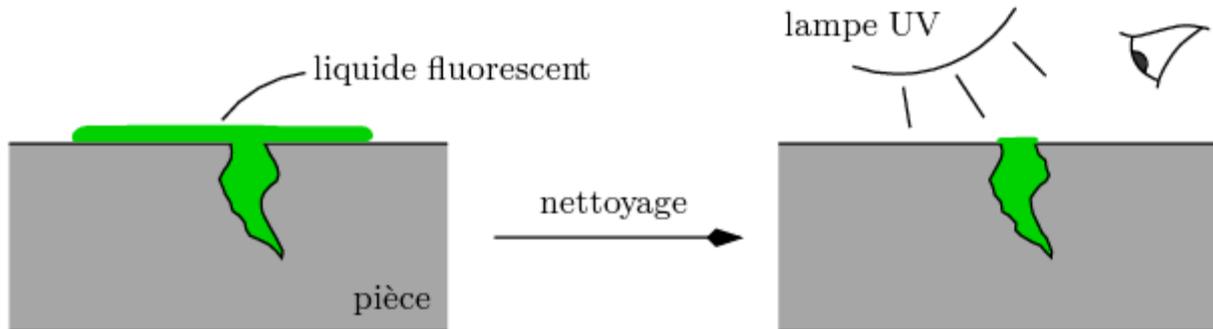


Figure 1 : le ressuage.

I-2-3 La magnétoscopie :

Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ aux points des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV comme la montre la figure 2.

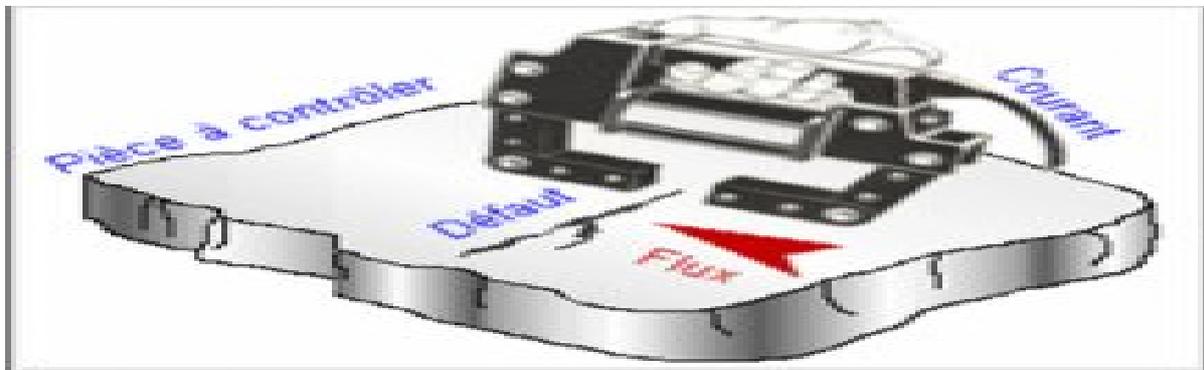


Figure 2 : La magnétoscopie.

I-2-4 La radiographie :

Permet d'obtenir sur un film photosensible une image projetée sur le plan du film de pièce à contrôler. La source de rayonnement peut aller du petit poste à rayons X de 100 kV à l'accélérateur linéaire de 15Mev pour le contrôle de grosse structure.

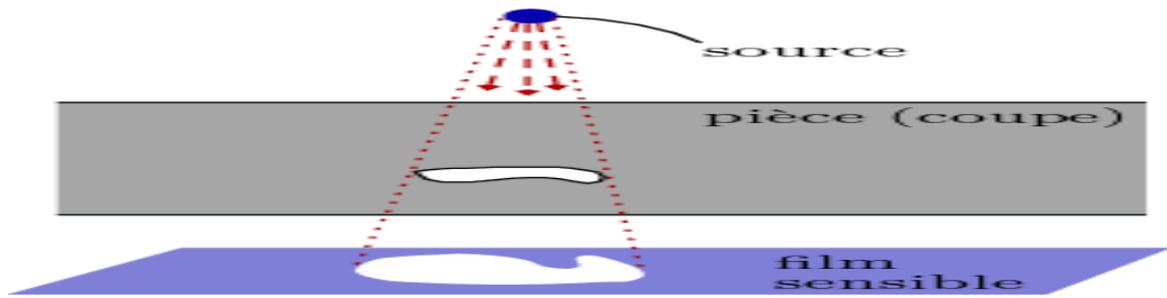


Figure 3 : La radiographie.

I-2-5 La gammagraphie :

Elle utilise le rayonnement plus dur des sources radio isotopiques du type cobalt ou iridium. La souplesse d'emploi est obtenue au détriment de la résolution (flou géométrique généralement important).

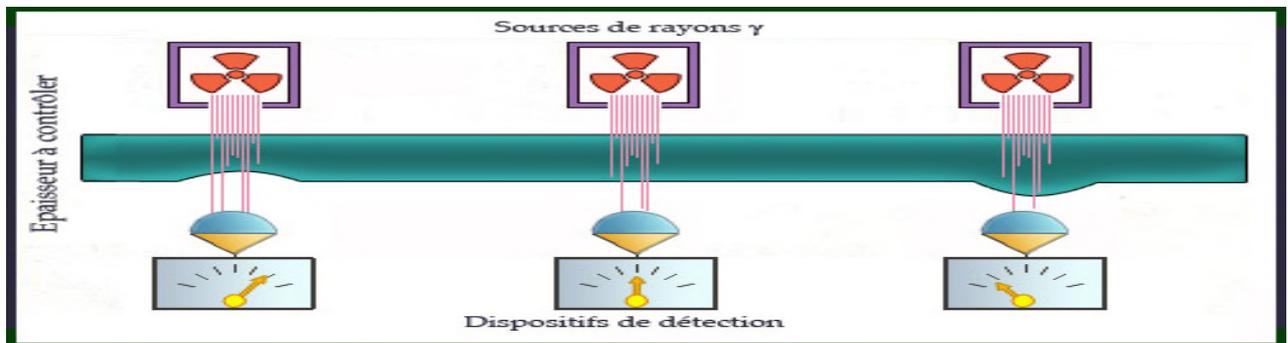


Figure 4 : La gammagraphie.

I-2-6 L'holographie :

Elle consiste à enregistrer deux hologrammes de l'objet obtenus à des instants distincts pour deux états de contraintes différents de la pièce. La déformation provoquée au droit d'un défaut éventuel se manifeste par une anomalie locale du réseau de franges superposé à la pièce et qui est observé visuellement. Ce type de contrôle peu répandu est appliqué aux pales d'hélicoptère, aux pneumatiques, aux propulseurs d'engins, etc....

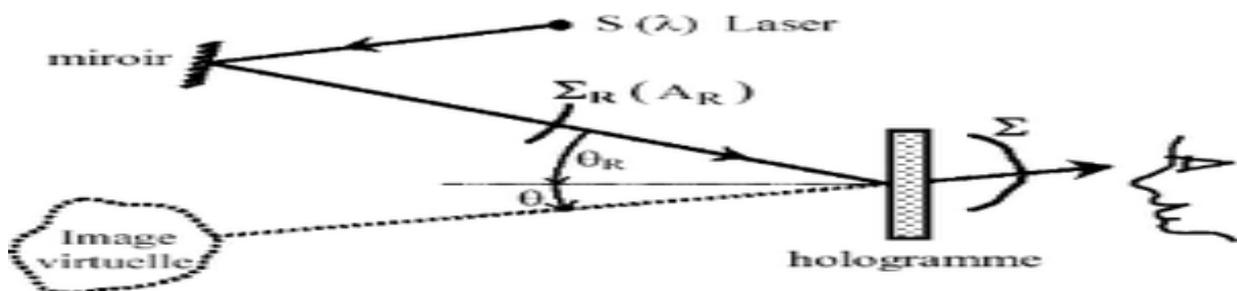


Figure 5 : L'holographie.

I-2-7 L'échographie ultrasonore :

Cette technique est parmi les méthodes les plus répandue. Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à contrôler et en observant les échos réfléchis sur les discontinuités de la matière.

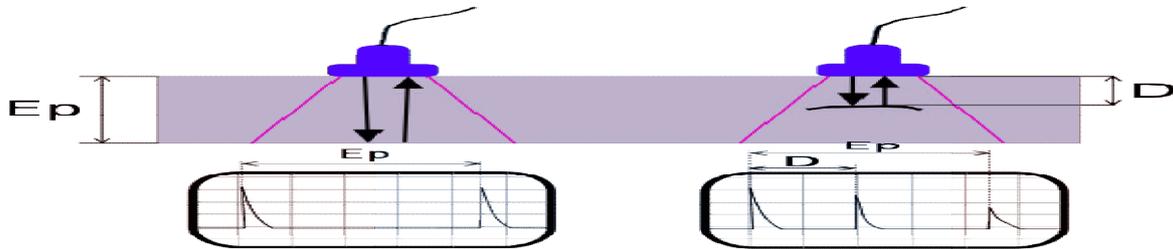


Figure 6 : L'échographie ultrasonore.

I-2-8 L'émission acoustique :

Elle consiste à écouter les « bruits » émis par une structure sous contrainte. Des méthodes de triangulation permettent de localiser les sources d'émission.

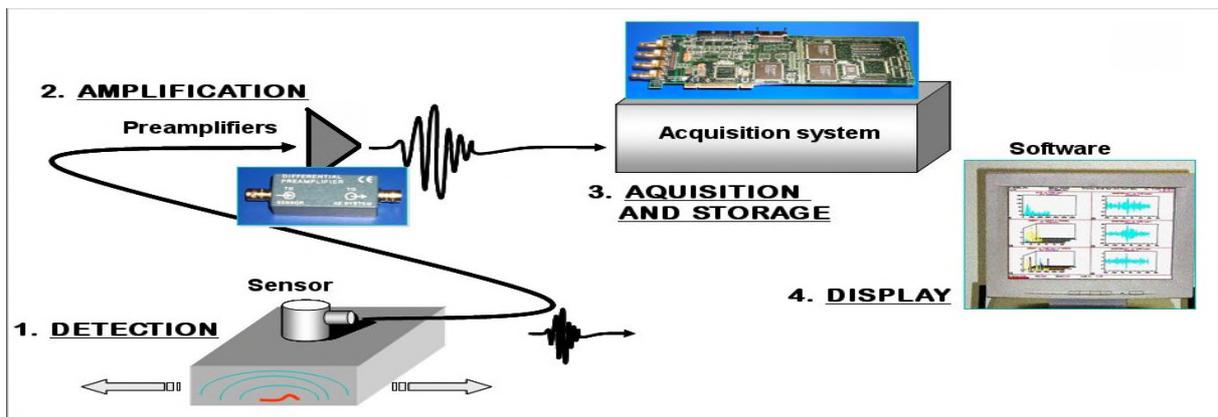


Figure 7 : L'émission acoustique.

I-2-9 Par courants de Foucault :

Ce type de contrôle s'effectue par un champ magnétique variable, qui embrasse la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés, le contrôle en mono fréquence, multifréquences et en mode pulsé.

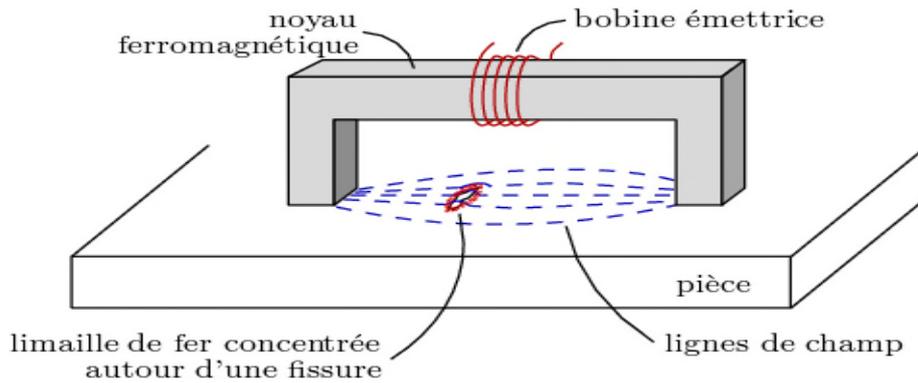


Figure 8 : le contrôle Par courants de Foucault.

I.3. État de l'art du contrôle non destructif par courants de Foucault pulsés :

Dans le cas harmonique, l'enroulement du dispositif à courants de Foucault est alimenté continuellement par une onde de forme sinusoïdale. Alors que dans le cas pulsé, la bobine de contrôle est alimentée soit par un courant inversé périodiquement essentiellement une onde carrée à un temps de montée contrôlé ou bien par un courant de forme demi-sinusoïdale ou triangulaire [6]. Dans le cas d'une alimentation carrée l'inversion du champ crée une impulsion des courants de Foucault qui se propagent en profondeur dans la pièce. Un capteur de champ mesure la variation du champ magnétique en fonction de la variation du courant d'excitation. La manière dont ce champ évolue avec le temps dépend aussi de la structure de la pièce.

Dans le travail fait par Joseph M. Buckley [7] la sonde à effet hall est utilisée pour une réponse à des signaux de basses fréquences autour de 100kHz. L'avantage principal avec les sondes à effet Hall, est qu'elles correspondent à une pénétration en profondeur dans les pièces. D'autres systèmes à courants de Foucault pulsés utilisent un enroulement pour détecter le champ magnétique et donc pour mesurer le gradient du champ, plutôt que le champ lui-même. Il en résulte une sensibilité à des défauts qui dépendent du carré de la fréquence de l'enroulement, au lieu de la fréquence pour un capteur de champ, donnant une sensibilité relativement faible à des défauts en profondeur qui, de préférence, sont détectées par des composants de basses fréquences du signal transitoire. Une variété d'enroulements conçus a été appliquée, utilisant à la fois l'air et des noyaux de ferrite. Comme on pouvait s'y attendre des expériences actuelles des courants de Foucault, les tailles de bobines plus grandes ont tendance à avoir une distribution spatiale de basses fréquences ; ce qui donne une meilleure réponse sur les structures profondes, mais moins de sensibilité aux petits défauts. [8].

I-4 : Le contrôle non destructif par courant de Foucault CND-CF :

Cette technique utilise des courants induits à l'intérieur de la pièce, appelés courants de Foucault. Pour ce faire, un excitateur externe est employé, souvent constitué d'une bobine parcourue par un courant alternatif. Les courants induits sont de même nature et forment des boucles. [9]

Le Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Pulsés (CND-CFP) est une extension du CND-CF en mode multifréquences. L'utilisation d'une "impulsion" permet d'avoir une excitation à large bande spectrale. L'analyse se fait alors soit de manière temporelle, soit de manière spectrale. La variation du contenu spectral de l'impulsion est obtenue en agissant sur la forme et la durée de l'impulsion. On utilise des impulsions de courtes durées, essentiellement des signaux de formes rectangulaires de trapèze, ou de demi-sinusoïdes. La plupart du temps, la caractérisation de la grandeur recherchée se fait par l'étude de l'évolution de points particuliers du signal, passage par zéro, les pics, les amplitudes de ces derniers etc. [9]. On a aussi constaté la présence de point fixe indépendant de l'entrefer (lift-off) dans un certain nombre de configurations. L'évolution de ces points permet de faire un diagnostic. On constate que l'exploitation de la réponse se réduit la plupart du temps à l'exploitation d'une, deux ou plusieurs informations. La forme du signal d'excitation est souvent liée à l'existence d'un générateur à possibilités limitées, mais simple à réaliser. Le problème de l'efficacité du signal n'est pas posé dans la très grande majorité des applications. Dans certains cas, des techniques de traitement du signal ont été mises en œuvre [10]. Elles consistent à adapter le contenu spectral de l'excitation en fonction de la réponse du capteur et en utilisant la réponse obtenue avec une configuration de référence. Cette technique s'avère particulièrement efficace parce qu'elle permet d'éliminer "les bruits" qui ne permettent pas de réaliser la détection avec l'analyse de la réponse seule. Ces techniques sont en cours de développement et ne sont pas utilisées sur des systèmes à courants de Foucault industriels.

I-4-1 : Les courants de Foucault :

Le phénomène d'induction électromagnétique a été découvert par Faraday vers 1831 en cherchant à expliquer l'observation de François Arago en 1824 : les mouvements de l'aiguille d'une boussole sont freinés par la proximité d'une plaque de cuivre. Tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une force électromotrice (*fem*) d'induction. Cette *fem* donne naissance à des courants électriques appelés dans le monde anglosaxon par *eddy-current* (courants tourbillonnants) ou encore (*courants de Foucault*)

désignés du nom du savant français qui les découvrit (Jean Bernard Léon Foucault). Ils peuvent être synthétisés de la manière suivante : lorsque l'on place un matériau conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps, des courants induits se développent à l'intérieur de celui-ci sans en altérer les caractéristiques. [11]

I-4-2 : Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault :

Les courants de Foucault créent un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable crée un champ magnétique variable et, placée en vis-à-vis d'un objet conducteur, donne lieu au phénomène des CF. En présence d'une fissure, une inhomogénéité, un changement de géométrie, les lignes de courants induits sont déviées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction (fig9) et par conséquent modifie la force électromotrice de la bobine. L'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. [12]

Les courants de Foucault ne sont pas directement mesurables ; seul le champ magnétique qu'ils génèrent l'est. Cette méthode, nécessite donc une analyse mathématique poussée pour lier/corréler les caractéristiques du défaut à ce champ magnétique de façon à réaliser une imagerie du défaut et non pas une imagerie de champs. [12]

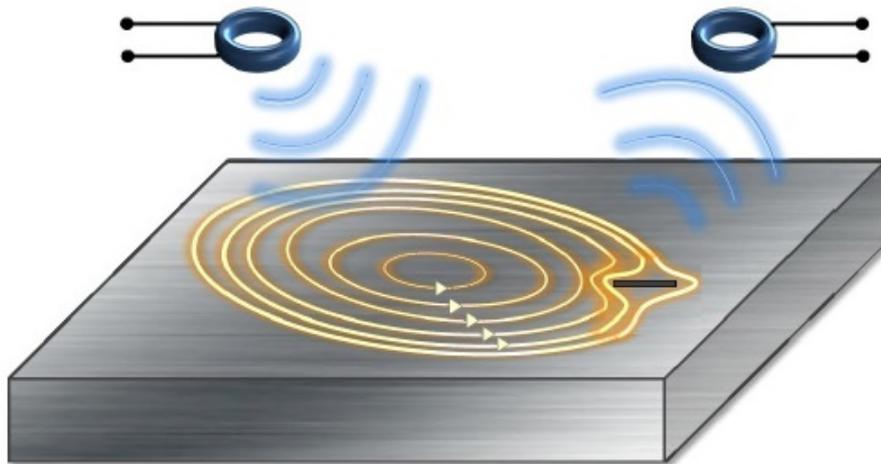


Figure 9 : Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault.

En régime harmonique, on considère une bobine caractérisée par N spires, parcourues par un courant d'excitation $I = I_0 e^{-j\omega t}$ (avec $\omega = 2\pi f$, la pulsation et f la fréquence), comme montré sur la figure 10. L'impédance de la bobine dans l'air, en Ω , peut être définie par : [13]

$$Z_{bob} = Z_0 = R_0 + jX_0$$

Avec $X_0 = \omega L_0$. R_0 . X_0 et L_0 sont respectivement la résistance (en Ω), la réactance (en Ω) et l'inductance (en H) de la bobine dans l'air. A proximité d'une pièce conductrice, un champ de réaction s'oppose au champ d'excitation de la bobine, φ_0 sur la figure (10), modifiant ainsi la valeur de l'impédance :

$$Z_{bob} = Z_{pièce} = R_{pièce} + jX_{pièce}$$

En présence d'un défaut dans la pièce, une variation supplémentaire due à la modification du champ causée par la déviation des courants de Foucault [12]. Affecte l'impédance de la bobine qui devient [8]

$$Z_{bob} = Z_{pièce} + (\Delta R_{pièce} + j\Delta X_{pièce}).$$

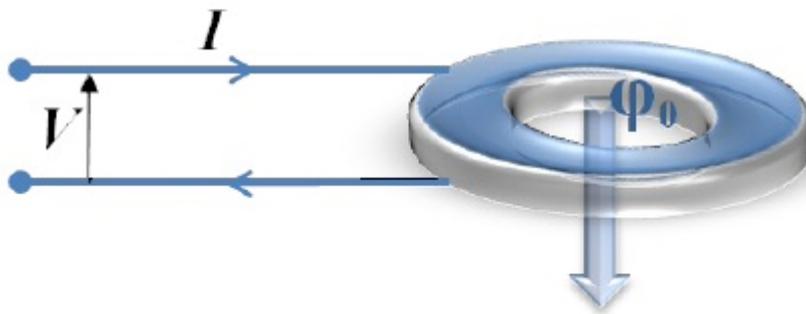


Figure 10: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique généré par ce courant.

Cette technique est surtout utilisée pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement à la surface des corps conducteurs, cet aspect est détaillé dans le paragraphe suivant dédié à l'effet de peau. [14]

I-4-3 : L'effet de peau :

L'intensité des courants de Foucault dans une cible conductrice, de conductivité électrique σ (en $S\text{m}^{-1}$) et d'une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques δ . L'épaisseur de peau est inversement proportionnel à la conductivité, à la fréquence et à la perméabilité magnétique, elle est définie comme suite [15]

$$\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu}.$$

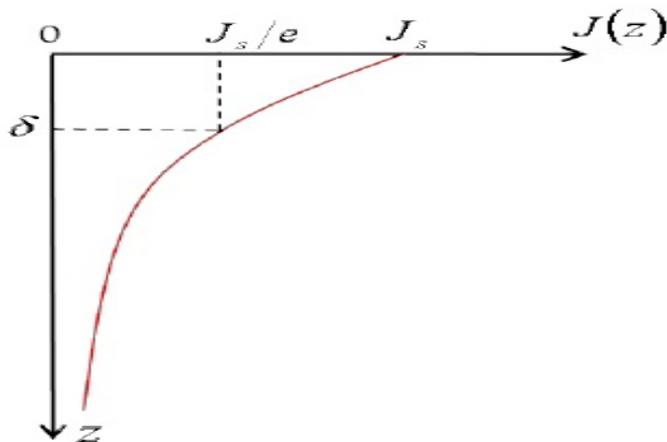


Figure 11: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z .

I-4-4 Principe physique de CND-CF :

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault (loi de Maxwell Faraday et loi d'Ohm). En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique oppose au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant (excitation et réaction) modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur [16]. Par ailleurs, les courants de Foucault sont importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant sur la profondeur. L'utilisation des faibles fréquences peut assurer la capture des défauts profonds. La figure (12) résume le principe de CND par courant de Foucault.

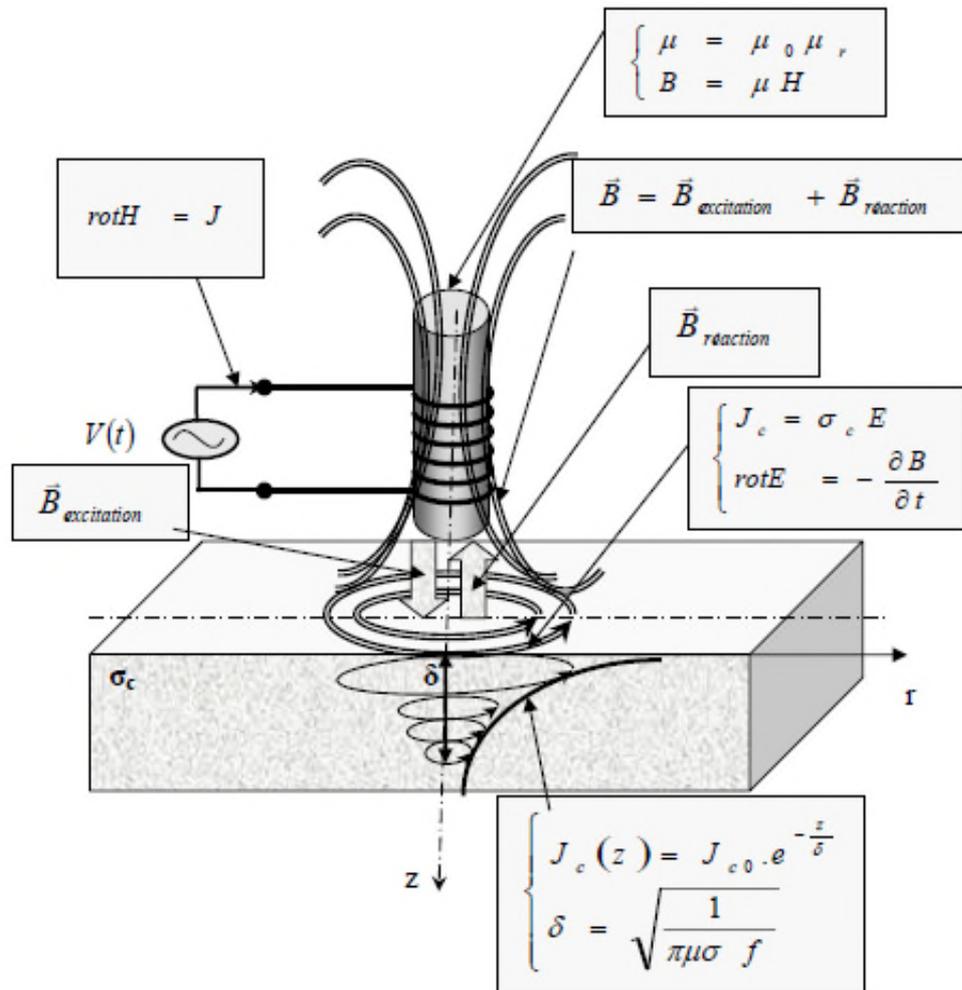


Figure 12 : Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.

I-4-4 : Les modes de CND/END par CF :

I-4-4-1: E&CND mono-fréquence:

Lors d'un contrôle mono-fréquence, le champ magnétique est généré par une bobine ou un inducteur alimenté par un courant sinusoïdal de fréquence fixe. La présence d'un défaut dans une pièce conductrice peut être détectée en mesurant la variation de l'impédance de la bobine d'excitation par rapport à celle mesurée sur une zone de l'échantillon exempte de défaut. [17]

L'impédance de la bobine peut être représentée dans le plan d'impédance dont l'axe horizontal représente la partie réelle et l'axe vertical la partie imaginaire. A vide (i.e. lorsque la bobine est suffisamment éloignée du matériau) l'impédance de la bobine est représentée par un point $Z_0(R_0, X_0)$. En présence d'une cible conductrice, l'impédance de la bobine varie, elle

est présentée par un point $Z_1 (R_1, X_1)$. Pour une bobine donnée, alimentée par une excitation de fréquence fixe, Z_1 est fonction des propriétés électriques, magnétiques et géométriques de la partie du matériau conducteur située dans la zone influençant le champ magnétique de la bobine. Toute variation de ces paramètres provoquera un déplacement de Z_1 dans le plan d'impédance (figure 13). Grâce à ce phénomène, il est possible de détecter une variation de la conductivité ou une variation des dimensions du matériau ou de la distance entre le capteur et la cible. [17]

En pratique, on représente souvent les résultats des mesures d'impédance dans le plan d'impédance normalisée. L'avantage est d'avoir des résultats qui ne dépendent pas des caractéristiques de la bobine à vide. Dans le plan d'impédance normalisée les paramètres les plus couramment utilisés pour détecter et classifier les défauts sont les caractéristiques de la forme de la signature (comme l'amplitude et la phase) en sinusoïdal et certains paramètres supplémentaires [18] dont l'analyse peut permettre d'augmenter la précision des résultats [19].

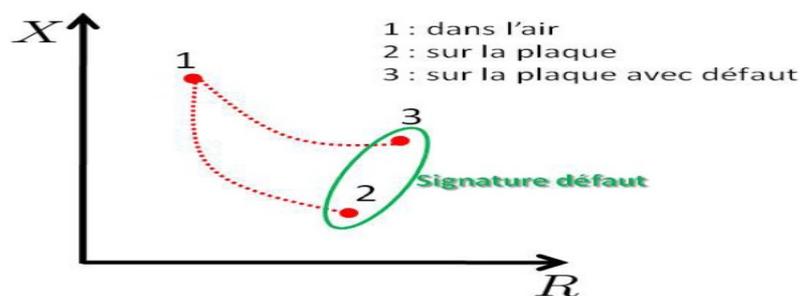


Figure 13: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine.

I-4-4-2: E&CND multifréquence :

Diverses méthodes d'E&CND à CF utilisant plusieurs fréquences ont été proposées pour résoudre les problèmes de ce type de contrôle. Le mode multifréquences permet d'obtenir plusieurs informations utiles concernant la structure testée [20], et aussi de rendre la caractérisation plus robuste. Pour ce type de contrôle, les résultats de mesures à plusieurs fréquences sont analysés. On alimente le capteur par un courant sinusoïdal successivement à chacune des fréquences considérées. Les résultats correspondant à chacune de ces fréquences sont collectés comme pour les mesures mono-fréquence.

Selon une étude de W.E. Deeds [21], le nombre de fréquences nécessaires est lié aux perturbations dont on souhaite s'affranchir. D'après W.E. Deeds, utiliser n fréquences permet

d'éliminer de $2n-1$ perturbations. En utilisant le module et la phase de signaux CF à trois fréquences différentes, les auteurs indiquent qu'on peut déterminer au maximum 6 variables distinctes dont une désirée (taille de défaut) et cinq perturbées (lift-off, l'emplacement du défaut, dimensions et la résistivité de l'objet inspecté). En matière de CND multifréquences, une possibilité consiste à utiliser des signaux périodiques contenant un grand nombre de fréquences. Pour caractériser un défaut, Thollon [22] propose d'analyser les spectres en amplitude et en phase du signal obtenu par un capteur à effet Hall. Si la méthode et les résultats obtenus sont intéressants, la durée du contrôle due à l'analyse spectrale peut être prohibitive pour certaines applications.

I-4-4-3: E&CND impulsions :

L'analyse des signaux en CF pulsés est totalement différente de celle utilisée en CF sinusoïdaux. On exploite généralement la réponse temporelle directement fournie par la ou les bobines réceptrices. L'analyse se fait alors via l'étude de l'évolution d'un ou plusieurs points particuliers du signal de réception. Les caractéristiques des signaux transitoires couramment utilisées dans le domaine du contrôle par CF pulsés sont les valeurs crête des amplitudes (" peak value ") et l'abscisse temporelle de ces valeurs crête (" peak time ") aussi que celles de passage par zéro (" zéro time "). Certaines études récentes s'attachent à exploiter d'autres caractéristiques de signaux impulsions: comme des points caractéristiques de la croissance ou de la décroissance du signal. [17]

Un avantage du E&CND par CF pulsés, par rapport notamment aux CF mono-fréquence, est la possibilité d'inspecter les structures électriquement conductrices jusqu'à une profondeur relativement grande, grâce à un large spectre de fréquences et notamment basse fréquence. En revanche, cette méthode nécessite un temps d'inspection très élevé, en particulier si l'on utilise des techniques d'analyse spectrale et elle peut s'avérer difficile à calibrer ou peu pratique du point de vue industriel, du fait du manque d'algorithmes de traitement du signal appropriés [23]. Le traitement du signal temporel est compliqué et les appareils simples satisfaisant efficacement aux besoins réels sont difficiles à réaliser en raison des fortes puissances impulsionsnelles qui doivent être fournies, mais le développement de l'outil informatique et de traitement numérique, cette technique de CND-CF en mode pulsé devient favorable et efficace.

I-4-5: Les capteurs à courants de Foucault :

La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault nécessite la mise en place d'un système permettant l'émission et la réception d'un champ magnétique alternatif. Ces deux fonctions peuvent être réalisées par un seul élément ou par deux éléments distincts. Les capteurs magnétiques transforment les variations du champ magnétique en une variation de tension mesurable. Nous pouvons classer les capteurs permettant de mesurer un champ magnétique variable en deux grandes familles :

- les capteurs **inductifs**. Historiquement les premiers éléments connus sensibles au champ, ils sont des bobines qui transforment le champ magnétique qui les traverse en tension. Elles peuvent être utilisées en émission et en réception.
- les capteurs **magnétiques**. La variation de l'impédance ou de la résistance de ces capteurs est proportionnelle au champ magnétique dans lequel ils sont plongés. L'émission du champ magnétique alternatif doit être réalisée par un autre élément. [24]

I-4-6 : Types de capteurs :

Selon la forme géométrique, on distingue cinq principales configurations :

I-4-6-1 La bobine encerclante : [60]

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (figure14). Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. .

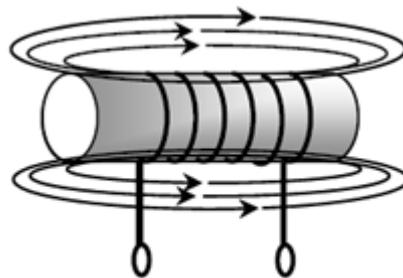


Figure 14 : Bobine encerclante.

I-4-6-2 Sonde interne :

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau (figure15).

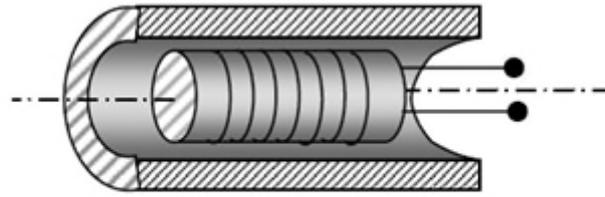


Figure 15 : Bobine interne glissante avec noyau.

I-4-6-3 Sonde ponctuelle :

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe (figure16).

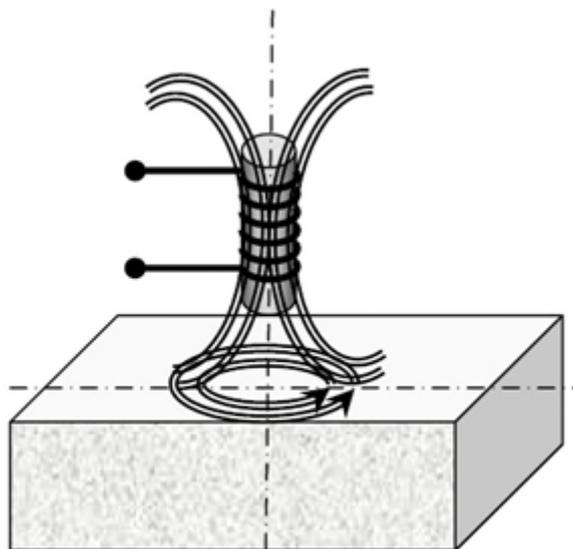


Figure 16 : Bobine simple avec noyau.

I-4-6-4 Bobine plate :

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large (figure17).

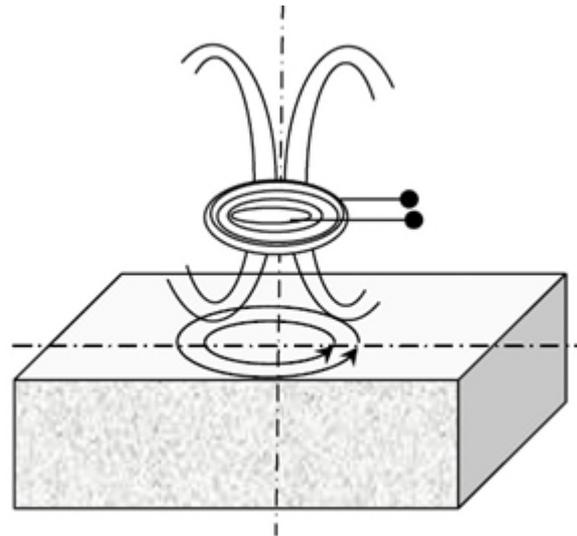


Figure 17 : Bobine plate.

I-4-6-5 Sonde interne tournante :

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube (figure18).

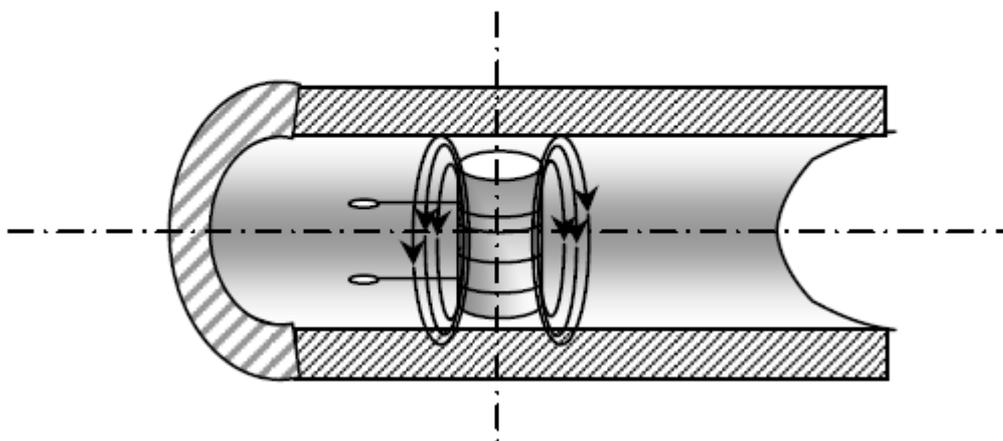


Figure 18 : Capteur interne tournant.

I-4-7 Fonctions du capteur :

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

I-4-7-1 Capteur à double fonction : [60]

Ce capteur assure les deux fonctions (figure19) d'excitation et de réception. L'extraction de l'information se fait (en mode harmonique) par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance. Cette dernière est due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou à la présence d'une anomalie dans se matériaux.

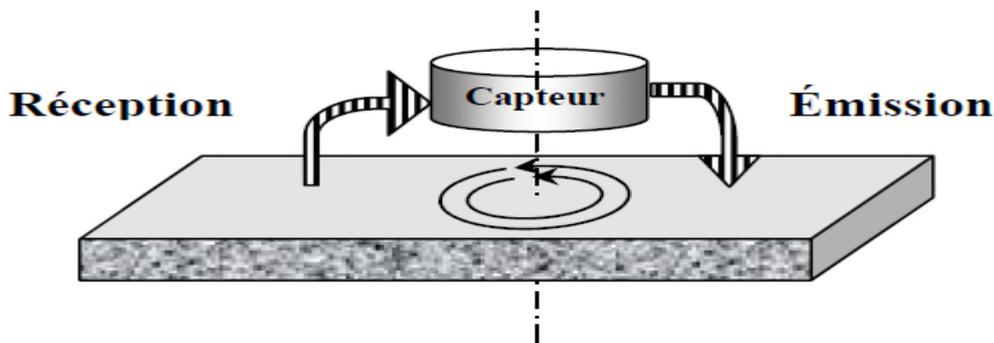


Figure 19 : Capteur à double fonction.

I-4-7-2 Capteur à fonctions séparées :

Le capteur est muni d'un second enroulement qui servira uniquement pour la mesure (figure20). On parle alors de mesure par transe-impédance ou de capteur à fonctions séparées.

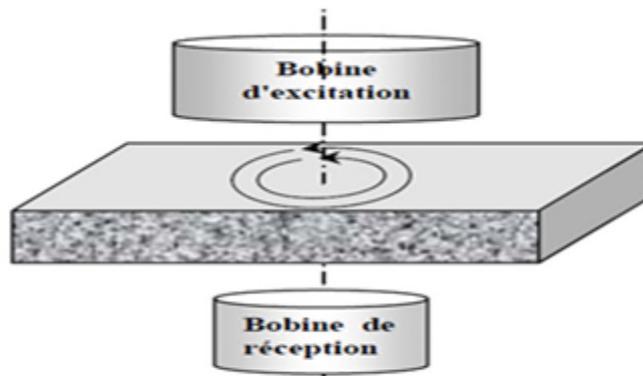


Figure 20 : Capteur à fonction séparée.

I-5 Les défauts :

Lorsqu'une pièce conductrice est plongée dans un champ magnétique variable, des courants induits vont apparaître avec une répartition telle qu'ils créent un champ magnétique oppose à la variation du champ d'excitation. L'intensité et le chemin des courants peuvent être modifiés par la présence d'un défaut (figure 21). Cette modification engendrera la même variation d'impédance que provoquera une variation de conductivité. [60]

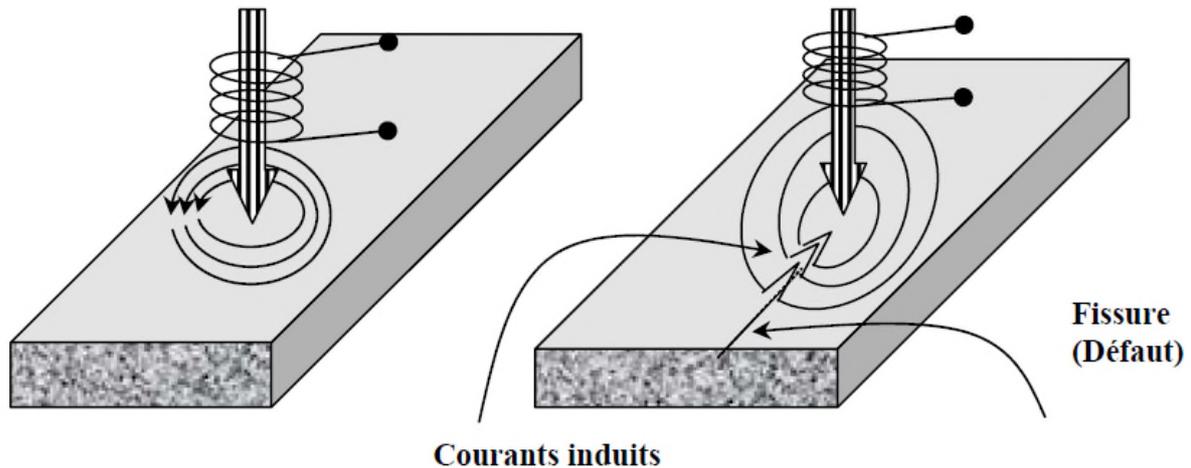


Figure 21 : Influence du défaut sur la répartition des courants induits.

Un défaut de forme donnée peut avoir un effet selon sa direction (figure 22). Dans la figure (a). La perturbation des lignes est importante, par contre légère si l'axe du défaut se coïncide avec celui du défaut figure (b).

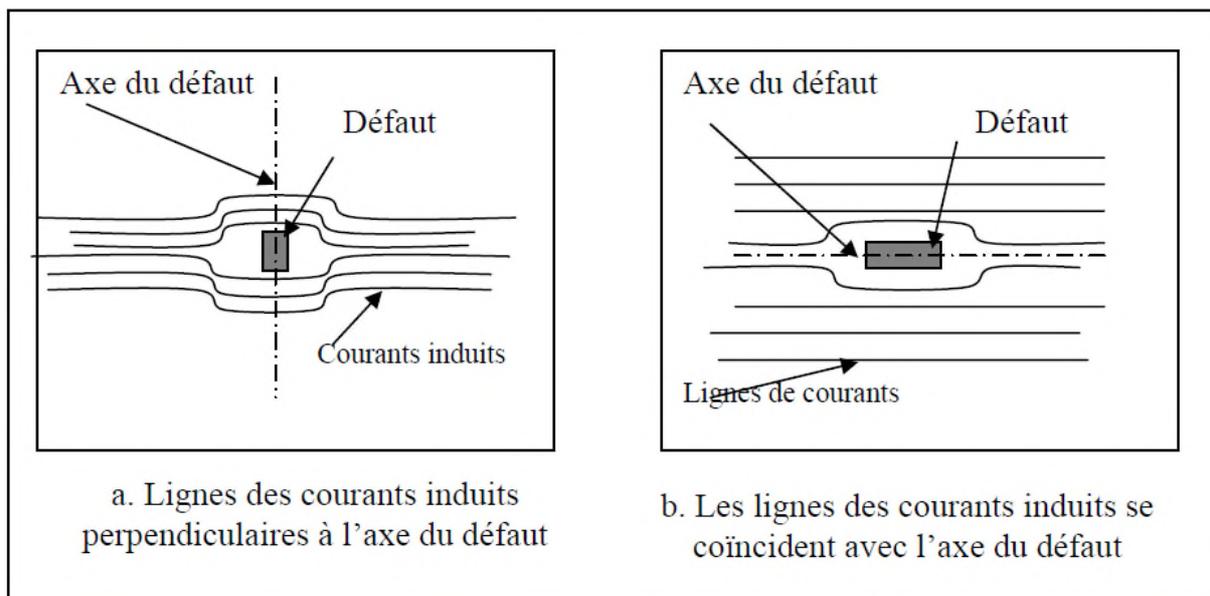


Figure 22 : Influence de la position du défaut.

La figure (23) présente les défauts axisymétriques dans les configurations de type pancake.

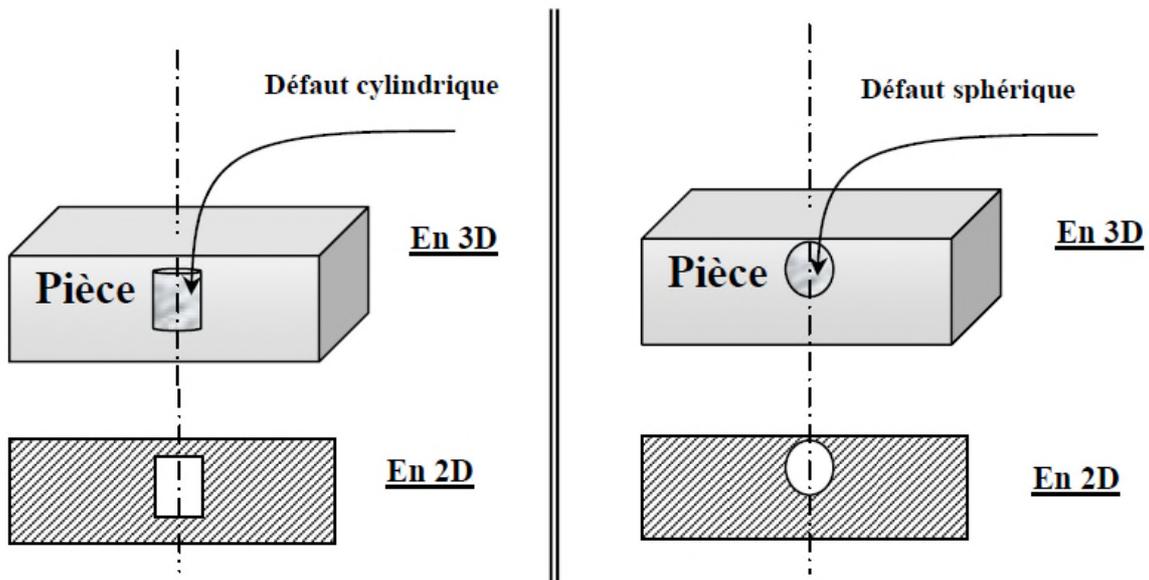


Figure 23 : Plaque présentant un défaut cylindrique et sphérique.

La figure (24) représente une pièce cylindrique dont le défaut est axisymétrique. Ce dernier peut être détecté par un capteur différentiel (fixe ou en déplacement) ou par un capteur absolu.

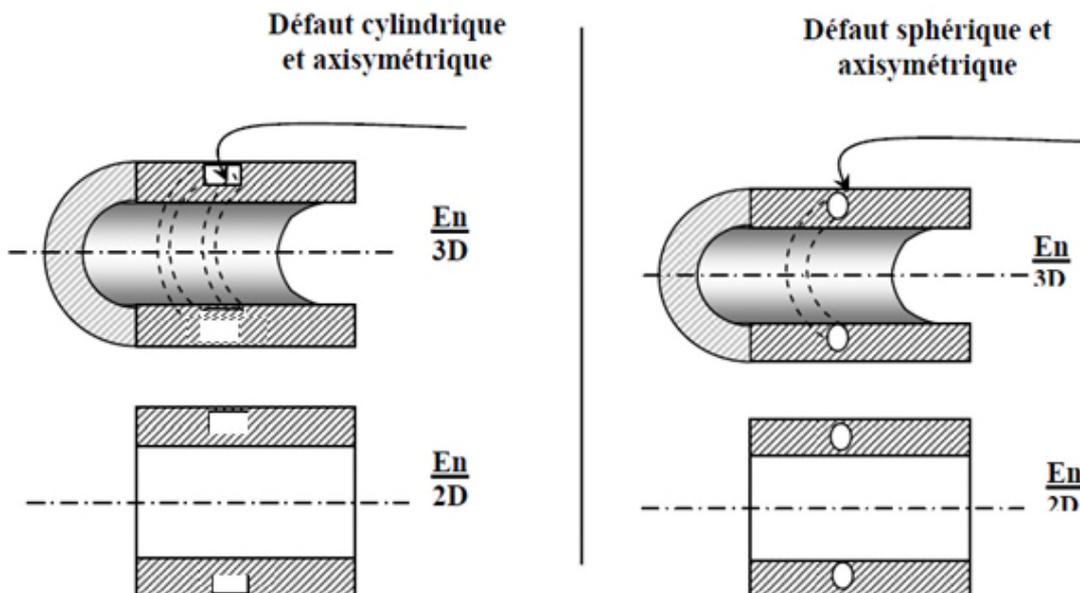


Figure 24 : Pièce cylindrique avec un défaut cylindrique et sphérique.

I-6 Excitation en mode pulsé :

La forme et la durée de l'impulsion appliquée au capteur permet de faire varier la sensibilité et le contenu spectrale de la réponse. L'excitation utilisée en CND-CFP est de type courant ou tension, de forme rectangulaire (carrée), trapézoïdale, triangulaire ou semi-sinusoïdale ou autre. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des impulsions triangulaires suivis de par les semi-sinusoïdes à performance sensiblement égale. La génération d'impulsion semi-sinusoïdale et l'exploitation des signaux de réception associés s'impose en raison de sa simplicité de mise en œuvre pratique. Nous allons utilisés dans ce travail l'excitation en courant d'amplitude de 5mA, de forme semi-sinusoïdale (Figure 25.a) et carrée (Figure 25.b). L'amplitude et la largeur d'impulsion sont réglables et peuvent être modifiées afin d'obtenir une bonne réponse du signal de réception permettant le contrôle et l'évolution. [19].

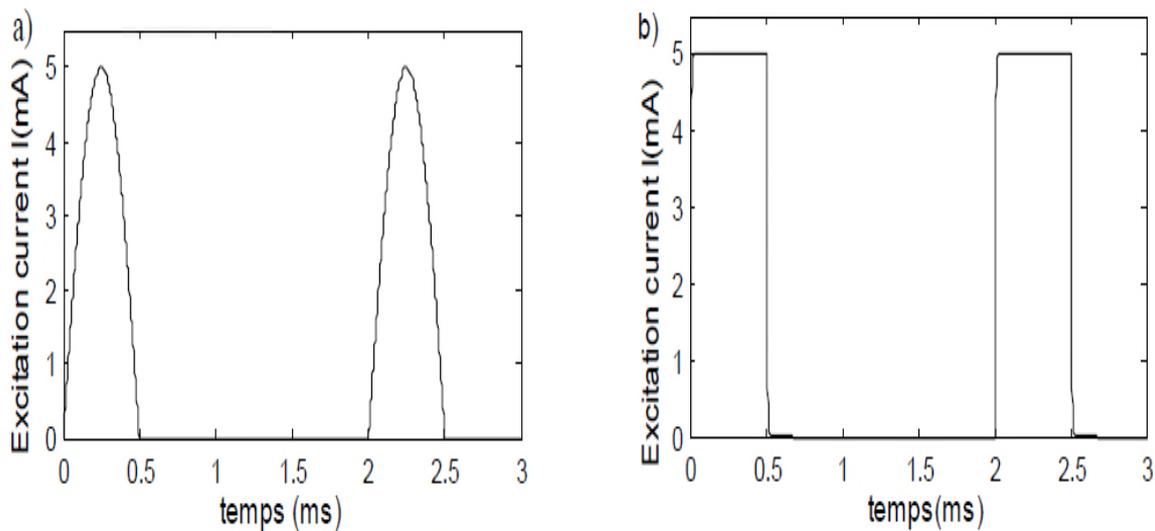


Figure 25 : Forme du signal d'excitation en mode impulsif de rapport cyclique $\frac{1}{4}$;a) Excitation de forme semi sinusoïde.

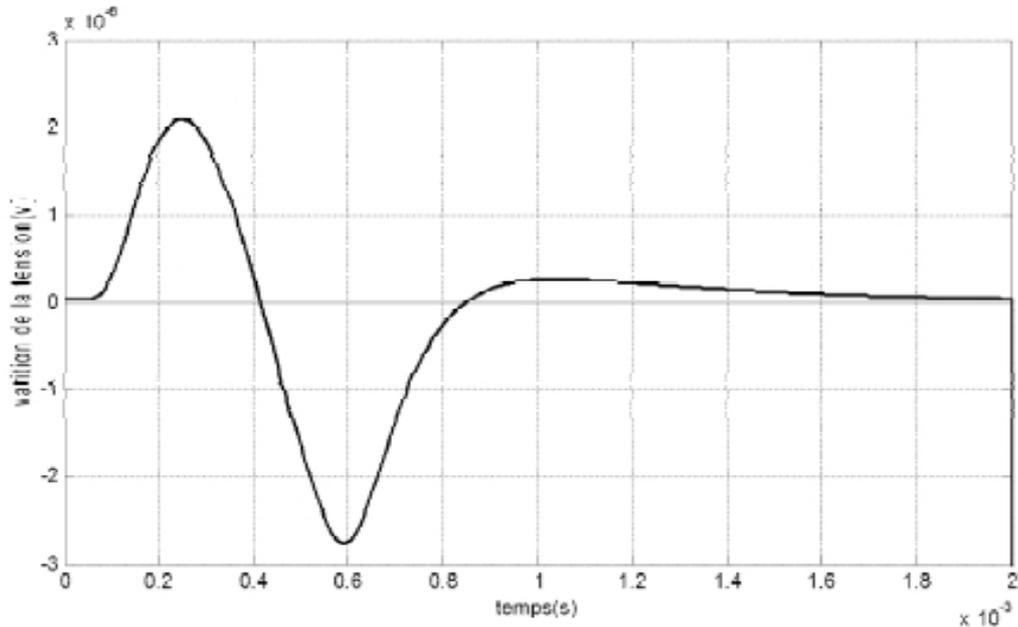
I-7 La variation temporelle de la tension due à la présence d'une rainure :

Figure 25.1 variation temporelle de la tension due à la présence d'une rainure.

$$\Delta U_{sd} = U_{ssd} - U_{sd}$$

U_{ssd} : Tension aux bornes du capteur pour une pièce sans défaut.

U_{sd} : Tension aux bornes du capteur pour une pièce avec défaut.

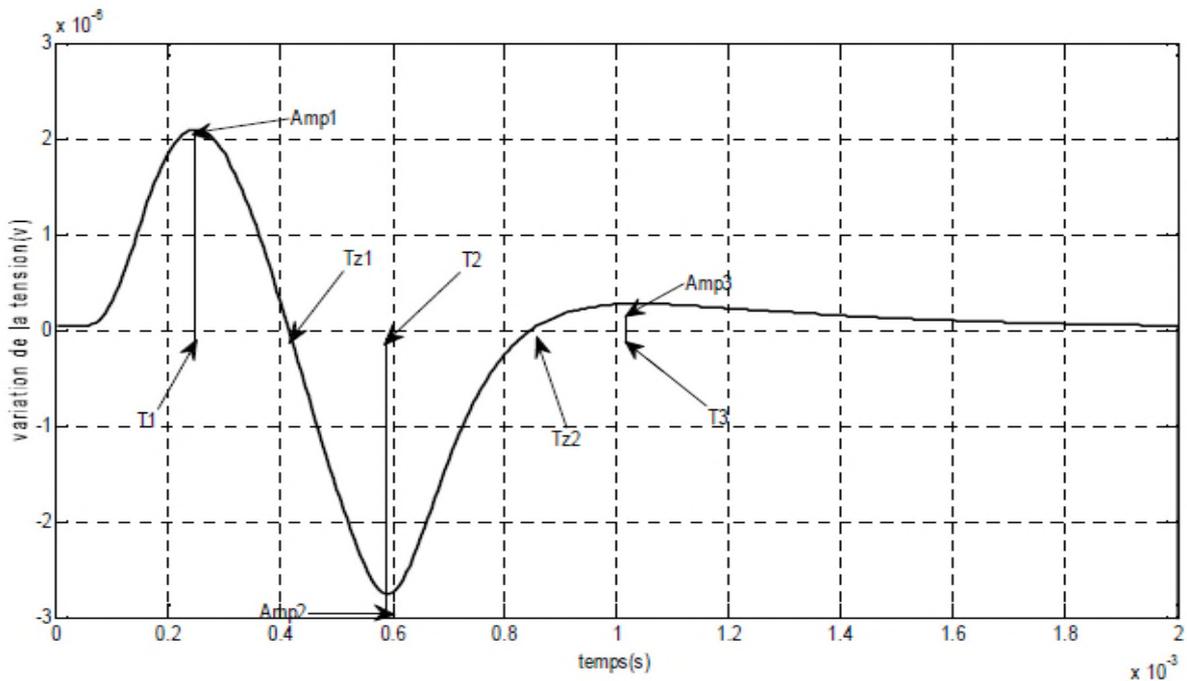
I-8 Paramètres permettant le contrôle par courants de Foucault pulsé :

Figure 25.2 les paramètres d'évaluation.

Les paramètres de l'évolution temporelle de la variation de la tension permettant l'évaluation par CND-CF sont :

Amp1, Amp2, Amp3 : correspondant respectivement aux 1^{er}, 2^{ème} et troisième pic de la variation de la tension.

T1, T2, T3 : Les temps correspondants aux pics de la variation de la tension.

Tz1, Tz2 : Les temps de passage par zéro de la variation de la tension.

I-9 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de voir l'historique et l'intérêt du de CND-CF ainsi que les différents modes de CND-CF mono fréquence, multifréquence et pulsé. Les capteurs sont bien été expliqués. La conception et l'optimisation des capteurs à CF nécessitent une compréhension préalable du mécanisme de création des courants de Foucault et des modèles mathématiques qui les dérivent. Cette tâche fera l'objet sera l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 2:

Approche analytique et numérique du CND-CFP

II-1 Introduction :

Les phénomènes électriques et magnétiques ont été étudiés séparément au début. Les interactions entre ces deux phénomènes ont été mises en évidence pour la première fois par : Ampère (1775-1836), qui a montré que la source du magnétisme est le courant électrique, Gauss (1777-1855), qui a démontré que la source du champ électrique est la charge électrique statique, et Faraday (1791-1867) qui relie la création de l'un des champs électrique et magnétique par l'autre et vis versa. Le couplage des deux phénomènes qu'on regroupe en un mot "Electromagnétisme", on le doit à James Clark Maxwell (1831-1879). Ce dernier a exploité les découvertes des précédents, pour donner la formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques [25, 26, 27].

L'étude du CND-CFP passe par l'analyse des courants induits dans la pièce à contrôler et de la façon dont ils interagissent avec cette dernière. Cela dépend essentiellement des propriétés électromagnétiques et géométriques de la pièce et du capteur, ainsi que du signal d'excitation. Le phénomène des courants induits est régi par les quatre équations de Maxwell, leur résolution passe par des hypothèses simplificatrices et l'adoption d'une formulation. Ceci nous ramène à la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles qui peut être orienté soit vers des méthodes analytiques (séparation des variables, fonctions elliptiques, de Bessel, de Legendre etc.), des méthodes numériques (Méthode des éléments finis (MEF), Méthode des Différences Finis (MDF), Méthode des Volumes Finis (MVF), Méthode des Intégrales de Frontières (MIF) etc.) [28, 21, 29] Ou bien vers des méthodes semi-analytique [30, 31] dont la méthode des circuits électriques couplées (MCEC).

Nous allons aborder dans ce chapitre les équations de Maxwell régissant le phénomène électromagnétique des courants de Foucault ainsi que les formulations qui en découlent. Nous présentons la simplification de ces équations aux cas de régimes quasi-stationnaires ainsi que leurs formulations à des configurations géométriques spécifiques. Nous établirons différentes formulations en fonction de la grandeur d'état, selon laquelle les équations simplifiées de Maxwell sont résolues. Nous exposerons ensuite brièvement les modèles déjà développés et les méthodes de résolution utilisées dans ce type de problème [32].

II-2 Equations de Maxwell et lois de comportement des milieux :

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux. Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne, ou est due à, l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans l'espace et dans le temps. Pour calculer du champ électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de MAXWELL [25, 26, 27, 33], qui s'écrivent sous leurs formes la plus générale comme suit :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (II.1) \quad (\text{équation de conservation du flux magnétique})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \dots \dots \dots (II.2) \quad (\text{équation de Maxwell – Gauss})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots \dots \dots (II.3) \quad (\text{équation de Maxwell – faraday})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots \dots \dots (II.4) \quad (\text{équation de Maxwell – faraday})$$

E [V/m] et H [A/m] : Champs électrique et magnétique.

D [A.s/m] et B [T] : Inductions électrique et magnétique.

J [A/m²] et ρ [C/m³] : Densités de courant de conduction et de charge électrique.

L'équation (Maxwell-Ampère) traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement. Elle établit une relation entre le champ magnétique et les courants électriques, c'est une généralisation du théorème d'Ampère.

L'équation (Maxwell-Faraday) traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur fixe ou en mouvement soumis à un champ magnétique variable. Elle établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique, elle correspond à la loi d'induction de Faraday.

Ces deux équations (Maxwell-Ampère) et (Maxwell-Faraday) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (conservation du flux magnétique) et (Maxwell -Gauss) traduisent respectivement la conservation du champ magnétique et de la charge électrique.

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on ajoute aux équations précédentes les lois de comportement du milieu homogène et isotrope. Ces dernières sont la loi d'Ohm, les relations magnétiques et les relations diélectriques, elles montrent que les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent.

$$\vec{j} = \sigma * \vec{E} \dots \dots \dots (II.5) \quad (\text{loi d'ohm})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots \dots \dots (II.6) \quad \mu = \mu_0 \mu_r \dots \dots \dots (II.7) \text{ relations magnétiques.}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \dots \dots \dots (II.8) \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \dots \dots \dots (II.9) \text{ relations diélectriques.}$$

$\sigma [(\Omega \cdot m)^{-1}]$: Conductivité électrique.

$\mu [H/m]$: Perméabilité magnétiques.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m perméabilité magnétiques à vide.

μ_r Perméabilité magnétiques relative au milieu.

ε [F/m] perméabilité électrique.

$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ perméabilité électrique du vide.

$$\varepsilon_0 \mu_0 C^2 = 1$$

' C ' la vitesse de la lumière.

II-3 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire :

II-3-1 Hypothèses simplificatrices :

Les équations qui précèdent décrivent globalement les phénomènes électromagnétiques et s'appliquent a des états quelconques. Dans la pratique, en fonction du domaine d'utilisation, on simplifie ces équations. Ces dernières se découpent alors en donnant naissance à des modèles plus simples [34].

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale les courants de conduction et de déplacement sont définis respectivement comme suit :

$$\vec{J}_C = \sigma \vec{E} \dots \dots \dots (II.10)$$

$$\vec{J}_d = j2\pi f \varepsilon \vec{E} \dots \dots \dots (II.11)$$

Dans le domaine de l'électrotechnique, la fréquence utilisée est au maximum de l'ordre de 1MHz.

Les distances de la région où on observe les phénomènes sont faibles devant la longueur d'onde du champ électromagnétique.

Les matériaux utilisés dans le contrôle non destructif par courants de Foucault sont suffisamment conducteurs pour considérer que le rapport (ε/σ) très faible.

À partir d'hypothèses, on conclut que l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) est valable. Cette approximation consiste à négliger, d'une part la charge d'espace dans les conducteurs, et d'autre part la durée de propagation des champs électromagnétiques devant toute durée caractéristique de la variation de ces derniers. En d'autres termes, l'effet propagatif du champ est négligé. En terme de courant, cela revient à négliger le courant de déplacement $\partial \vec{D} / \partial t$ devant le courant de conduction \vec{J} .

De la troisième hypothèse on déduit que la charge électrique statique ρ ainsi que l'effet capacitif du système sont négligés.

II-3-2 Equations de Maxwell simplifiées :

Dans ces conditions, le problème général consiste à trouver les grandeurs locales liées par les équations suivantes :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \dots \dots \dots (II.12)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \dots \dots \dots (II.13)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (II.14)$$

$$\text{div} \vec{E} = 0 \dots \dots \dots (II.15)$$

II-3-3 Equations électromagnétiques couplées :

Les approximations précédentes ont pour rôle de réduire le phénomène électromagnétique à un phénomène d'induction, mais, les équations restent toujours globales. Et on ne peut pas les résoudre directement. Le phénomène comporte six inconnues (3 composantes pour chacun des champs électriques et magnétiques). Pour remédier à ce

problème, on étudie le phénomène selon la géométrie des dispositifs avec un choix approprié de la variable d'état.

Les méthodes utilisées sont généralement celles qui font appel à l'une des grandeurs locales (\vec{H} , \vec{E} et \vec{A}) comme inconnue principale (variable d'état). À chacune de ces grandeurs correspond une équation aux dérivées partielles. On peut alors choisir indifféremment l'une comme l'autre de ces grandeurs qui présente un jeu d'avantages et d'inconvénients comparables, sauf toutefois, si on dispose de simplifications géométriques possibles du phénomène [35].

En introduisant le potentiel magnétique vecteur, dont l'induction magnétique dérive dans l'espace, et le potentiel scalaire électrique où le champ électrique dérive de celui-ci, le problème se résume à résoudre les deux équations couplées suivantes :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \vec{j} \dots \dots \dots (II.16)$$

$$\vec{j} = -\sigma \left(\frac{d\vec{A}}{dt} + \overrightarrow{grad} V \right) + \vec{J}_{ex} \dots \dots \dots (II.17)$$

Où \vec{A} [T.m] est potentiel vecteur magnétique et V [V] est le potentiel scalaire électrique.

II-3-4 Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques :

Dans une configuration cylindrique, on choisit comme variable d'état le potentiel vecteur magnétique A ou le champ électrique E car ils n'ont qu'une seule composante orthogonale au plan de l'étude comme le montre la figure 26. Dans le cas des systèmes axisymétriques, traités en coordonnées cylindriques, cette composante est dans la direction angulaire et elle ne dépend que de r et z [36, 37].

II-3-5 Equation de diffusion électromagnétique généralisée :

En considérant la configuration dont l'inducteur est un plan spiral face à une charge plane ou une forme cylindrique et en négligeant l'élicité des spires inductrices, ce système possède une symétrie de révolution. Le problème devient bidimensionnel.

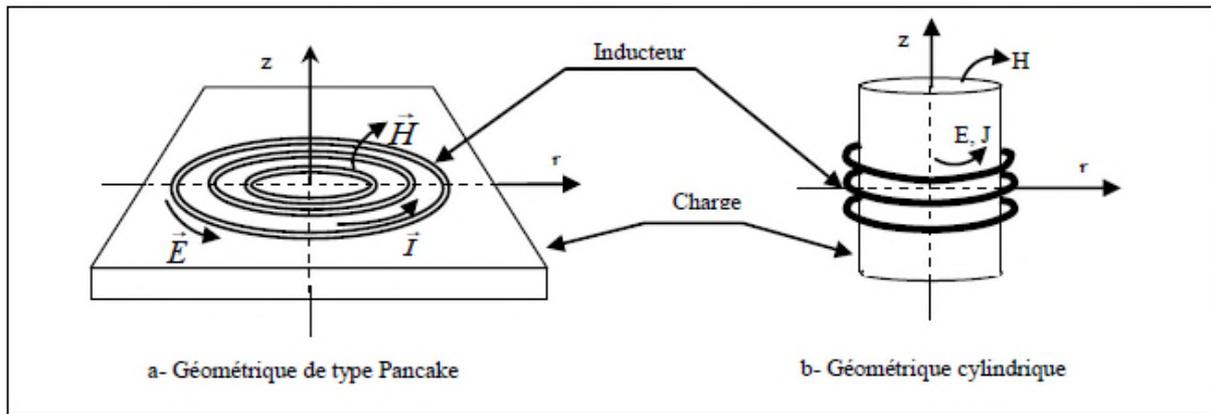


Figure 26 : Dispositifs d'étude.

Le potentiel se réduit à sa composante azimutale suivant l'axe θ qui ne dépend que de r et z et où l'inconnue est perpendiculaire au plan r - z (Fig.26). D'où :

$$\vec{A} = A_{\theta}(r, z)e_{\theta} \dots \dots \dots (II. 18)$$

$$\vec{J} = J_{\theta}(r, z)e_{\theta} \dots \dots \dots (II. 19)$$

A, J seront considérés dans la suite de l'étude comme étant des scalaires et sont égaux respectivement à A_{θ}, J_{θ} . L'induction \vec{B} n'a que deux composantes, l'une suivant r et l'autre suivant z .

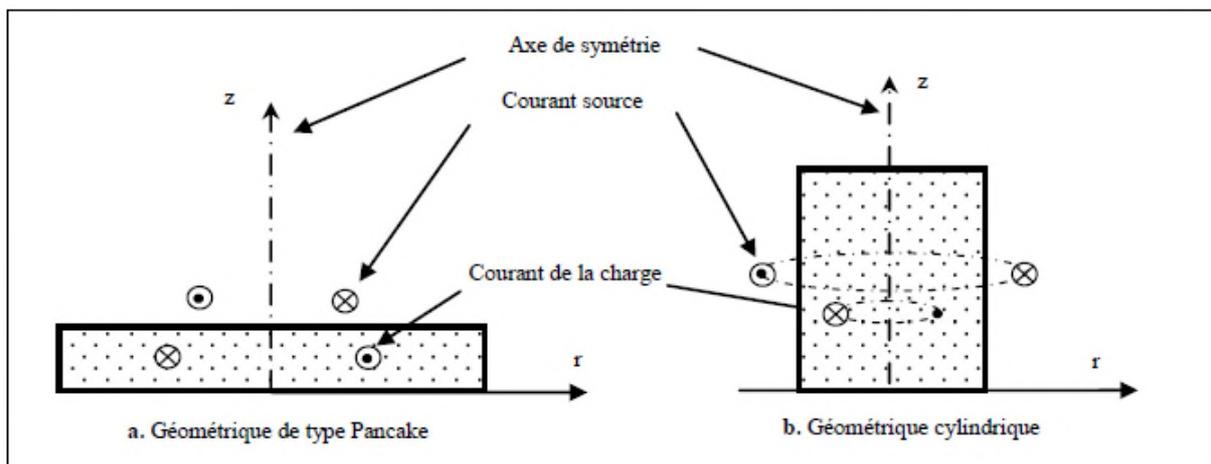


Figure 27 : Dispositifs d'étude

Dans ce cas, on trouve que la condition de jauge [36,38] ou encore que $div(\vec{J}\vec{e}_{\theta})=0$ est constamment vérifiée. Cela impose à une ligne de courant qui passe par un point donné d'y revenir après un trajet plus au moins long à une distance de ce point d'autant plus petite que l'élécite des spires inductrices est négligeable. Ainsi, les lignes de courants sont des circonférences d'axe z . Le calcul vectoriel en coordonnées cylindriques et l'utilisation de la notation complexe permettent d'atteindre le résultat suivant :

$$\operatorname{div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}}A) = -\mu J \dots \dots \dots (II.20)$$

$$\vec{j} = -\sigma \left(\frac{d\vec{A}}{dt} + \overrightarrow{\operatorname{grad}}V \right) \dots \dots \dots (II.21)$$

Dans le cas harmonique en notation complexe de la deuxième équation s'écrit :

$$\vec{j} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\operatorname{grad}}V \right) \dots \dots \dots (II.21) \text{ équation aa.}$$

II-3-6 Equation des différentes régions :

II-3-6-1 Equation dans le vide :

Les régions non conductrices sont caractérisées par une conductivité nulle et ca se réduit à l'équation de Laplace [36].

$$\operatorname{div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}}A) = 0 \dots \dots \dots (II.22)$$

II-3-6-2 Equation dans l'inducteur :

L'inducteur est caractérisé par une perméabilité magnétique égale à celle du vide (μ, μ_0). Lorsque celui-ci est alimenté par un générateur de tension, l'équation généralisée devient :

$$\operatorname{Div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}}A) = -\mu_0 J \dots \dots \dots (II.20)$$

Dans ce cas, le potentiel scalaire V doit être relié à la tension du générateur alimentant l'inducteur, le courant de celui-ci étant inconnue [36].

II-3-6-3 Equation dans la charge :

Puisque le système est axisymétrique, le gradient du potentiel scalaire électrique est nul et le courant n'est créé que par la première composante de l'équation (aa) qui est la variation temporelle du potentiel vecteur magnétique. Par conséquent, on a :

$$\begin{aligned} \operatorname{Div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}}A) &= -\mu J \dots \dots \dots (II.20) \\ J &= -j\omega\sigma A \end{aligned}$$

II-4 Techniques de calcul d'impédance :

II-4-1 Hypothèses :

Considérant une bobine de section Ω et formée de N spires jointives disposées en séries (Figure 28). La densité de courant est de répartition uniforme. La spire élémentaire à la bobine est soumise à une tension du et parcourue par une l'intensité du courant I . [39].

$$I = \iint_{\Omega} \vec{j} \cdot d\vec{\Omega} \dots \dots \dots (II.23)$$

$$I = J\Omega/N \dots \dots \dots (II.24)$$

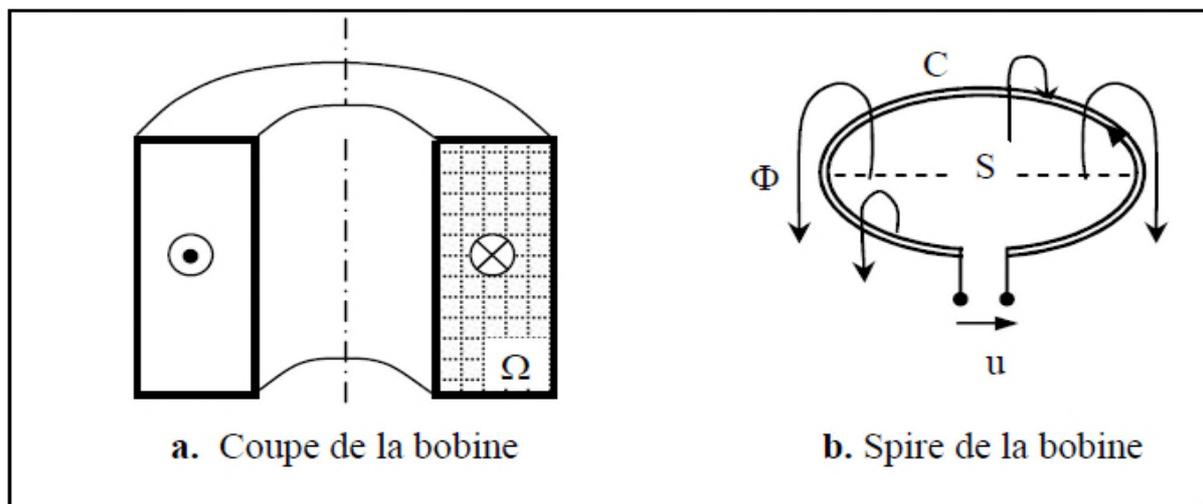


Figure 28 : Bobine à N spires jointives

La tension totale est la somme des tensions élémentaires de chaque spire car les spires sont disposées en séries, soit :

$$U = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} u d\Omega \dots \dots \dots (II.25)$$

Différents types de formulations de l'impédance sont possibles. Ces formulations se différencient dans la variable d'état utilisée. Le choix de la variable d'état est relatif aux configurations du problème et à la solution issue de la résolution des équations de Maxwell.

II-4-2 les différents types de formulations de l'impédance :

- Impédance à travers les énergies électromagnétiques.
- Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique.
- Impédance à travers la théorie des circuits.

II-5 Bibliométrie des modèles existants :

La recherche bibliographique est restreinte aux modèles bidimensionnels. La géométrie de ces modèles est définie par une demi-surface. Cette demi-surface s'obtient dans

le cas d'une plaque infinie et d'épaisseur finie ou dans un cylindre plein ou creux de longueur infinie. Les modèles bidimensionnels issus des formes cylindriques sont des modèles axisymétriques. Ces modèles sont élaborés pour des configurations qui admettent une symétrie suivant un axe de révolution.

La conception d'un dispositif s'appuie non seulement sur l'expérimentation mais aussi sur un modèle mathématique qui prévoit son comportement. Une fois le modèle mathématique est validé, il est possible, à travers des essais numériques sur le modèle, de dimensionner le dispositif avant de le réaliser. Les dispositifs du contrôle non destructif par courants de Foucault nécessitent, d'une part, pour leur conception un modèle dit "direct", qui consiste à prévoir la réponse du capteur en fonction des caractéristiques géométriques et électromagnétiques du dispositif et d'autre part, un modèle dit "inverse" qui consiste à reconnaître l'une ou l'autre de ces caractéristiques à partir de la réponse du capteur [20].

II-5-1 Les modèles directs :

Il existe une diversité de modèles directs. Ces derniers permettant d'évaluer les courants de Foucault en connaissant les propriétés géométriques et électromagnétiques du système capteur-pièce et de celles d'une éventuelle discontinuité géométrique ou de la présence d'un défaut. Les entrées du modèle direct sont les différentes propriétés géométriques et électromagnétiques du dispositif capteur-pièce ainsi que de la présence d'une discontinuité ou d'un corps de propriétés différentes (rainures, défaut, oxydation, dégradation etc....). Sa sortie se résume au calcul de la réponse (appelée parfois signature) vue par le capteur. Le schéma général des modèles directs est montré sur la figure 29.

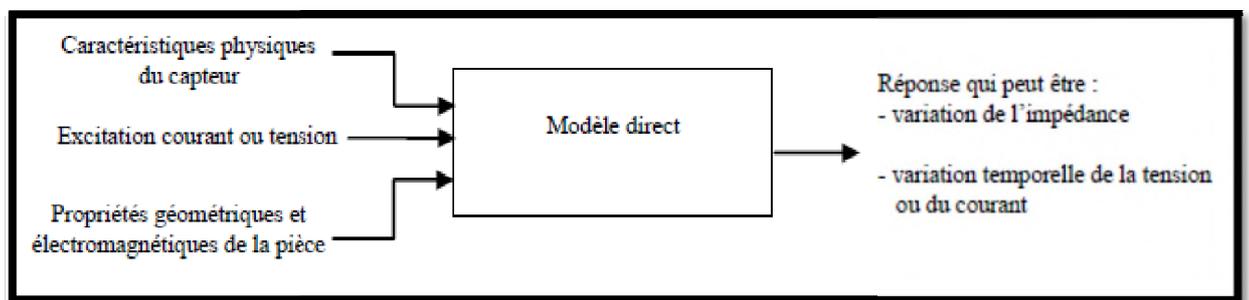


Figure 29 : Schéma général d'un modèle direct.

Ces modèles se distinguent principalement par les caractéristiques géométriques des dispositifs (monodimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel), par les caractéristiques

électromagnétiques des matériaux (modèles linéaire et non linéaire), par les méthodes de modélisation et de résolution adoptées (analytique, semi analytique et numérique).

De ces considérations, on peut distinguer :

- Selon les caractéristiques géométriques :
 - ✓ Modèles tridimensionnels [40].
 - ✓ Modèles bidimensionnels (Modèle cartésien dont l'une des directions est infinie et Modèles cylindriques axisymétriques) [41].
- Selon les méthodes de modélisation et de résolution :
 - ✓ Modèles analytiques [42],
 - ✓ Semi analytiques [43],
 - ✓ Numériques [44]
 - ✓ semi empiriques [47, 151-160].

II-5-2 Méthodes inverses :

La principale entrée du modèle inverse est la réponse mesurée aux bornes du capteur, cependant parmi les caractéristiques géométriques et électromagnétiques certaines sont des entrées. La sortie du modèle dépend de la nature du contrôle à réaliser ; recherche de défaut ou évaluation d'une propriété. La figure 30 montre le schéma d'un modèle inverse basé sur le modèle direct.

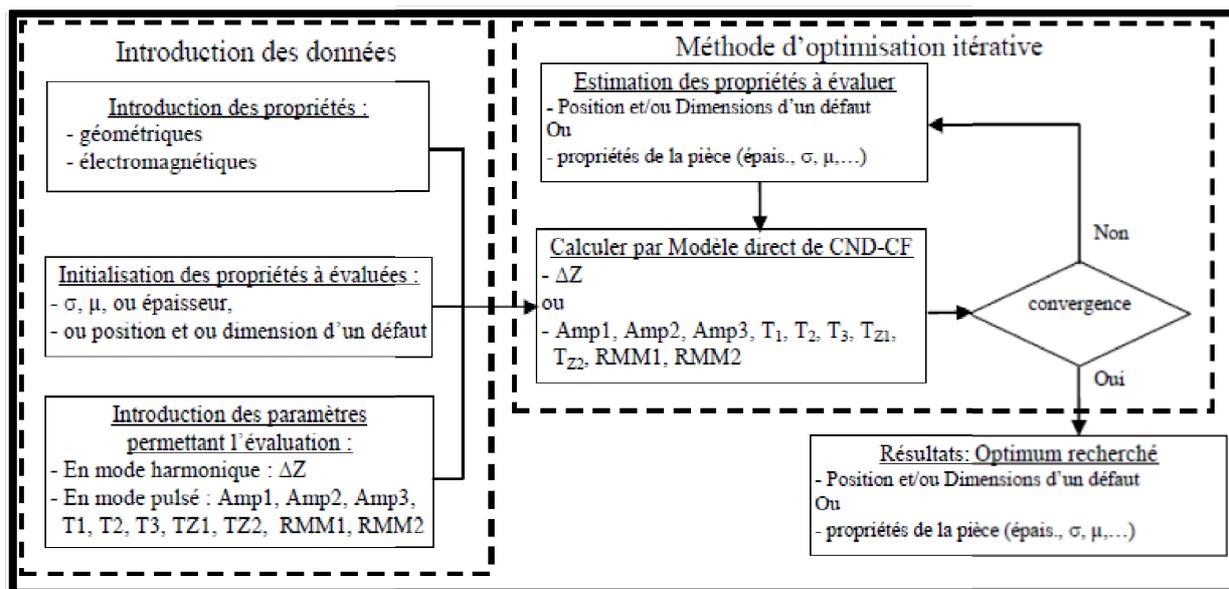


Figure 30 : Schéma général d'un modèle d'inversion de CND-CF.

Pour l'E&CND-CFP, le modèle inverse permet la reconstitution des propriétés recherchées à travers des méthodes itératives associées au modèle direct. Cette reconstitution permet d'estimer les caractéristiques électromagnétiques et géométriques d'un matériau et de celles des défauts éventuels, à partir de la réponse du capteur. Cette dernière est représentée par l'impédance en harmonique ou par l'évolution temporelle de la tension ou de la variation de la tension en mode pulsé [45].

L'opération d'inversion, souvent itérative pour un problème non-linéaire, s'effectue par la minimisation d'une fonction objectif (écarts entre les données mesurées et celles calculées par modélisation directe). Cependant, même si un problème inverse possède un minimum global optimal, rien ne nous garantit que la technique itérative appliquée converge vers cette solution et non pas vers un minimum local. Les principales méthodes de résolution sont les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques [45]. Les premières ont l'avantage de présenter une convergence rapide à proximité d'un minimum, mais sont très sensibles au choix du point de départ et aux minima locaux. Les secondes ne nécessitent pas le calcul de dérivées et sont capables d'éviter certains minima locaux. Cependant, ces dernières requièrent un gros effort de calcul et présentent une convergence lente à proximité d'un minimum, ainsi que le réglage d'un grand nombre de paramètres. Une méthode déterministe semble donc la meilleure approche dans le cas de modèles directes présentant un temps de calcul relativement long [45].

II-6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu l'historique des phénomènes électriques et magnétiques, les différentes équations de Maxwell ou le phénomène des courants de Foucault régi, les lois de comportement des milieux, les équations de diffusion électromagnétique et bibliométrie des modèles d'optimisation qui sera expliqué en chapitre suivant.

Chapitre 3:

La Méthode des Circuits Electriques couplées

III-1 Introduction :

Des modèles basés sur les circuits électriques couplés ont été déjà élaborés d'une part en harmonique pour les applications de chauffage à induction et du CND-CF et d'autre part en transitoire pour le magnétoformage [46, 47].

La MCEC permet d'établir l'expression de la tension ou de l'impédance d'un bobinage (capteur) servant à alimenter, en champ électromagnétique, un matériau conducteur, homogène et isotrope. La modélisation concerne les dispositifs de contrôle et d'évaluation non destructifs par courants de Foucault à capteur à double fonction, absolu ou différentiel [48]. Ces capteurs permettent d'une part, à caractériser le matériau et d'autre part, à détecter dans ce dernier une anomalie (défaut ou rainure). Pour atteindre ces objectifs, l'expression intégrale de la tension (ou de l'impédance) aux bornes du capteur en fonction de la répartition et de l'intensité de la variable d'état électromagnétique induite dans ce matériau a été établit. La formulation du problème en fonction d'une variable d'état définie les méthodes respectives; les circuits électriques couplés (densité de courant électrique), les champs électriques couplés (le champ électrique) et les potentiels magnétiques vecteurs couplés (le potentiel vecteur magnétique). Les modèles des grandeurs électromagnétiques couplées développés sont basés sur l'expression analytique de Biot et Savart du potentiel magnétique vecteur associée à la loi d'induction de Faraday par superposition.

La détection, par le CND-CF en mode harmonique mono fréquence, de défauts ou de discontinuité en surface et en profondeur présente quelques difficultés. Le mode multifréquence est préconisé pour ce genre de problèmes. Mais outre les multiples avantages de ce dernier, la lourdeur des équipements techniques leurs couts ainsi que le temps nécessaires à la réalisation des testes, sont des contraintes et des handicapes. Le mode pulsé répond parfaitement à ces exigences et contraintes et constitue une alternative pour ce genre d'investigations [49]. La MCEC sera adapté en mode transitoire par deux formulations: la formulation de Crank Nicholson ou la reconstitution par séries de Fourier [50]. La solution en mode pulsé de ces systèmes peut se faire aussi grâce à la résolution de l'équation différentielle du circuit équivalent RLC.

III-2 Equations des circuits électriques couplés :

Pour décrire le phénomène des courants de Foucault par la méthode des circuits électriques couplées [51], nous considérons les équations de Maxwell en terme d'un système

de deux équations intégrales **Biot-Savart** et la **loi Maxwell Faraday** et en exprimant le potentiel vecteur magnétique A et la densité de courant J d'une manière couplée.

L'effet d'un point électromagnétique q , en un point p du domaine Ω (Fig.31) s'écrit :

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + gradV(p) \cdot \vec{e}_\theta = 0 \dots \dots (III.1)$$

$$A(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{J(p)d\Omega}{|\vec{op} - \vec{op}|} \dots \dots (III.2)$$

Etant donné que système est à symétrie de révolution, le potentiel magnétique vecteur $A(p)$ et la densité de courant ont alors une seule composante selon l'angle θ (Figure 31). Le courant électrique $I(p)$ d'une spire élémentaire q circule sur le contour (C) de rayon $r(p)$ et de longueur $l(p)$ (Figure 31b). Il est supposé uniforme à travers chaque section d'une spire élémentaire [18-168].

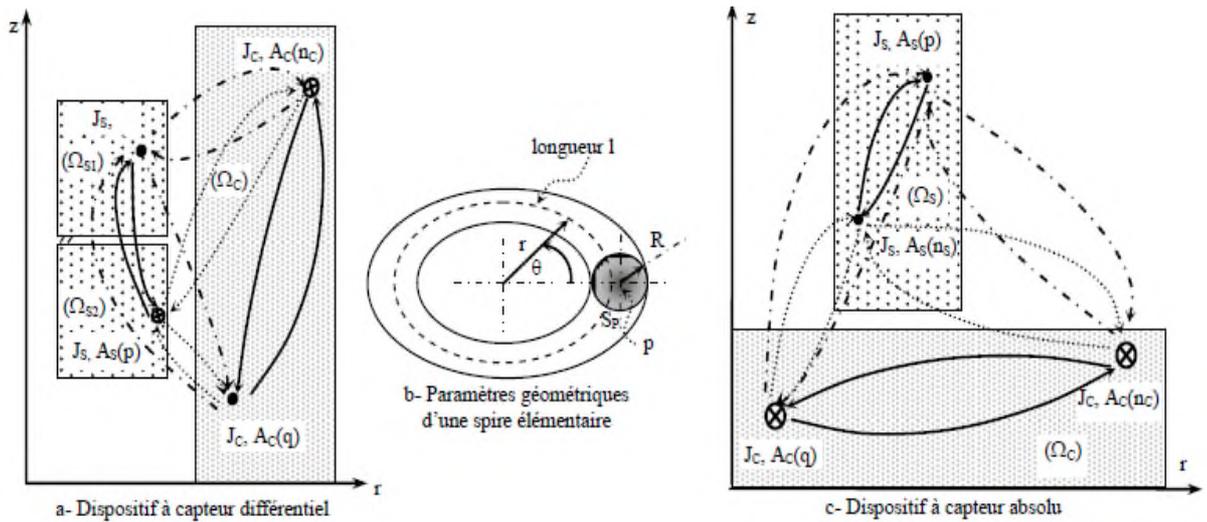


Figure 31 : Représentation des grandeurs électromagnétiques couplées.

Le potentiel vecteur magnétique $A(p)$ créé au point p par la spire élémentaire q du domaine Ω s'écrit :

$$A(p) = \frac{\mu_0}{2\pi} G(p.q)I(q) \dots \dots (III.3)$$

Où : $G(p, q)$ est donnée comme suit :

$$G(p, q) = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} E[K(p, q)] \dots (a) \dots \dots (III. 4)$$

$$E[K(p, q)] = \frac{(2 - K^2)E_1(K) - 2E_2(K)}{K} \dots (b) \dots \dots (III. 5)$$

$$K(p, q) = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{[r(p) + r(q)]^2 + [z(p) - z(q)]^2}} \dots (c) \dots \dots (III. 6)$$

$$\overrightarrow{\text{grad}V} \cdot \vec{e}_\theta = -\frac{\mu(p)}{2\pi r(p)} \dots \dots (III. 7)$$

$E_1(k), E_2(k)$ sont respectivement les fonctions elliptiques de Legendre de 1ère et de 2ème espèce.

En remplaçant l'expression de $A(p)$ et de $\text{grad}(v(p))$ et en intégrant sur tous le domaine Ω on obtient l'équation électromagnétique liant les densités de courant $J(p)$ et la tension $u(p)$ appliquée au point p.

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)} J(p) + u_0 r(p) \iint_{\Omega} G(p, q) \frac{dJ(q)}{dt} d\Omega = u(p) \dots \dots (III. 8)$$

C'est l'équation généralisée de la méthode des circuits électriques couplés (MCEC) qui décrit un matériau conducteur excité par une source de tension externe. Elle exprime la densité de courants de Foucault $J(p)$ créée par la variation temporelle du potentiel vecteur magnétique $A(q)$.

III-2-1 Discrétisation spatiale :

La géométrie des domaines conducteurs est subdivisée en éléments circulaires de sections rectangulaires. Le capteur (la source) est subdivisé en N_S éléments de section S_s et la charge en N_C éléments de section S_c . La tension U_S appliquée au capteur est la somme de toutes les tensions des spires élémentaires $u(p)$.

$$U_s = \sum_{p=1}^{N_s} u(p)$$

Les densités de courant électrique dans le capteur (J_s) et dans la pièce (J_c) sont données comme suit :

$$J_s = I_s/S_s \dots \dots (III. 9)$$

$$J_c = I_c/S_c \dots \dots (III. 10)$$

I_s et I_c sont les courants électriques dans le capteur et dans la pièce.

S_s et S_c sont les sections du capteur et de la pièce.

En remplaçant les densités de courant par les courants électriques (équation cc) dans l'équation généralisé (équation bb), sa discrétisation donne :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)S(p)} I_s(p) + \mu_0 r(p) \sum_{q=1}^{N_s} G(p, q) \frac{dI_s(q)}{dt} + \mu_0 r(p) \sum_{q=1}^{N_c} G(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} = u(p). (III. 11)$$

La tension U_s appliquée au capteur est la somme de toutes les tensions élémentaires $u(p)$.

$$U_s = \sum_{p=1}^{N_s} u(p) \dots \dots (III. 12)$$

Le courant est le même dans chaque bobine élémentaire du capteur.

$$I_s(1) = I_s(2) = \dots = I_s(N_s) = I_s \dots \dots (III. 13)$$

En tenant compte des grandeurs U_s et I_s , l'application de l'équation (III.13) au capteur et aux spires élémentaires de la pièce qui sont en court-circuit ($u(p) = 0$), donne un système de $(N_c + 1)$ équations [26, 27].

$$I_s \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r(p)}{\sigma_s S_s} + \mu_0 \frac{dI_s}{dt} \sum_{p=1}^{N_s} r(p) \left(\sum_{q=1}^{N_s} G(p, q) \right) + \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r(p) \left(\sum_{q=1}^{N_c} r(p) \left(\sum_{q=1}^{N_c} G(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} \right) \right) = U_s. (III. 14)$$

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma_s S_c} I_c(p) + \mu_0 r(p) \frac{dI_s}{dt} \sum_{q=1}^{N_s} G(p, q) + \mu_0 r(p) \sum_{q=1}^{N_c} G(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} = 0 \text{ for } p = 1, N_c \dots (III. 15)$$

III-2-2 Forme matricielle de la MCEC :

Le système d'équations (dd) peut être écrit sous forme matricielle comme suit [52]:

$$R_s \cdot I_s + L_{ss} \frac{dI_s}{dt} + \{I_{ds}\}^T [M_{sc}] \left\{ \frac{dI_c}{dt} \right\} = U_s \dots \dots (III. 16)$$

$$[R_c] \{I_c\} + [L_{cc}] \left\{ \frac{dI_c}{dt} \right\} + [M_{cs}] \{I_{ds}\} \frac{dI_s}{dt} = 0 \dots \dots (III. 17)$$

Le courant électrique dans les spires élémentaires étant le même

$$\left\{ \frac{\partial I_s}{\partial t} \right\} = \{I_{ds}\} \frac{\partial I_s}{\partial t} \quad \{I_s\} = \{I_{ds}\} i_s; \dots \dots (III. 18)$$

Avec :

$\{I_{ds}\}$: vecteur colonne unité de dimension (Ns*1);

$\{I_s\}$: vecteur courant de la pièce de dimension (Nc*1);

dI_s/dt ; $\{dI_c/dt\}$: dérivées temporelles du courant électrique du capteur I_s et du vecteur des courants des spires élémentaires de la charge de dimension (Nc*1).

R_s , $[R_c]$: résistance totale du capteur et matrice diagonale des résistances des bobines élémentaires de la pièce de dimension (Nc*1).

$$R_s = \{I_{ds}\} \{R_{ss}\}^T = \sum_{p=1}^{n_s} R_{ss}(p) \dots \dots (III. 19)$$

$$R_{ss}(p) = \frac{2\pi r(p)}{\sigma_s S_s} \dots \dots (III. 20)$$

$$R_c(p, p) = \frac{2\pi r(p)}{\sigma_c S_c} p = 1, Nc \dots \dots (III. 21)$$

L_{ss} , $[L_{cc}]$: inductance du capteur et matrice inductance des bobines élémentaires de la pièce.

$$L_S = \{I_{ds}\}[L_{SS}] = \mathcal{U}_0 \sum_{p=1}^{N_s} r(p) \left(\sum_{q=1}^{N_s} G(p, q) \right) \dots \dots (III. 22)$$

[Msc], [Mcs] : matrice des inductances mutuelles entre les spires élémentaires du capteur et de la pièce de dimensions respective (Ns*Nc) et (Nc*Ns).

III-3 MCEC en mode harmonique :

Dans le cas d'une excitation harmonique (sinusoïdale) l'opérateur $\partial/\partial t$ est remplacé par $j\omega$ et le système d'équations (III-16 et 17) peut s'appliquer aux différents dispositifs de CND-CF, nous limiterons le développement de notre modèle aux cas d'un dispositif à capteur absolu de type pancake et d'un dispositif à capteur différentiel de type cylindrique [47].

III-3-1 Cas d'un dispositif à capteur absolu :

Un dispositif à capteur absolu est composé d'un seul enroulement qui joue le rôle d'émetteur et de récepteur en même temps. En remplaçant l'opérateur $\partial/\partial t$ par $j\omega$ dans le système d'équations (III.16 et 17), on obtient [47] :

$$(R_s + j\omega L_{SS})I_s + j\omega\{I_{ds}\}^t [Msc]\{I_c\} = U_s \dots \dots (III. 23)$$

$$([Rc] + j\omega[L_{cc}]) \{I_c\} + j\omega([M_{cs}]\{I_{ds}\})I_s = 0 \dots \dots (III. 24)$$

Les grandeurs du modèle harmonique représenté par les équations juste avant sont des valeurs complexes (partie réelle et partie imaginaire), il permet de déterminer les courants électriques circulant dans les spires élémentaires de la pièces $\{I_c\}$ ainsi la tension U_s aux bornes du capteur dans le cas d'une excitation en courant ou bien le courant I_s à travers le capteur dans le cas d'une excitation en tension. La grandeur permettant l'ECND-CF en mode harmonique est l'impédance (ou bien la variation d'impédance).

III-3-2 Cas d'un dispositif à capteur différentiel :

Dans le cas d'un dispositif axisymétrique à capteur différentiel, les enroulements ($S1$ et $S2$) du capteur sont alimentés par un même courant électrique I_s . Les enroulements de la deuxième bobine sont montés de telle sorte que le courant électrique qui y circule est de même grandeur que celui du premier mais circule dans un sens opposé [53].

$$I_{s1} = -I_{s2} = I_s$$

Ainsi le champ magnétique que le deuxième enroulement génère sera en opposition par rapport à celui généré par la première bobine. La résultante de ce champ magnétique généré par les deux bobines sera nulle dans le cas où ces deux bobines sont en face de parties la pièce présentant les mêmes propriétés physiques et géométriques. La tension aux bornes du capteur sera alors nulle. Dans le cas de la présence d'un défaut ou d'une rainure en face d'un enroulement et pas devant l'autre, le champ magnétique sera alors déséquilibré et le capteur détectera cette différence à travers la variation de la tension à ces bornes.

En prenant en compte les deux enroulements $S1$ et $S2$ du capteur et remplaçant l'opérateur $\partial/\partial t$ par $j\omega$ dans le système d'équations (III-4), on obtient :

$$(R_{s1} + j\omega L_{ss1}) - (R_{s2} + j\omega L_{ss2})I_{s1} + j\omega([Id_{s1}][M_{s1c}] + [Id_{s2}][M_{s2c}])[Ic] = U_s \dots \dots (III. 25)$$

$$([Rc] + j\omega[L_{cc}]) [Ic] + j\omega([M_{cs1}][Id_{s1}] - [M_{cs2}][Id_{s2}])I_s = 0 \dots \dots (III. 26)$$

Les courants dans les spires élémentaires des enroulements $S1$ et $S2$ étant les mêmes, on peut écrire :

$$\{I_{s1}\} = \{Id_{s1}\}_{Ns1*1}I_s; \{I_{s2}\} = \{Id_{s2}\}_{Ns2*1}I_s \dots \dots (III. 27)$$

R_{s1}, R_{s2} : Résistance de l'enroulement $S1$ et de l'enroulement $S2$ du capteur

L_{s1}, L_{s2} : Inductances propres de l'enroulement $S1$ et de l'enroulement $S2$ du capteur

I_{s1}, I_{s2} : Courant électrique des spires élémentaires $S1$ et $S2$,

$[Id1], [Id2]$: matrice identité de dimensions $(Ns1 \times Ns1)$ et $(Ns2 \times Ns2)$

$[Ms1c]$, $[Ms2c]$: matrice des mutuelles inductances entre Les spires élémentaires des enroulements $S1$ et $S2$ et celles de la charge,

$[Mcs1]$, $[Mcs2]$: matrice des mutuelles inductances entre Les spires élémentaires de la charge et celles des enroulements $S1$ et $S2$,

Le modèle harmonique d'un dispositif axisymétrique à capteur différentiel représenté par le système d'équations (III-5) permet de déterminer les courants électriques circulant dans les spires élémentaires de la pièce $\{Ic\}$ et la tension Us ou bien le courant Is à travers le capteur respectivement dans le cas d'une excitation courant ou tension. Ainsi l'impédance ΔZ calculée à partir du courant Is et de la tension Us aux bornes du capteur symbolise la présence d'un défaut, d'une rainure ou bien de la variation des propriétés de la pièce. La grandeur permettant l'ECND-CF est l'impédance (ou bien la variation d'impédance ΔZ).

III-4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a exprimé le potentiel vecteur magnétique A et la densité de courant J d'une manière couplée et la discrétisation spatiale, la forme matricielle de la méthode des circuits électriques couplés et expliqué les dispositifs à capteur absolu ou différentiel.

Chapitre 4 :

Méthodes d'optimisations

IV-1 Introduction :

Nombreuses sont les méthodes d'optimisation. On peut cependant les classer en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Dans la première classe, on rencontre toutes les méthodes qui cherchent le minimum d'une fonction en se basant sur la connaissance d'une direction de recherche, souvent donnée par le gradient de cette fonction. Dans le cas d'optima multiple, elles s'arrêtent sur le premier rencontré.

Les méthodes stochastiques sont une alternative pour palier cet inconvénient. Les trois méthodes stochastiques les plus répandues sont les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la recherche taboue. Elles sont capables de trouver le minimum globale d'une fonction même dans des cas très difficiles, mais le temps de calcul peut être élevé. Ceci est particulièrement pénalisant lorsque le calcul de la performance de chaque nouvelle solution proposée par le processus aléatoire nécessite la résolution d'un modèle éléments finis [22].

Les algorithmes génétiques imitent l'évolution naturelle et le processus de sélection. En employant des opérations de base : sélection, croisement et mutation. Ils sont capables de trouver le minimum globale ou au moins une solution proche.

La méthode du Simplex est très populaire c'est une méthode de recherche locale des problèmes d'optimisation non linéaire sans contraintes. Le procédé Simplex est basé sur le déplacement et le redimensionnement d'un polygone multidimensionnel (Simplex) le long d'une direction en descendant jusqu'à ce qu'un minimum local soit rencontré [20].

IV-2 Optimisation :

Selon le sens mathématique du terme, l'optimisation d'une fonction $f(s)$ où $s \in S$ et S est l'ensemble de solutions.

Pour un problème de minimisation, on cherche à trouver une solution s_0 tel que $f(s_0)$ est toujours inférieure à $f(s)$;

Pour un problème de maximisation on cherche à trouver une solution s_0 tel que $f(s_0)$ est toujours supérieure à $f(s)$.

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. En utilise diverses méthodes d'optimisation, à noter que tout problème de maximisation peut se mettre sous la forme d'un problème de minimisation et inversement [22]

Les différents algorithmes permettant de résoudre ce problème sont dites : algorithmes d'optimisation et sont majoritairement basés sur le simple principe Essais / Erreur ; suite à chaque résultat obtenue, le "décideur" corrige ses actions afin d'atteindre la solution optimale.

Le décideur crée la différence entre ces différentes variantes d'optimisation pour un algorithme de gradient, on parle du "pas de déplacement".

IV-3 Classification des méthodes d'optimisation :

Les méthodes d'optimisations sont classées, selon le mode de recherche de l'optimum, en deux grands groupes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

IV-3-1 Méthodes déterministes :

Ces méthodes peuvent être subdivisées en plusieurs sous classes, les méthodes heuristiques, les méthodes statistiques, les méthodes de branche et bound, les méthodes mathématiques, et les méthodes d'apprentissage automatique. Cette classification est illustrée en figure 32.

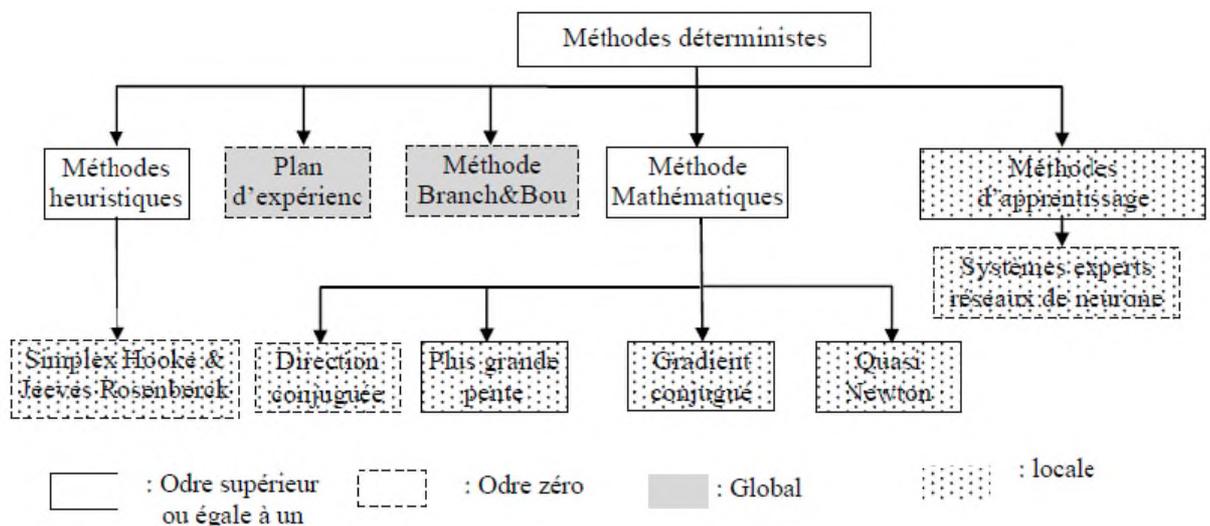


Figure 32 : Méthodes d'optimisation déterministes.

Les méthodes déterministes :

- Méthodes heuristique ou méthodes géométriques.
- Plan d'expérience.

- Les méthodes branche et bound.
- Méthodes mathématiques.
 - Direction conjuguée.
 - Gradient conjuguée.
 - Plus grande pente.
 - Quasi Newton.
- Méthodes d'apprentissages.
 - Système experts réseaux neurone.

IV-3-2 Méthodes stochastique :

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoire. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation.

Ces méthodes (figure33) ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectifs pour atteindre la solution optimal. Elles sont d'ordre zéro. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluation de la fonction objectifs.

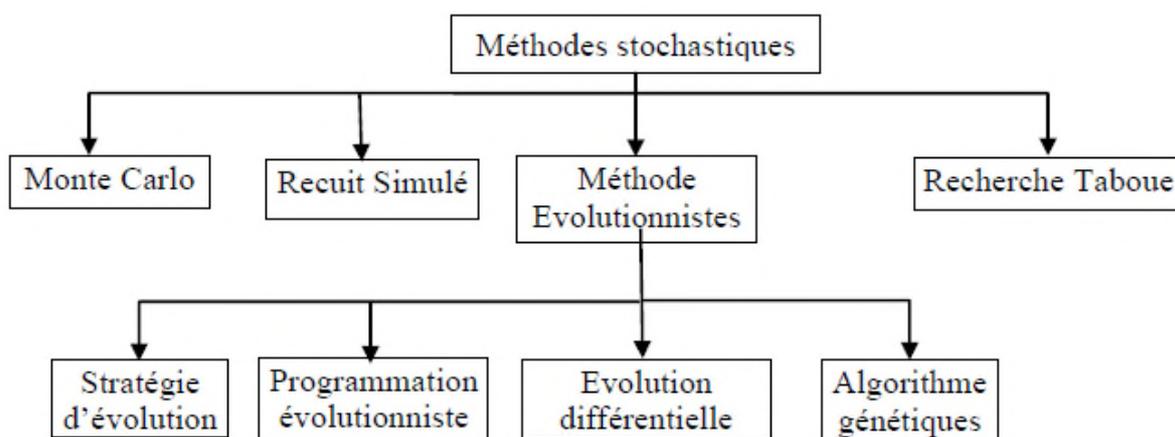


Figure 33 : Méthodes d'optimisation stochastiques.

Les méthodes stochastiques :

- Monte-Carlo.
- Méthode de Recuit Simulé.
- Méthode de recherche tabou.

- Méthodes évolutionnistes.

IV-3-2-1 Méthodes évolutionnistes :

Les méthodes évolutionnistes font partie de la dernière grande classe de méthodes stochastiques. Elles reposent sur une analogie avec la théorie de l'évolution naturelle des espèces de Darwin selon laquelle, les individus les mieux adaptés à leur environnement survivent et peuvent se reproduire pour donner des enfants encore mieux adaptés de génération à génération [55].

Les méthodes évolutionnistes connus sont : la stratégie d'évolution, les programmations évolutionniste, évolution différentielle et les algorithmes génétiques.

Contrairement aux techniques d'optimisation qui explorent l'espace à partir d'un point unique, les méthodes évolutionnistes partent d'un ensemble de configuration, c'est-à-dire d'une population d'individus, et la font évaluer à partir d'opération à transition aléatoire, la sélection et l'évolution, selon le principe de la figure 34.

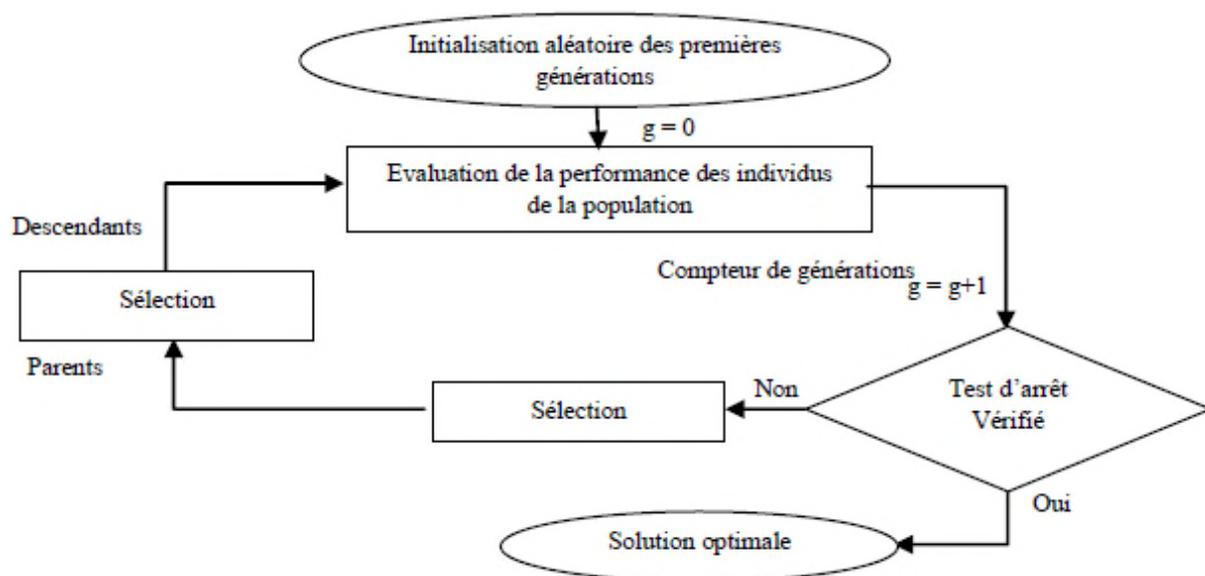


Figure 34 : Principe de l'algorithme évolutionniste.

Les algorithmes évolutionniste remontent à l'introduction des algorithmes génétiques (AG) par Holland. Reshenberg et schwefel ont mis au point trios méthodes similaires : les stratégies d'évolutionnistes, la programmation évolutionniste et la programmation génétique. Les AG utilisent un codage des paramètres de la fonction à optimiser alors que les autres techniques se servent directement de la valeur des paramètres [55]

Parmi les algorithmes évolutionnistes cités précédemment, les algorithmes génétiques occupent une place particulière car ils réunissent les trois opérateurs de sélection, croisement, et mutation.

IV-4 Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation :

La méthode d'optimisation est conditionnée par des paramètres de contrôle et des conditions initiales (valeur initiale des variables, valeur initiale des paramètres de contrôle...). Elle peut être caractérisée selon le modèle de la boîte noire illustré en figure 35, [54].

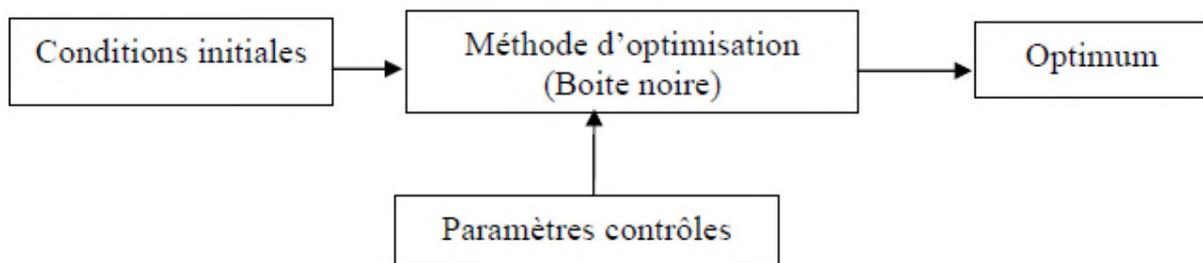


Figure 35 : modèle de la boîte noire.

L'efficacité d'une méthode d'optimisation est liée à la sensibilité et à la robustesse par rapport aux paramètres de contrôle et à la condition initiale. Lorsque les variables doivent prendre une valeur bien précise pour que la méthode de résolution converge vers l'optimum d'une fonction donnée, la méthode est dite sensible aux conditions initiales.

Une méthode d'optimisation est robuste si pour une même valeur des paramètres de contrôle et des conditions initiales, elle est capable de trouver l'optimum de fonctions très différentes.

Une méthode parfaite devrait être totalement insensible aux conditions initiales et aux variables de contrôle et converger vers l'optimum quelles que soient la fonction objective et les contraintes [55].

IV-5 Opérateurs de recherche fondamentaux :

La recherche de l'optimum d'une fonction est généralement réalisée à l'aide de deux opérateurs fondamentaux : l'exploration et l'exploitation.

L'exploration permet une localisation imprécise de l'optimum globale alors que l'exploitation affine cette solution en augmentant la précision de l'optimum.

La succès et efficacité d'une techniques de résolution dépendent la plupart du temps d'un compromis entre l'exploration. Certaines méthodes toutefois n'utilisent qu'un seul de ces opérateurs pour parvenir à l'optimum. Ainsi, les méthodes déterministes, exploitant les dérivées de la fonction objective et des contraintes pour atteindre rapidement et précisément le minimum local le plus proche du point de départ, privilégient l'exploitation au détriment de l'exploration.

Tout algorithme d'optimisation doit utiliser ces stratégies pour trouver l'optimum global : l'exploration pour la recherche de régions inexplorées de l'espace de recherche, et des points meilleurs. Ces deux exigences peuvent paraître contradictoires mais un bon algorithme de recherche doit trouver le bon compromis entre les deux. Une recherche purement aléatoire est bonne pour l'exploration mais pas pour l'exploitation alors que la recherche dans le voisinage est une bonne méthode d'exploitation mais pas d'exploration[54].

IV-6 Algorithmes génétiques :

IV-6-1 Introduction :

Dans les années 1960, John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (*the canonical genetic algorithm AGC*) dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). Ce modèle servira de base aux recherches ultérieures et sera plus particulièrement repris par Goldberg qui publiera en 1989, un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques, et ajouta à la théorie des algorithmes génétiques les idées suivantes :

- ✓ un individu est lié à un environnement par son code d'ADN.
- ✓ une solution est liée à un problème par son indice de qualité.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation. Les AG tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin. Dans un environnement, « *les individus* » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps

pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (*the survival of the fittest*).

Par analogie avec l'évolution naturelle, les AG font évoluer un ensemble de solutions candidates, appelé une « population d'individus ». Un « individu » n'est autre qu'une solution possible du problème à résoudre. Chaque individu de cette population se voit attribuer une fonction appelée fonction d'adaptation (*fitness*) qui permet de mesurer sa qualité ou son poids; cette fonction d'adaptation peut représenter la fonction objectif à optimiser. Ensuite, les meilleurs individus de cette population sont sélectionnés, subissent des croisements et des mutations et une nouvelle population de solutions est produite pour la génération suivante [57].

Ce processus se poursuit, génération après génération, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint, comme par exemple le nombre maximal de générations.

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories (Coello Coello *et al.* 2002) : énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation [56] :

- ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes;
- ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions);
- ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire;
- ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

IV-6-2 Présentation des algorithmes génétiques (AG) :

Selon Lerman et Ngouenet, (1995) un algorithme génétique est défini par :

- *Individu/chromosome (figurer36)/séquence* : une solution potentielle du problème ;
- *Population (figurer37)* : un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche,
- *Environnement* : l'espace de recherche ;
- *Fonction de fitness* : la fonction - positive - que nous cherchons à maximiser.

Nous appelons une séquence (chromosome, individu) A de longueur $l(A)$ une suite $A=\{a_1;a_2;\dots ; a_l\}$ avec $\forall i \in [1..l], a_i \in V = \{0..1\}$ [57]

Un chromosome est donc une suite de bits en codage binaire, appelé aussi chaîne binaire. Dans le cas d'un codage non binaire, tel que le codage réel, la suite A ne contient qu'un point, nous avons $A = \{a\}$ avec $a \in \mathfrak{R}$.

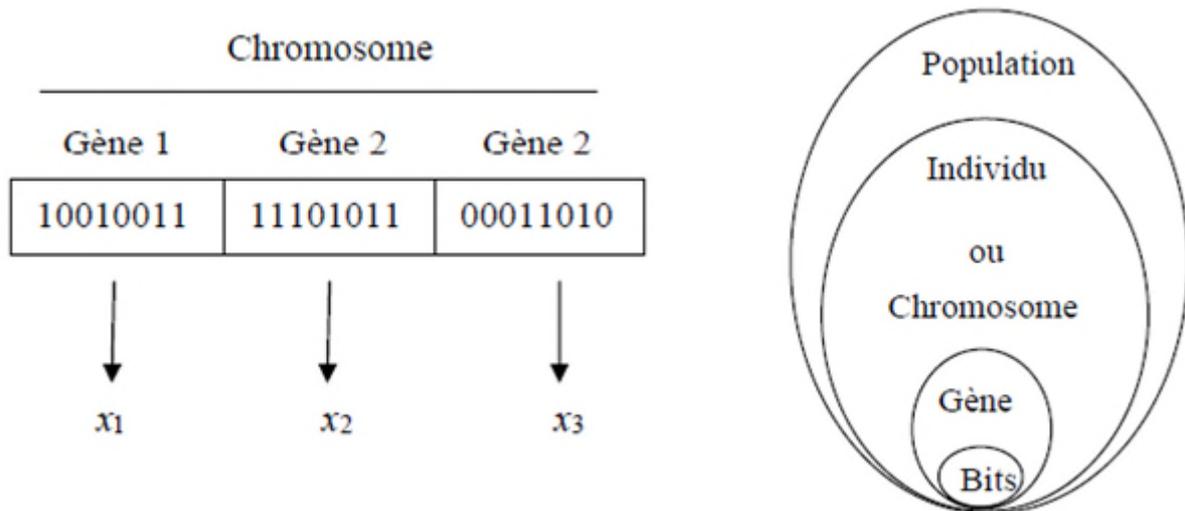


Figure 36 : Illustrations du codage des variables d'optimisation.

Figure 37 : Les quatre niveaux d'organisation des AG.

IV-6-3 Description détaillée :

IV-6-3 Codage des données :

Le premier pas dans l'implémentation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome ou génotype. Une population est donc un ensemble de chromosomes. Chaque chromosome code un point de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome [58].

IV-6-3-1 Codage binaire :

Ce type de codage est certainement le plus utilisé car il présente plusieurs avantages. Son principe est de coder la solution selon une chaîne de bits (qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1). Les raisons pour lesquelles ce type de codage est le plus utilisé sont tout d'abord historiques. En effet, lors des premiers travaux de Holland, les théories ont été élaborées en se basant sur ce type de codage. Et même si la plupart de ces théories peuvent être étendues à des

données autres que des chaînes de bits, elles n'ont pas été autant étudiées dans ces contextes. Cependant, l'avantage de ce type de codage sur ses concurrents a tendance à être remis en question par les chercheurs actuels qui estiment que les démonstrations d'Holland sur les avantages supposés de ce codage ne sont pas révélatrices.

La démonstration d'Holland (en 1975) pour prouver la supériorité de ce type de codage est la suivante. Il compara deux types de codage pour le même problème. Le premier était composé de peu de types d'allèles mais avec des chromosomes d'une longueur importante (des chaînes de 100 bits par exemple), l'autre était composé de chaînes plus courtes mais contenant plus d'allèles (en sachant que tout autre codage, pour le même chromosome, aboutira à une chaîne plus courte). Il prouva que le codage sous forme de bits était plus efficace de manière assez simple. En effet, les chaînes de 100 bits permettent d'avoir plus de possibilités d'enjambement. Entre deux chromosomes du premier type, l'enjambement peut avoir lieu à 100 endroits différents contre 30 pour ceux du second type. Le brassage génétique sur lequel repose l'efficacité des algorithmes génétiques sera donc plus important dans le premier cas.

IV-6-3-2 Codage sous forme d'arbre :

Ce codage utilise une structure arborescente avec une racine de laquelle peuvent être issus un ou plusieurs fils. Un de leurs avantages est qu'ils peuvent être utilisés dans le cas de problèmes où les solutions n'ont pas une taille finie. En principe, des arbres de taille quelconque peuvent être formés par le biais d'enjambements et de mutations.

Le problème de ce type de codage est que les arbres résultants sont souvent difficiles à analyser et que l'on peut se retrouver avec des arbres « solutions » dont la taille sera importante alors qu'il existe des solutions plus simples et plus structurées à côté desquelles sera passé l'algorithme. De plus, les performances de ce type de codage par rapport à des codages en chaînes n'ont pas encore été comparées ou très peu. En effet, ce type d'expérience ne fait que commencer et les informations sont trop faibles pour se prononcer.

Finalement, le choix du type de codage ne peut pas être effectué de manière sûre dans l'état actuel des connaissances. Selon les chercheurs dans ce domaine, la méthode actuelle à appliquer dans le choix du codage consiste à choisir celui qui semble le plus naturel en fonction du problème à traiter et développer ensuite l'algorithme de traitement [59].

IV-6-4 Les opérateurs :

Les opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la possible réussite d'un AG. Nous en dénombrons trois principaux : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d'expliquer l'importance isolée de chacun de ces opérateurs dans la réussite de l'AG. Cela tient pour partie au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propres (valeur sélective des individus, probabilité d'activation de l'opérateur, etc.).

IV-6-4-1 Opérateur de Sélection :

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population. Il existe plusieurs méthodes pour la reproduction. La méthode la plus connue et utilisée est sans nul doute, la roue de loterie biaisée (*roulette Wheel*) de Goldberg (1989). Selon cette méthode, chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa valeur d'adaptation. On effectue, en quelque sorte, autant de tirages avec remise qu'il y a d'éléments dans la population. Ainsi, dans le cas d'un codage binaire, la fitness d'un chromosome particulier étant $f(d(ci))$, la probabilité avec laquelle il sera réintroduit dans la nouvelle population de taille N est :

$$\frac{f(d(ci))}{\sum_{j=1}^N f(d(ci))}$$

Les individus ayant une grande fitness ont donc plus de chance d'être sélectionnés. On parle alors de sélection proportionnelle.

L'inconvénient majeur de cette méthode repose sur le fait qu'un individu n'étant pas le meilleur peut tout de même dominer la sélection. Elle peut aussi engendrer une perte de diversité par la domination d'un super individu. Un autre inconvénient est sa faible performance vers la fin quand l'ensemble des individus se ressemblent.

Une solution à ce problème ne tient pas dans l'utilisation d'une autre méthode de sélection mais dans l'utilisation d'une fonction de fitness modifiée. Ainsi, nous pouvons utiliser un changement d'échelle (*scaling*) afin de diminuer ou accroître de manière artificielle l'écart relatif entre les fitness des individus.

Brièvement, il existe d'autres méthodes, la plus connue étant celle du tournoi (*tournament selection*) : on tire deux individus aléatoirement dans la population et on reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On refait cette procédure jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète. Cette méthode donne de bons résultats. Toutefois, aussi important que soit la phase de sélection, elle ne crée pas de nouveaux individus dans la population. Ceci est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation.

IV-6-4-2 Opérateur de Croisement :

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction. Puis un (potentiellement plusieurs) site de croisement est tiré aléatoirement (chiffre entre 1 et $l - 1$). Enfin, selon une probabilité pc que le croisement s'effectue, les segments finaux (dans le cas d'un seul site de croisement) des deux parents sont alors échangés autour de ce site (voir figure 38).

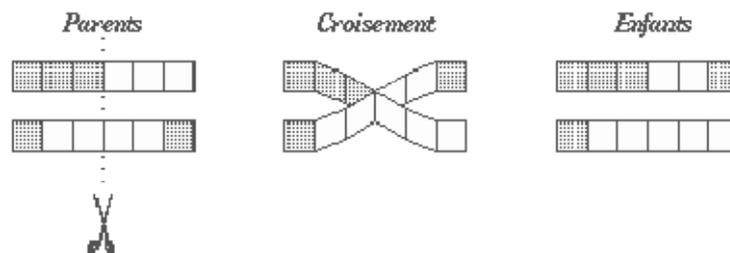


Figure 38 : Le croisement en codage binaire.

Cet opérateur permet la création de deux nouveaux individus. Toutefois, un individu sélectionné lors de la reproduction ne subit pas nécessairement l'action d'un croisement. Ce dernier ne s'effectue qu'avec une certaine probabilité. Plus cette probabilité est élevée et plus la population subira de changement.

Quoi qu'il en soit, il se peut que l'action conjointe de la reproduction et du croisement soit insuffisante pour assurer la réussite de l'AG. Ainsi, dans le cas du codage binaire, certaines informations (i.e. caractères de l'alphabet) peuvent disparaître de la population. Ainsi aucun individu de la population initiale ne contient de 1 en dernière position de la

chaîne, et que ce 1 fasse partie de la chaîne optimale à trouver, tous les croisements possibles ne permettront pas de faire apparaître ce 1 initialement inconnue. En codage réel, une telle situation peut arriver si utilisant un opérateur simple de croisement, il se trouvait qu'initialement toute la population soit comprise entre 0 et 40 et que la valeur optimale était de 50. Toutes les combinaisons convexes possibles de chiffres appartenant à l'intervalle $[0;40]$ ne permettront jamais d'aboutir à un chiffre de 50. C'est pour remédier entre autre à ce problème que l'opérateur de mutation est utilisé.

IV-6-4-3 Opérateur de Mutation :

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu. Dans le cas du codage binaire, chaque bit $a_i \in \{0,1\}$ est remplacé selon une probabilité pm par son inverse $a'_i = 1 - a_i$. C'est ce qu'illustre la figure. Tout comme plusieurs lieux de croisement peuvent être possibles, nous pouvons très bien admettre qu'une même chaîne puisse subir plusieurs mutations.

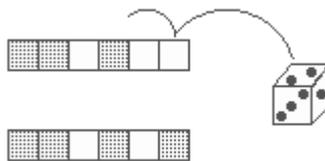


Figure 39 : La mutation en codage binaire.

La mutation est traditionnellement considérée comme un opérateur marginal bien qu'elle confère en quelque sorte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité (i.e. tous les points de l'espace de recherche peuvent être atteints). Cet opérateur est donc d'une grande importance. Il a de fait un double rôle : celui d'effectuer une recherche locale et/ou de sortir d'une trappe (recherche éloignée) [60].

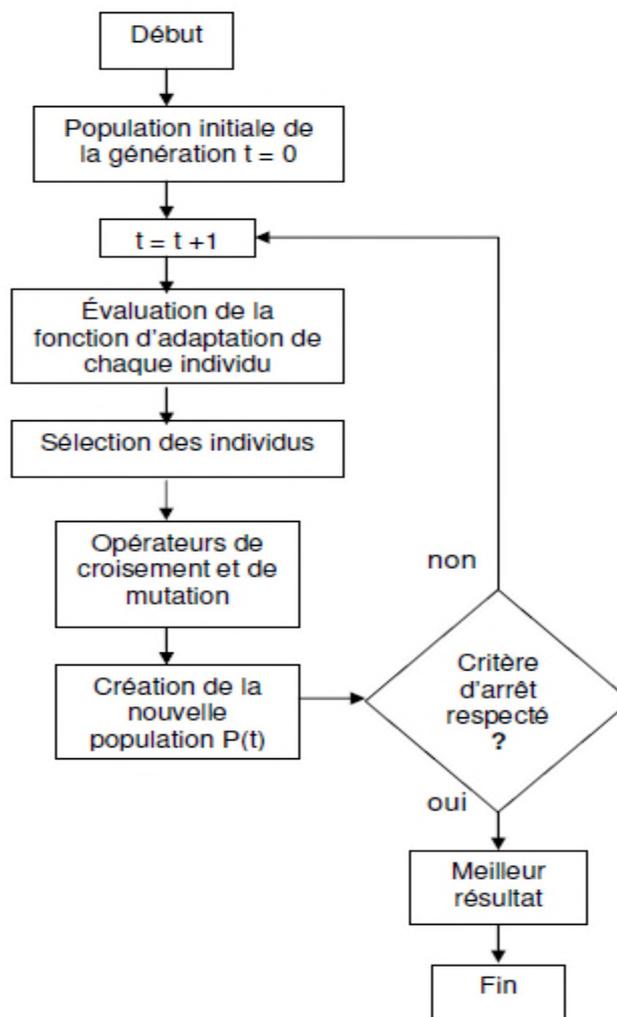
IV-6-4-4 Organigramme d'un algorithme génétique :

Figure 40 : Organigramme d'un algorithme génétique.

IV-6-5 Méthodes du simplexe :**IV-6-5-1 Introduction :**

C'est une méthode d'optimisation locale qui est fréquemment utilisée. Cette méthode déterministe est dite "directe" : elle tente de résoudre le problème en utilisant la valeur de la fonction objectif, sans faire appel à ses dérivées. Cette méthode est surtout appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation, sa faible consommation de mémoire (peu de variables) et son faible temps de calcul. Son algorithme est robuste car il est très tolérant aux bruits sur les valeurs de la fonction objective. En conséquence, cette fonction n'a pas besoin d'être calculée exactement, et il est possible d'avoir recours à une approximation de sa valeur.

Contrairement aux autres méthodes qui démarrent d'un point initial, la méthode simplexe de Nelder-Mead utilise un "simplexe" de départ. Cette méthode est basée sur la

comparaison des valeurs de la fonction dans les $(n+1)$ sommets d'un simplexe général. Le simplexe se modifie à travers de très simples opérations algébriques, qui se traduisent par des transformations géométriques élémentaires (réflexion, expansion, contraction et multi-contraction appelée aussi rétrécissement). En changeant le sommet avec la plus grande valeur de la fonction coût par un autre point de valeur plus petite (Nelder & Mead, 1965).

IV-6-5-2 Processus de résolution par la méthode du simplexe de Nelder et Mead :

Soit une fonction $f : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$. Un simplexe est un ensemble de $n + 1$ points.

Étape 0 : Initialisation.

On pose $k = 0$. On construit un simplexe initial. On évalue la valeur de la fonction f en chaque point du simplexe.

Étape 1 : Réflexion. [22]

On cherche $x_{max}^k = \operatorname{argmax} f(x^k)$ puis on calcule le barycentre \bar{x}^k des n points restants. On évalue ensuite la position x_{ref}^k du point réfléchi de x_{max}^k par rapport à \bar{x}^k de la manière suivante :

Le point x_{ref}^k remplace donc le point x_{max}^k pour former un nouveau simplexe. Souvent on désire que le point réfléchi x_{ref}^k soit le symétrique du point x_{max}^k par rapport au barycentre \bar{x}^k et on prend alors $\alpha = 1$.

Étape 2 : Expansion.

Si $f(x_{ref}^k) \leq f(x_i^k)$, $\forall i$, c'est à dire si l'étape de réflexion donne un point correspondant à une valeur de la fonction inférieure aux valeurs des autres point du simplexe, on essaye d'aller plus loin dans cette direction.

On expand alors le sommet x_{exp}^k par la relation suivante :

$$x_{exp}^k = \gamma x_{ref}^k + (1 - \gamma) \bar{x}^k$$

Ou γ est laissé au choix de l'utilisateur et varie généralement entre 1 et 2 suivant la convexité de la fonction f

Si $f(x_{exp}^k) < f(x_{ref}^k)$ on remplace le point x_{ref}^k par le point x_{exp}^k dans le nouveau simplexe.

Dans le cas contraire on conserve le point x_{ref}^k .

Étape 3 : Contraction.

Si $f(x_{ref}^k) \geq f(x_i^k)$, $\forall i$, c'est à dire si l'étape de réflexion donne encore un point correspondant à la valeur maximum de f sur le simplexe, on contracte alors le mouvement :

$$x_{con}^k = \beta x_{ref}^k + (1-\beta) \bar{x}^k$$

Le paramètre β est laissé au choix de l'utilisateur et varie en général entre 0.2 et 1.

Si $f(x_{con}^k) < f(x_{ref}^k)$ on remplace le point x_{ref}^k par le point x_{con}^k dans le nouveau simplexe.

Dans le cas contraire on décide d'effectuer un mouvement de réduction afin d'adapter le simplexe à la topologie du problème étudié.

Étape 4 : Réduction. [22]

Cette étape est nécessaire lorsque l'étape 3 a échoué. On effectue alors une homothétie autour du point du simplexe x_{min}^k correspondant à la valeurs de f la plus faible. Les autres sommets d'indice i sont alors remplacés par :

$$x_i^k = \frac{(x_i^k + x_{min}^k)}{2}$$

Si $f(x_{ref}^k) > f(x_{max}^k)$ le simplexe initial subit une réduction : les étapes 1, 2 et 3 sont alors ignorées.

Si $f(x_{ref}^k) < f(x_{max}^k)$ alors le simplexe réfléchi subit une réduction : les étapes 2 et 3 sont dans ce cas ignorées.

La méthode du Simplex de Nelder et Meade est très populaire c'est une méthode de recherche locale des problèmes d'optimisation non linéaire sans contraintes. Le procédé Simplex de Nelder-Meade est basé sur le déplacement et le redimensionnement d'un polygone multidimensionnel (Simplex) le long d'une direction en descendant jusqu'à ce qu'un minimum local soit rencontré [20].

L'algorithme de Nelder-Mead (figure 41) est la méthode de recherche directe la plus utilisée [20]. Elle est très rapide et efficace comparativement aux autres méthodes de recherche directe. Elle requiert moins d'évaluations de la fonction coût que la recherche multidirectionnelle [20]. Par rapport aux méthodes de recherche par motifs généralisés (GPS, "generalized pattern search methods"), Nelder-Mead est capable de distordre le Simplex pour

mieux s'adapter à la topologie de la fonction. Nelder-Mead gagne en vitesse de convergence, mais perd en robustesse et manque de preuve formelle de convergence.

IV-6-5-3 Organigramme de la méthode de Nelder-Mead :

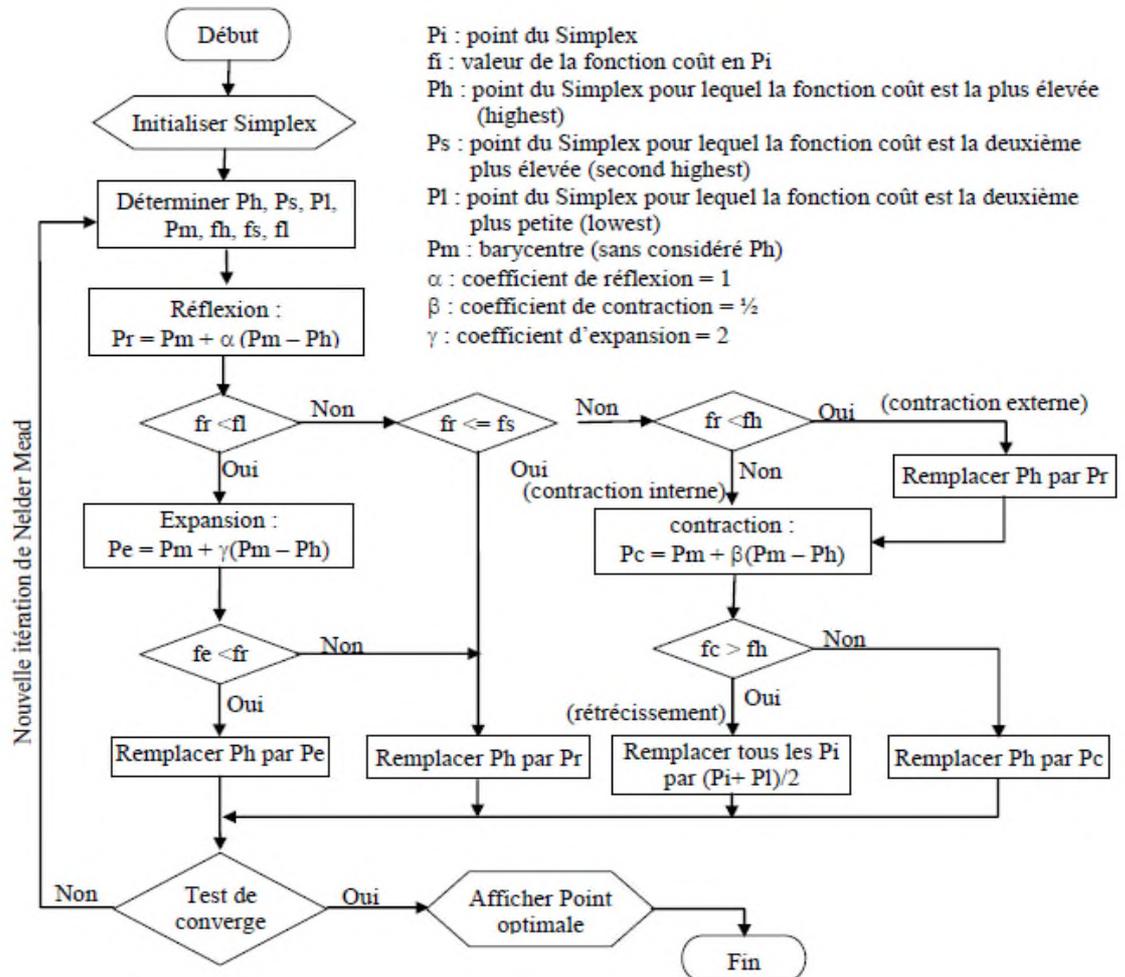


Figure 41 : Organigramme de la méthode de Nelder-Mead.

IV-7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a donné l'explication mathématique du mot optimisation, les méthodes d'optimisation : méthodes déterministes, méthodes stochastiques et on a bien défini les méthodes des algorithmes génétique et les méthodes simplex lesquelles on va faire l'évaluation d'une rainure.

Chapitre 5 :

Evaluation non destructive et interprétations

V. Evaluation Non Destructive et interprétations :

V.1. Introduction :

Notre évaluation a l'inversion par Simplex et Algorithme génétique associer au modèle des circuits électriques couplés au cas d'un dispositif axisymétrique à capteur absolu de type pancake et dans le cas d'une excitation demi sinusoïdale. Il s'agit de l'évaluation de deux propriétés : qui sont des dimensions d'une rainure de position fixe en bas de la pièce.

Pour l'évaluation de la rainure en bas de la pièce on a pour :

- Des rainures situées sur la surface inférieure de la pièce de position radiale $r = 4.0$ mm, la profondeur est fixée et on fait varier la largeur de 0 à 4 mm d'un pas de 0.4 mm (Fig.42 a).
- Des rainures sur la surface inférieure de la pièce pour une position radiale $r = 4.0$ mm et on fait fixer la largeur et faire varier dans un première temps sa profondeur de 0 à 2.4 mm par un pas de 0.4 mm (Fig.42.b).

Nous étudions d'abord dans ce cas la réponse du capteur due à la présence d'une rainure ainsi que les paramètres permettant l'évaluation. La pièce est en aluminium d'une épaisseur de 2.4mm. Nous évaluons ensuite pour ce cas, par le modèle d'inversion Simplex et modèle d'inversion d'Algorithme Génétique les dimensions de rainures en utilisant les paramètres d'évaluation choisis.

On évalue par les deux méthodes, la largeur et la profondeur de position radiale $r=4$ mm. En suite les dimensions de la rainure; la position radiale ou bien sa largeur ou sa profondeur. L'évaluation se fera sur la base de mesures représentées par la caractéristique de la variation de la tension due à la présence de la rainure.

V.2 Etude des paramètres de la réponse du capteur en fonction des dimensions de la rainure :

Pour des rainures de position radiales (4mm) on fait varier la largeur et la profondeur respectivement de 0 à 4mm et 0 à 2.4mm. Pour chaque largeur et profondeur, on calcule par le MCEMC-P la réponse du capteur représentée par la variation de la tension due à la présence de la rainure (Fig.43). Les paramètres de la réponse du capteur sont étudiés en fonction des dimensions de la rainure. Ensuite la largeur et la profondeur de la rainure sont évaluées en utilisant les paramètres choisis.

Les paramètres (Amp1, Amp2, Amp3, T1, T2, T3, TZ1, TZ2) représentés en fonction de la largeur et de la profondeur de la rainure sont représentés par les figures 44 et 45. Les amplitudes Amp1 (Figs.44.a et 45.a), Amp2 (Figs.44.b et 45.b), Amp3 (Figs.44.c et 45.c) renseignent en même temps sur la profondeur et la largeur de la rainure. Les paramètres T1 (Figs.44.d et 45.d), T2 (Figs.44.e et 45.e), T3 (Figs.44.f et 45.f), TZ1 (Figs.44.g et 45.g) et TZ2 (Figs.44.h et 45.h) renseignent seulement sur la profondeur, ils ne varient pratiquement pas en fonction de la largeur. Les paramètres permettant l'évaluation sont les amplitudes des pics Amp1, Amp2, Amp3 qui informent sur la largeur et la profondeur ainsi que le temps de passage par les pics et zéros T1, T2, T3, TZ1 et TZ2 qui informent seulement sur la profondeur.

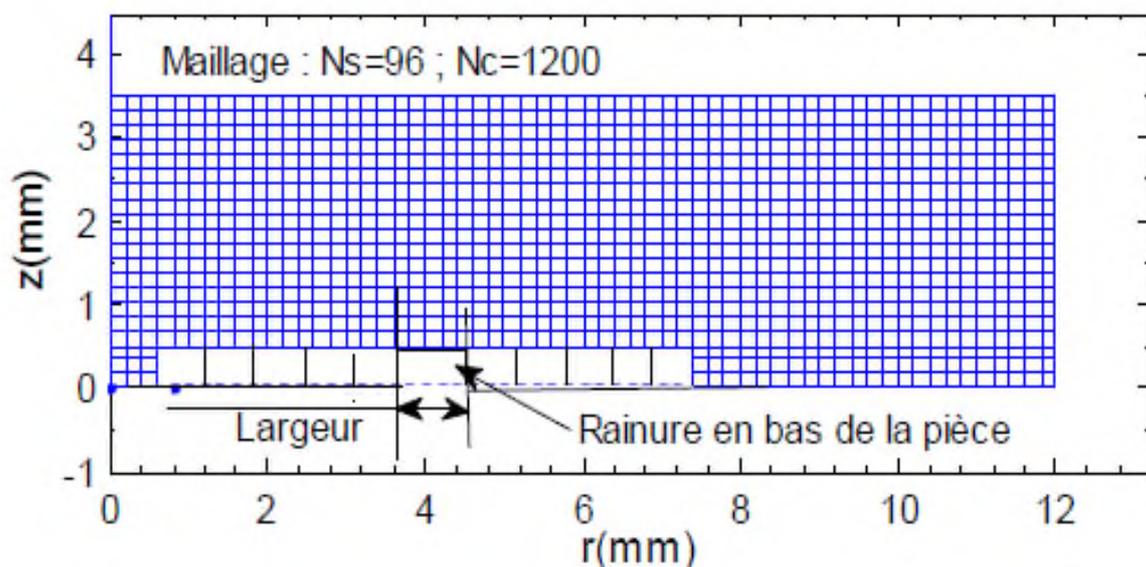


Figure 42.a : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la largeur pour différentes profondeurs.

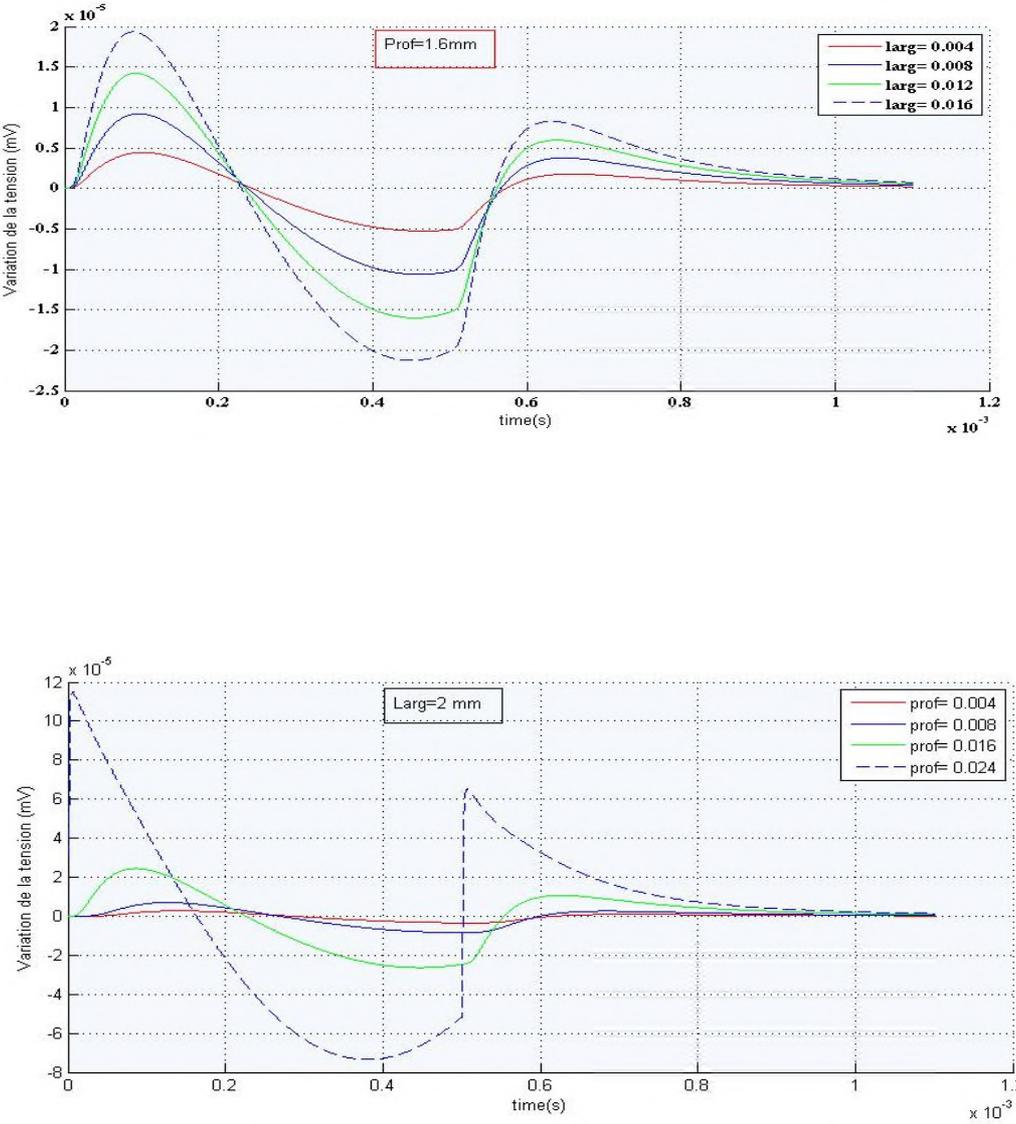
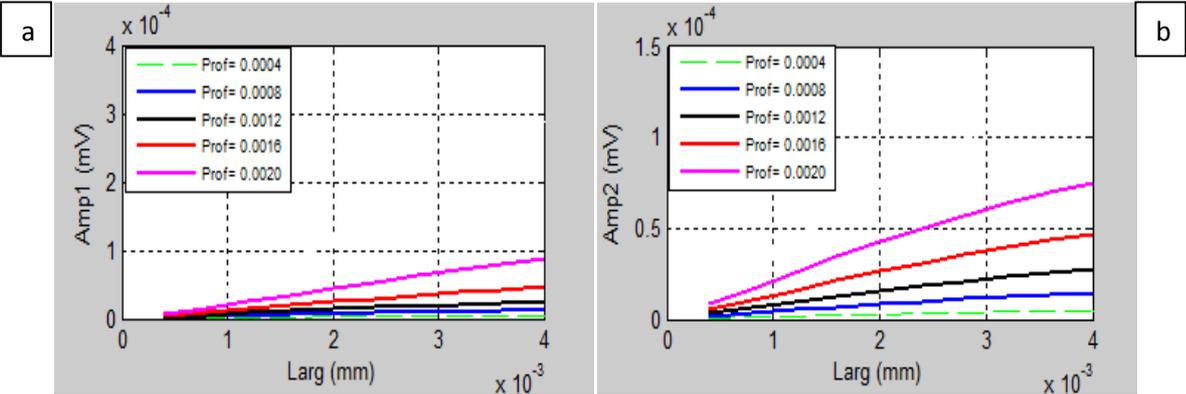


Figure 43 : Evolution temporelle de la variation de la tension du capteur due à la présence de la rainure en fonction de sa largeur et de sa profondeur.



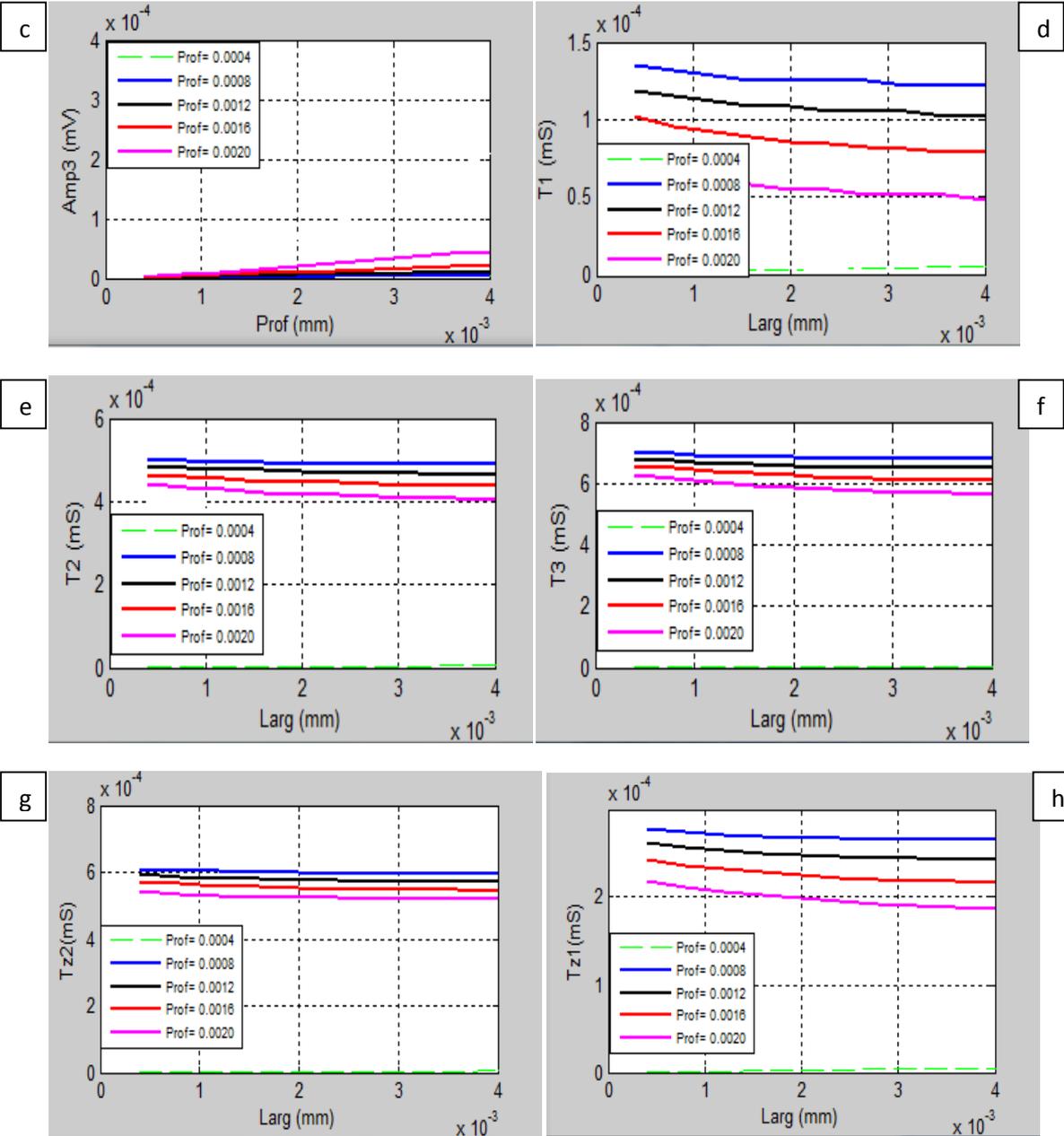


Figure 44 : Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la largeur d’une rainure pour différentes profondeurs.

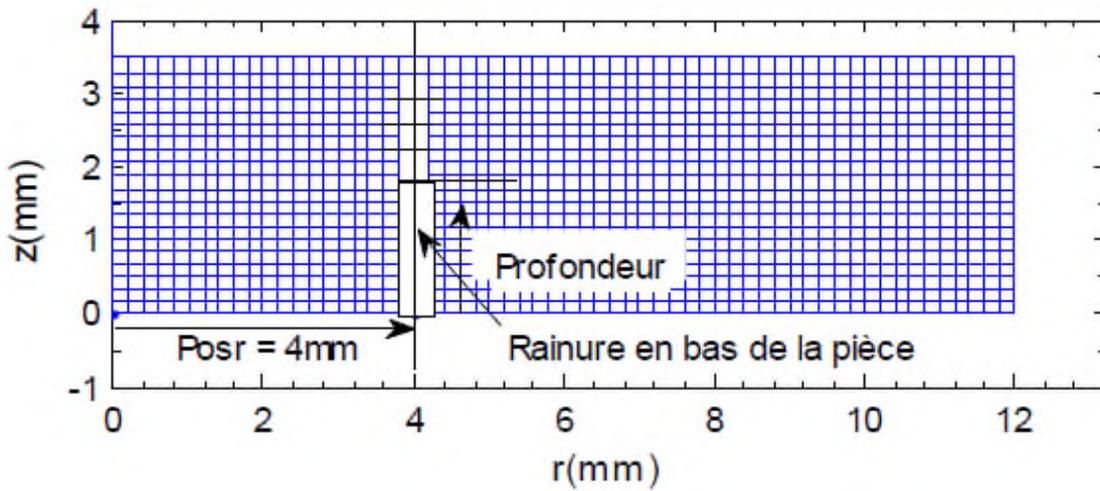
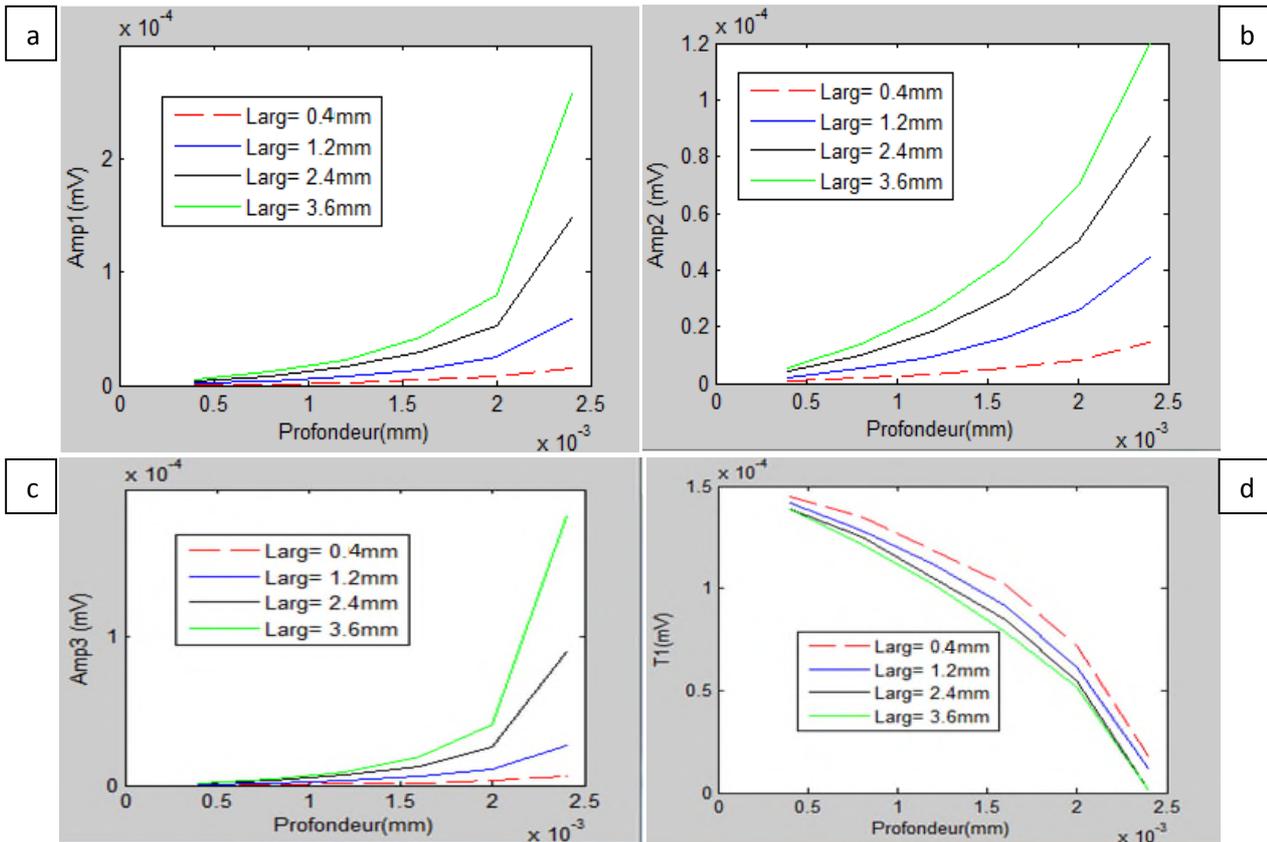


Figure 42.b : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la profondeur pour différentes largeurs.



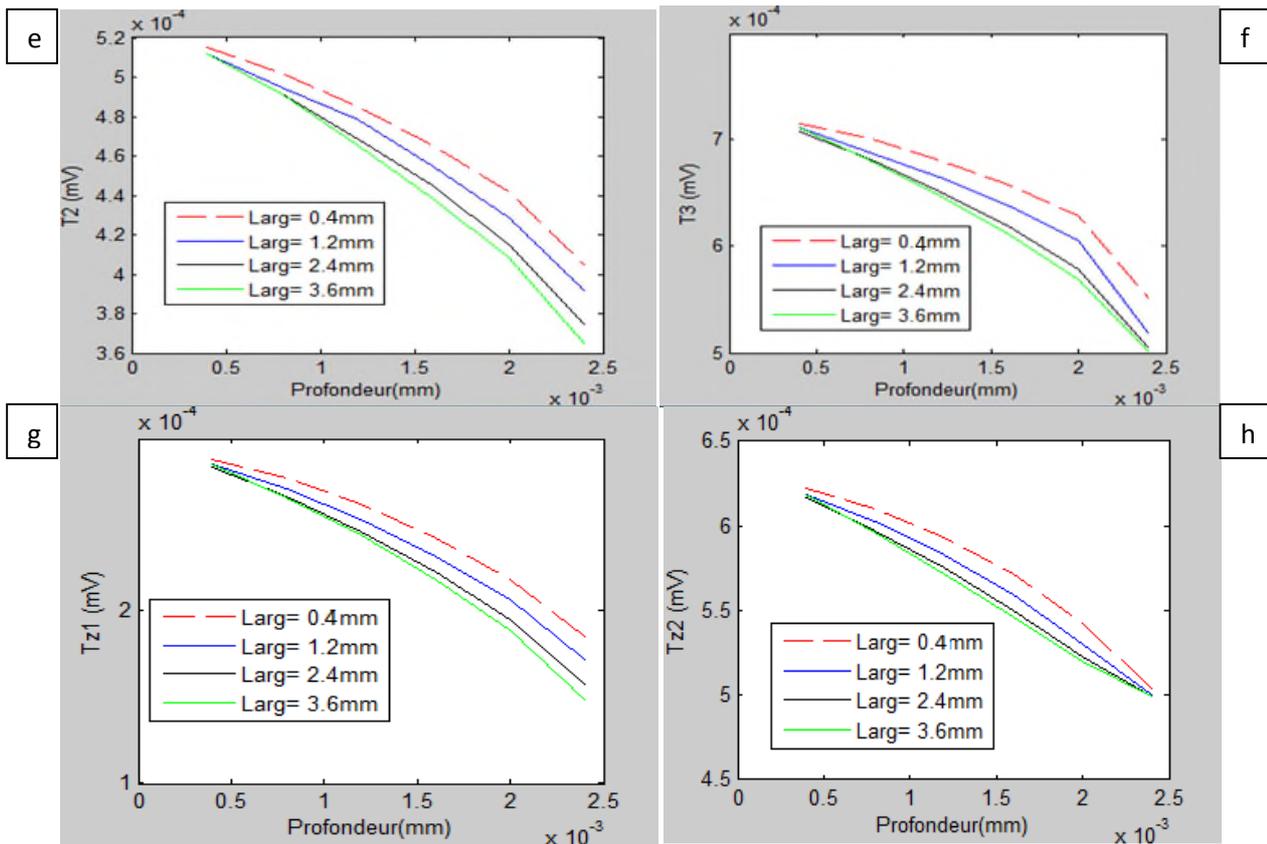


Figure 45 : Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la profondeur d'une rainure pour différentes largeurs.

VI.3.Evaluation par Simplex de la largeur et la profondeur d'une rainure :

Le tableau VI.1 récapitule l'évaluation par Simplex de la largeur et de la profondeur d'une rainure de position radiale fixe $Posr = 4.0$ mm située en bas d'une pièce en aluminium de 2.5 mm d'épaisseur. La largeur varie de 0.4 à 4.0 mm et la profondeur de 0.4 mm à 2.4 mm. Pour chaque largeur et profondeur de la rainure, le modèle d'optimisation nous donne la largeur et la profondeur estimées et la précision relative de calcul ainsi que le nombre d'itération et le temps de calcul. Le modèle converge vers la solution après un nombre d'itérations variant entre 50 à et 134.

L'évolution présenté par les figures 46.a et 46.b des dimensions d'une rainure évaluée par simplex et la précision de calcul en fonction du nombre d'itérations, la solution est représentée par une largeur de 2.4 mm et une profondeur de 1.6 mm. La convergence est obtenue après 50 itérations avec une précision 0.01% sur la position radiale. Les paramètres choisies pour l'évaluation sont les amplitudes du 1er pic Amp1, du 2eme pic Amp2 et du 3eme pic Amp3 ainsi les temps de passage par le 1ier zéro TZ1 et le 2eme zéro TZ2, la fonction objectif sera calculée par :

Chapitre 5 : Evaluation non destructive et interprétation des résultats.

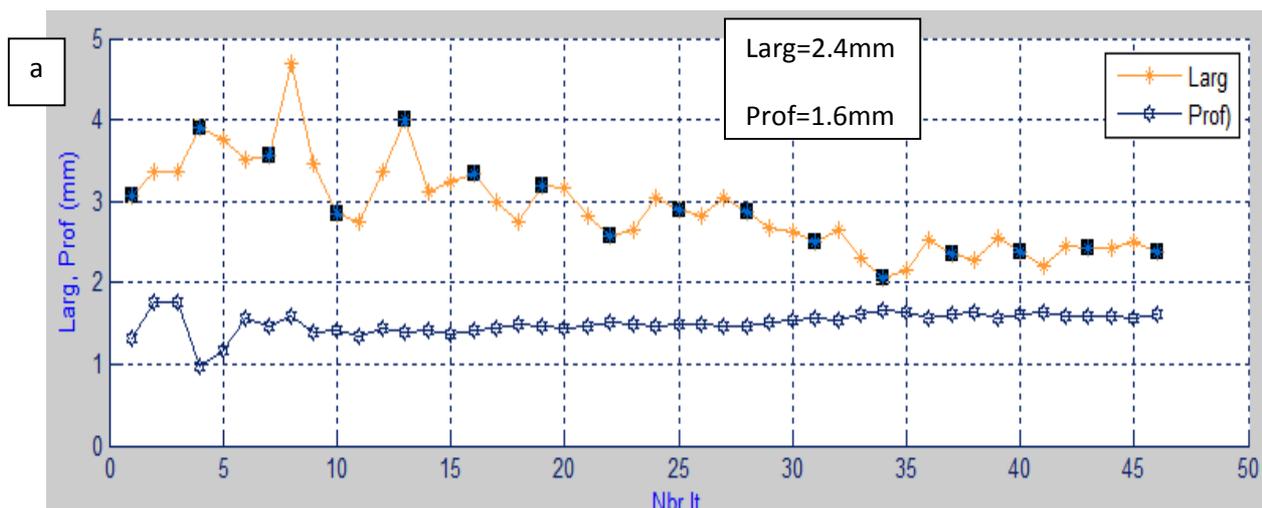
$$f=0.1111*(abs((Amp1MesAmp1)/Amp1Mes)+abs((Amp2MesAmp2)/Amp2Mes)+abs((Amp3Mes-Amp3)/Amp3Mes)+6*abs((Tz1Mes-Tz1)/Tz1Mes));$$

On calcule l'erreur par l'équation suivante :

$$Err1=(Xmes_X1/Xmes)*100 \text{ et } Err2=(Ymes_Y1/Ymes)*100$$

Tableau V.1 : Evaluation par Simplex de la largeur et la profondeur d'une rainure de position r = 4 mm

Pos (mm)	Larg (mm)	Prof (mm)	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	X3 (mm)	Y3 (mm)	ε1 (%)	ε2 (%)	It	Ilt	T(s)	F1 %	F2 %	F3 %
4	0.4	0.4	0.4087	0.3923	0.4309	0.3763	0.4428	0.3687	2.17	1.92	29	57	131.85	8.267 e-02	0.15	0.32
4	0.4	1.6	0.3988	1.5992	0.4057	1.5876	0.4058	1.5892	0.30	0.05	72	133	407.80	8.729 e-02	0.19	8.72 e-02
4	0.4	2.4	0.3988	2.4064	0.3988	2.4094	0.3972	2.4139	0.30	0.26	50	94	257.86	6.917 e-02	0.11	0.15
4	2.4	0.4	2.4276	0.3966	2.5139	0.3873	2.4735	0.3906	1.15	0.85	29	53	165.18	5.861 e-02	0.20	0.30
4	2.4	1.6	2.4002	1.5998	2.4041	1.5985	2.4083	1.5980	0.34	0.125	31	50	128.68	4.0 e-1	1.90	4.0 e-1
4	2.4	2.4	2.3983	2.4011	2.3986	2.4005	2.3885	2.4074	0.47	0.308	41	79	175.92	6.2 e-1	1.50	0.11
4	4.0	0.4	3.9961	0.4005	4.0582	0.3976	4.0344	0.3977	0.097	0.125	20	38	138.22	4.558 e-02	0.13	4.5588 e-02
4	4.0	1.6	4.0017	1.5998	3.9961	1.5998	3.9781	1.6022	0.54	0.137	31	57	127.67	2.1 e-1	4.60	2.1 e-1
4	4.0	2.4	4.0024	2.3993	3.9861	2.4046	4.0065	2.3971	0.162	0.120	25	48	109.29	5.8 e-1	2.60	5.8 e-1



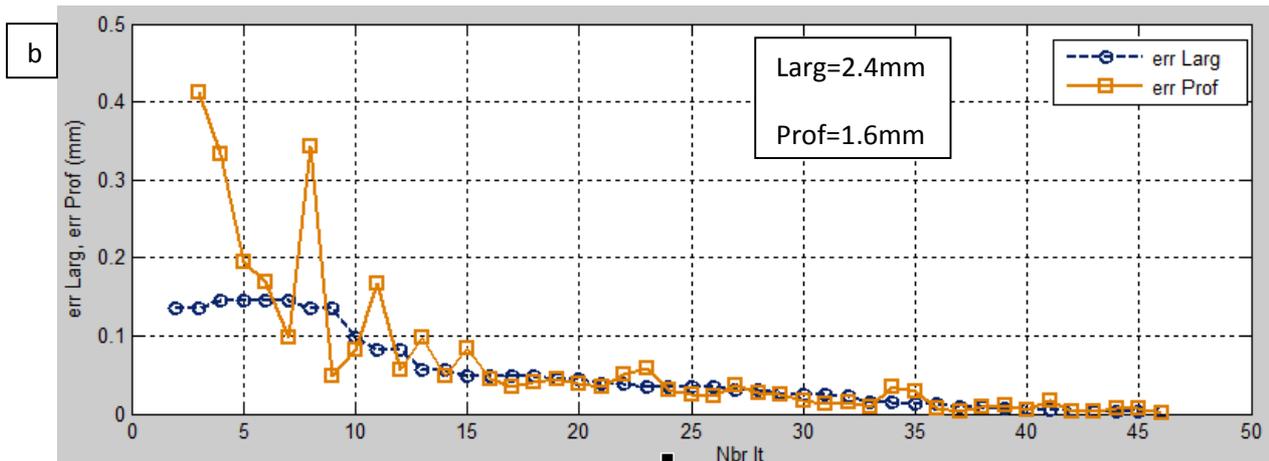


Figure 46 : Evaluation par Simplex-MCEC de la largeur et de la profondeur d'une rainure de position $r = 4$ mm située en bas de la pièce a) Evolution de la solution, b) Evolution de l'erreur

V.4. Evaluation par Algorithme Génétique de la largeur et la profondeur d'une rainure :

Le tableau VI.2 récapitule l'évaluation par AG de la largeur et de la profondeur d'une rainure de position radiale fixe $Posr = 4.0$ mm située en bas d'une pièce en aluminium de 2.5 mm d'épaisseur. La largeur varie de 0.4 à 4.0 mm et la profondeur de 0.4 mm à 2.4 mm. Pour chaque largeur et profondeur de la rainure, le modèle d'optimisation nous donne la largeur et la profondeur estimées et la précision relative de calcul ainsi que le nombre d'itération et le temps de calcul. Le modèle converge vers la solution après un nombre d'itérations fixe de 50.

Les paramètres choisies pour l'évaluation sont les amplitudes du 1er pic $Amp1$, du 2eme pic $Amp2$ et du 3eme pic $Amp3$ ainsi les temps de passage par le 1ier zéro $Tz1$ et le 2eme zéro $Tz2$, la fonction objectif sera calculée par :

$$f = 0.15 * (\text{abs}((Amp1Mes - Amp1) / Amp1Mes) + \text{abs}((Amp2Mes - Amp2) / Amp2Mes) + \text{abs}((Amp3Mes - Amp3) / Amp3Mes) + 4 * \text{abs}((Tz1Mes - Tz1) / Tz1Mes)).$$

Et on calcule l'erreur par l'équation suivant :

$$Err1 = (Xmes_X1 / Xmes) * 100 \text{ et } Err2 = (Ymes_Y1 / Ymes) * 100.$$

Tableau V.2 : Evaluation par AG de la largeur et la profondeur d'une rainure de position radiale 4.0 mm située en bas de la pièce.

Posr mm	Larg mm	Prof mm	X1	Y1	F(%)	It	Ilt	Temps (s)	Erre1 (%)	Erre2 (%)
4	0.4	0.4	0,4498	0,3616	0,0052	50	460	1202,33	12.45	9.6
4	0.4	1.6	0,4329	1,5438	0,0105	50	460	1082,99	8.23	3.51
4	0.4	2.4	0,3969	2,4058	0,0019	50	460	1301,02	0.10	0.24
4	2.4	0.4	2.3946	0.3794	0.0045	50	460	1307.67	0.17	7.50
4	2.4	1.6	2,4111	1,5966	0,0015	50	460	1092,16	0.46	0.21
4	2.4	2.4	2,4531	2,3860	0,0323	50	460	1056,47	2.20	0.58
4	4.0	0.4	4,1467	0,3960	0,0041	50	460	1366,62	3.65	0.10
4	4.0	1.6	4,0082	1,5889	0,0284	50	460	1048,65	0.20	0.75
4	4.0	2.4	3,9442	2,4304	0,0128	50	460	1058,43	1.40	1.25

VI.5 La comparaison entre l'inversion par simplex et l'inversion par AG :

Dans cette évaluation qu'on a faite, l'inversion par Simplex est plus efficace et plus correcte que l'inversion par AG, c'est que l'inversion par Simplex converge dans un intervalle du temps de 109s à 407s avec une marge d'erreur de 0.00% jusqu'à 2.17% avec un nombre d'itération qui varie. Par contre l'inversion par AG prend beaucoup de temps par rapport au Simplex ce temps est entre 1048s et 1366s et une marge d'erreur de 0.04% jusqu'à 4.17% avec un nombre d'itération fixe de 50. Le tableau suivant (Tableau VI.3) présente la différence entre ses deux méthodes.

Tableau V. 3 : Comparaison entre l'inversion par simplex et l'inversion par AG.

			Inversion par la méthode Algorithme Génétique.							Inversion par la méthode simplex.						
Posr mm	Larg mm	Prof mm	X1 mm	Y1 mm	F(%)	It	T (S)	Erre1 (%)	Erre2 (%)	X1 (mm)	Y1 (mm)	It	T(s)	F1 %	Err1 (%)	Err2 (%)
4	0.4	0.4	0,4498	0,3616	0,0052	50	1202,33	12.45	9.6	0.4087	0.3923	29	131.85	8.267 e-04	2.17	1.92
4	0.4	1.6	0,4329	1,5438	0,0105	50	1082,99	8.23	3.51	0.3988	1.5992	72	407.80	8.729 e-04	0.30	0.05
4	0.4	2.4	0,3969	2,4058	0,0019	50	1301,02	0.10	0.24	0.3988	2.4064	50	257.86	6.917 e-04	0.30	0.26
4	2.4	0.4	2,3946	0,3794	0,0045	50	1307,67	0.17	7.50	2.4276	0.3966	29	165.18	5.861 e-04	1.15	0.85
4	2.4	1.6	2,4111	1,5966	0,0015	50	1092,16	0.46	0.21	2.4002	1.5998	31	128.68	4.0 e-3	0.34	0.125
4	2.4	2.4	2,4531	2,3860	0,0323	50	1056,47	2.20	0.58	2.3983	2.4011	41	175.92	6.2 e-3	0.47	0.308
4	4.0	0.4	4,1467	0,3960	0,0041	50	1366,62	3.65	0.10	3.9961	0.4005	20	138.22	4.558 e-04	0.097	0.125
4	4.0	1.6	4,0082	1,5889	0,0284	50	1048,65	0.20	0.75	4.0017	1.5998	31	127.67	2.1 e-3	0.54	0.137
4	4.0	2.4	3,9442	2,4304	0,0128	50	1058,43	1.40	1.25	4.0024	2.3993	25	109.29	5.8 e-3	0.162	0.120

V.6. Evaluation Non Destructive par inversion Simplex à trois dimensions (n=3) :

L'inversion par Simplex, on fait varier les dimensions d'une rainure située sur la surface inférieure (la position de 2 à 6 mm, la largeur de 0 à 4 mm et la profondeur de 0 à 2.4 mm) comme le montre la figure 47. Pour chaque position, largeur et profondeur, on calcul par le MCEC-P la réponse du capteur représentée par la variation de la tension due à la présence de la rainure figure 47. Les paramètres de la réponse du capteur sont étudiés en fonction des dimensions de la rainure. Ensuite la position, largeur et la profondeur de la rainure sont évaluées en utilisant les paramètres choisis.

V.6.1. Etude des paramètres de la réponse du capteur en fonction des positions radiales et des dimensions de la rainure :

L'évolution des paramètres (Amp1, Amp2, Amp3, T1, T2, T3, TZ1, TZ2) représentés en fonction de la position de la rainure par la figure 48 sont étudiés. Les amplitudes Amp1 (Figs.48) Amp2 (Figs.48), Amp3 (Figs.48) renseignent en même temps sur la position radiale, la profondeur et la largeur de la rainure. Aussi les Amp1, Amp2 et Amp3 des Fig(44.a, 45b). Les paramètres T1 (Figs.48), T2 (Figs.48), T3 (Figs.48), TZ1 (Figs48) et TZ2 (Figs.48) ne renseignent pas sur la position radiale, ils ne varient pratiquement pas en fonction de cette dernière. Les paramètres permettant l'évaluation sont les amplitudes des pics Amp1, Amp2, Amp3 qui informent sur la position, la largeur et la profondeur ainsi que le temps de passage par les pics et zéros T1, T2, T3, TZ1 et TZ2 qui informent seulement sur la profondeur.

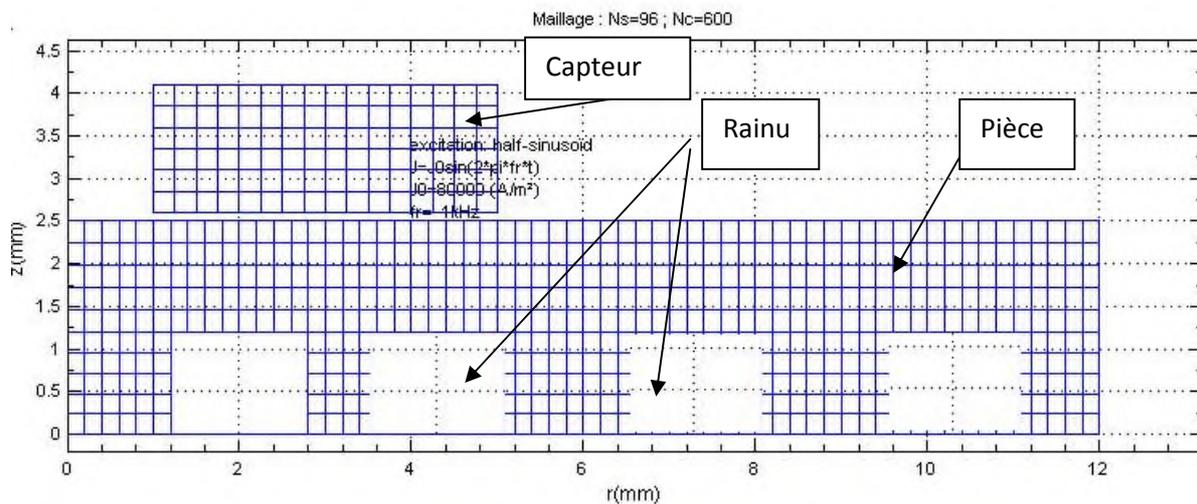


Figure 47 : Représentation de la rainure en bas de la pièce en fonction de la Position radiale pour différentes largeurs et profondeur.

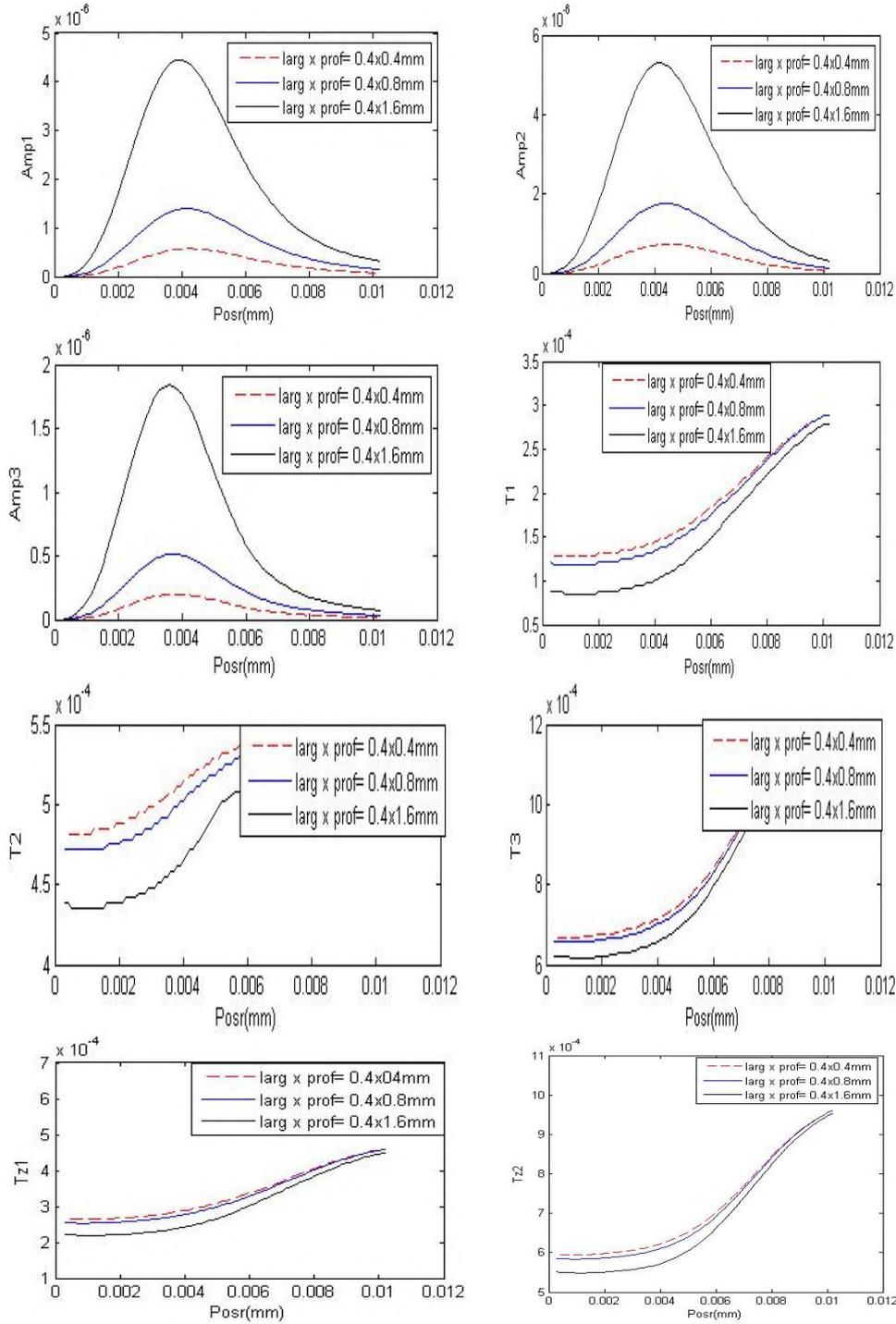


Figure .48. Comportement des paramètres de la réponse du capteur due à la présence de la rainure en fonction de la position radiale pour différentes positions en profondeur.

V.6.2.Evaluation de la position, la largeur et la profondeur d'une rainure (n=3) :

Le tableau VI.4 récapitule l'évaluation par Simplex de la position, la largeur et de la profondeur d'une rainure située en bas d'une pièce en aluminium de 2.5 mm d'épaisseur. La position varie de 2 à 10 mm La largeur varie de 0.4 à 4.0 mm et la profondeur de 0.4 mm à 2.4 mm. Pour quelque position, largeur et profondeur de la rainure, le modèle d'optimisation nous donne la largeur et la profondeur estimées et la précision relative de calcul ainsi que le nombre d'itération et le temps de calcul. Le modèle converge vers la solution après un nombre d'itérations fixe de 120.

L'évolution des dimensions d'une rainure évaluée par Simplex (n=3) et la précision de calcul en fonction du nombre d'itérations, la solution est représentée par position 2 mm la largeur de 4 mm et une profondeur de 2.4 mm. La convergence est obtenue après 53 itérations avec une précision 0.015% sur la position radiale et la largeur, 0.025% sur la profondeur. Les paramètres choisies pour l'évaluation sont les amplitudes du 1er pic Amp1, du 2eme pic Amp2 et du 3eme pic Amp3 ainsi les temps de passage par le 1er zéro TZ1 et le 2eme zéro TZ2, la fonction objectif sera calculée par :

$$f=0.1667*(abs((Amp1Mes-Amp1)/Amp1Mes)+abs((Amp2Mes-Amp2)/Amp2Mes)+abs((Amp3Mes-Amp3)/Amp3Mes)+4*abs((TZ1Mes-TZ1)/TZ1Mes).$$

Et on calcule l'erreur par l'équation suivant :

$$Err1=(Xmes_X1/Xmes)*100 \text{ et } Err2=(Ymes_Y1/Ymes)*10.$$

Tableau V .4 : Evaluation par Simplex (n=3) de la position, la largeur et la profondeur d'une rainure située en bas de la pièce.

Posr Mm	Larg Mm	Prof Mm	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z3	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)	F4 (%)	It	lit	Temps (s)	Er1 (%)	Err2 (%)	Er3 (%)
2	1.2	0.8	1,9128	1,3612	0,7795	1,9127	1,3613	0,7795	0,02	0,02	0,02	0,02	120	217	558,2	4.4	13.4	2.56
3	1.2	0.8	3,1830	0,9689	0,8751	3,1830	0,9689	0,8751	0,29	0,29	0,29	0,29	120	223	517.6	6.1	19.25	9.38
4	1.2	0.8	3,9988	1,2004	0,7997	3,9955	1,2065	0,7971	0.005	0,01	0,01	0,01	52	95	241,3	0.03	0.03	0.03
5	1.2	0.8	4,9975	1,2169	0,7915	4,9973	1,2172	0,7913	0,03	0,03	0,03	0,03	120	221	558,2	0.05	1.43	1.06
6	1.2	0.8	5,9943	1,2272	0,7842	5,9935	1,2306	0,7822	0.09	0,01	0,01	0,01	55	103	261,7	0.09	2.26	1.97
2	1.6	2.0	1,9841	1,6270	1,9972	1,9853	1,6270	1,9970	0.009	0,01	0,01	0,01	60	111	285,8	0.79	1.68	0.14
3	1.6	2.0	2,9995	1,6035	1,9985	2,9887	1,6149	1,9961	2,8301	0,02	0,02	0,002	65	114	278,6	0.01	1.68	0.07
4	1.6	2.0	3,9998	1,6011	1,9994	3,9999	1,6012	1,9993	0,012	0,014	0,014	0,014	120	209	564,7	0.02	0.06	0.05
5	1.6	2.0	5,0000	1,6001	1,9998	4,9997	1,6005	1,9996	0.009	0,011	0,011	0,009	81	143	393,6	0	0.006	0.01
6	1.6	2.0	5,9981	1,6025	1,9968	6,0006	1,6034	1,9980	0.009	0,01	0,02	0,05	47	90	227,7	0.03	0.14	0.16
2	4	2.4	1,9996	3,9993	2,4006	1,9994	3,9989	2,4013	0.007	0,02	0,02	0,02	53	105	248,9	0.02	0.01	0.02
3	4	2.4	3,1343	3,7243	2,45561	3,1535	3,6586	2,4728	0.005	0,13	0,14	0,14	46	91	233,6	4.47	6.9	2.31
4	4	2.4	4,0268	3,9703	2,4173	4,0272	3,9689	2,4181	0,075	0,07	0,08	0,11	120	209	535,9	0.67	0.75	0.72
5	4	2.4	4,9758	3,9962	2,3798	4,9758	3,9962	2,3798	0,13	0,13	0,13	0,13	120	230	586,4	0.50	0.1	0.84
6	4	2.4	5,5656	3,7451	2,3749	5,5656	3,7450	2,3749	2.29	2,29	2,29	2,29	120	232	596,2	7.25	6.37	1.05

Les figures 49.a et 49.b présentent l'évolution des dimensions d'une rainure évaluée par Simplex et la précision de calcul en fonction du nombre d'itérations, la solution est représentée par une position radiale de 2 mm, une largeur de 4 mm et une profondeur de 2.4 mm. La convergence est obtenue après 53 itérations avec une précision 0.02% sur la position radial, 0.01 sur la largeur et de 0.02% sur la profondeur.

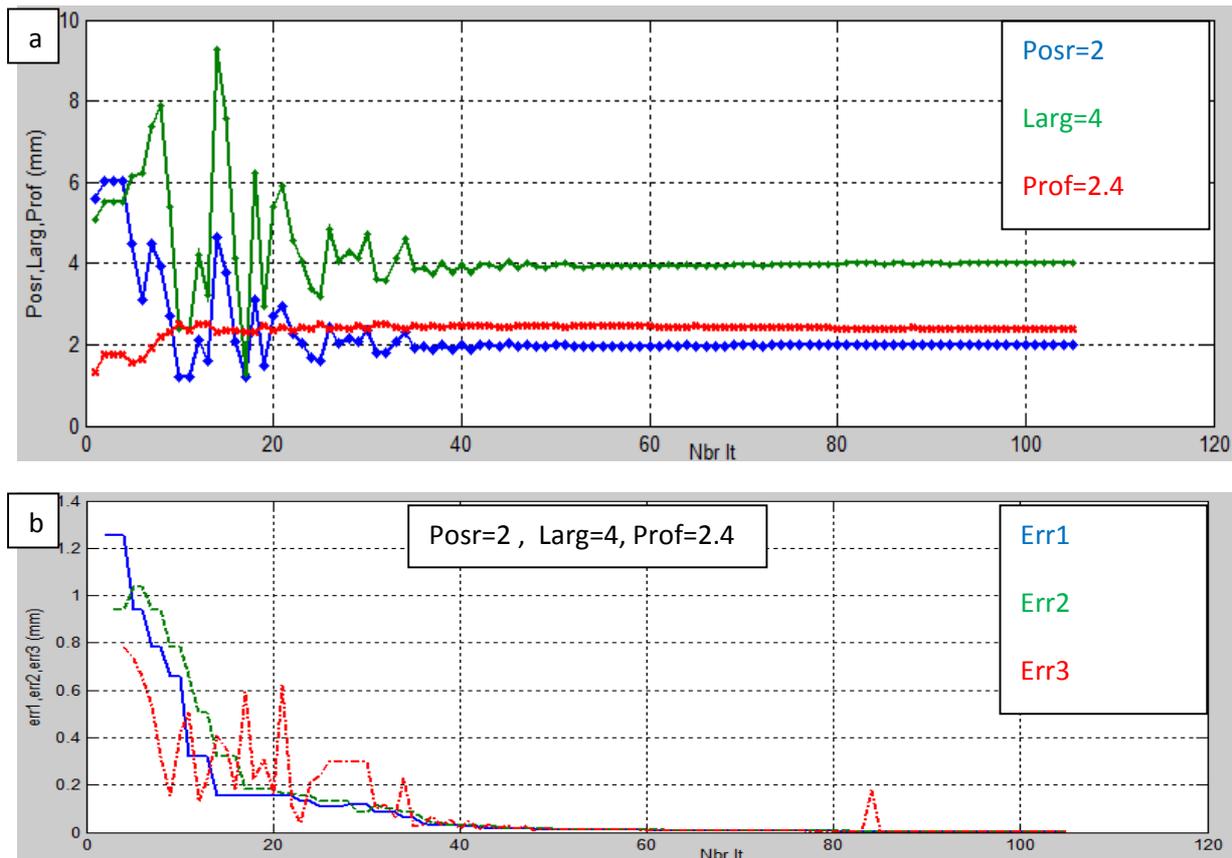


Figure 49 : Evaluation par Simplex (n=3)-MCEC de la position, la largeur et de la profondeur d'une rainure située en bas de la pièce a) Evolution de la solution, b) Evolution de l'erreur.

V.7 Conclusion :

Le choix des paramètres d'évaluation est une étape très importante dans le processus de contrôle. L'étude de leur comportement en fonction du couple de propriétés à évaluer est faite sur tous le domaine de variation de ces dernières. Cela a permis d'une part de choisir les paramètres permettant l'évaluation, d'autre part d'éliminer les paramètres qui ne sont pas sensibles aux variations des propriétés à évaluer ou qui posent un problème.

En utilisant les paramètres permettant l'évaluation de deux propriétés simultanément. Le modèle d'inversion par Simplex et par AG associés au modèle des circuits électriques couplés a permis l'évaluation simultanée : des dimensions (larg et prof) d'une rainure située sur la surface inférieure de la pièce.

Chapitre 5 : Evaluation non destructive et interprétation des résultats.

Aussi en utilisant les paramètres permettant l'évaluation à trois propriétés. Le modèle d'inversion par Simplex associé au modèle directe (MCEC) nous a permis l'évaluation de la position radiale, la largeur et la profondeur.

Conclusion Générale :

Le contrôle Non Destructif par courant de Foucault est déjà étudié par divers modèles analytique et numérique ainsi que des modèles semi analytiques aboutissant aux formulations explicites des caractéristiques du CND-CF particulièrement ceux basés sur les grandeurs électromagnétiques couplés en mode pulsé. L'objectif de ce travail consiste la caractérisation d'une rainure d'un matériau conducteur par inversion associée à la MCEC en mode pulsé.

Ce travail entre dans le cadre de la mise en œuvre d'un modèle d'inversion associée à la MCEC pour le CND par courants de Foucault pulsé, ce modèle repose sur l'utilisation des méthodes d'optimisation, il nous a permis de faire l'évaluation de deux propriétés; qui sont les dimensions d'une rainure (largeur et profondeur) de position radiale fixe ($Posr=4$), et aussi l'évaluation de trois paramètres à savoir (la position radiale, la largeur et la profondeur).

Nous avons porté nos efforts sur la compréhension des méthodes d'optimisation afin d'acquérir les connaissances nécessaires pour l'implémentation de ces méthodes associées au CND-CF. On a opté pour deux méthodes: l'une du type déterministe qu'est Simplex l'autre stochastique qui est les Algorithme Génétique.

Les deux modèles (simplex et Algorithme génétique) donnent de bon résultat néanmoins la méthode Simplex est plus rapide et donne une meilleure précision.

Dans le cas d'évaluation de deux propriétés pour les problèmes présentant un seul optimum nous recommandons l'utilisation de la méthode simplex. Contrairement à la méthode stochastique AG qui explore toutes les solutions admissibles et qui converge toujours vers la solution globale. Néanmoins cette dernière a le mérite de montrer que la méthode simplex ne converge pas vers un optimum local.

Dans le cas de l'évaluation de trois paramètres pour les problèmes présentant un seul optimum, la méthode Simplex converge généralement vers la solution avec une bonne précision sauf pour certains points l'erreur est très important (19%). Par contre les Algorithmes Génétiques prennent beaucoup de temps (entre 30 et 40 minute pour une exécution), il n'est donc pas souhaitable de l'utiliser.

Plusieurs perspectives sont envisagées pour la continuité de notre travail dans le domaine du CND-CF :

- Elargir les modèles aux méthodes d'optimisation multi-objectif telles que multi-simplex ou AG multi objectifs, qui sent une alternative à la pondération des fonctions objectifs qui ne peut pas être efficace dans tous les cas.
- Elargissement du modèle d'inversion aux autres types de méthodes d'optimisation déterministe, stochastiques et évolutionnistes.

Références bibliographiques :

- [1] Barry Hill & Vernon John, "Non – Destructive Testing", Mc. Millan, 1988.
- [2] Maurice WANIN, "Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1)", Techniques de l'Ingénieur, Réf. M4130, 10 déc. 2001.
- [3] M. PERDRIX, "Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault", CAST, INSA de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées, G.PEIX, 1988.
- [4] J. Dumont-Fillon : " Contrôle non destructif (CND) ". Techniques de l'Ingénieur, R1400. Mesure mécanique et dimensionnelle 1996.
- [5] P. Durouchoux, « La recherche en contrôle non destructif », traitement du signal, Vol 2- 1985.
- [6] Peter J. Shull, "Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications", Marcel Dekker, Inc, New York, USA, 2002.
- [7] Joseph M. Buckley, Robert A. Smith, Jesse A. Skramstad, "Transient eddy currents for aircraft structure, Inspection - An introduction", Buckley, Smith, Skramstad Sep. 2003.
- [8] Maurice WANIN, "Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 2) ", Technique. de l'Ingénieur., Réf. M4131, 10 mars 2002.
- [9] B. NEYRAU, C. GUILLAUD, M. PERDRIX et F. PONS, "Utilisation des courants de Foucault pulsés pour la détection des défauts dans l'acier austénitique", 6e Colloque International sur les Méthodes de contrôle non destructif, Strasbourg, 1986
- [10] Crostack H.A., Nehring J., "Development and application of pulsed eddy current testing using CS technique", Proc. of the 1 lth world conference on NDT, Las Vegas, USA, November 1985.
- [11] BUVAT, F., G. PICHENOT, D. LESSELIER, M. LAMBERT et H. VOILLAUME, " Modélisation de sonde courants de Foucault avec noyau ferromagnétique ", Instrumentation Mesure Métrologie, 2004.
- [12] CHOUA, Y, " Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault ", thèse de doctoral, Université Paris-Sud 11. 2009
- [13] D.L. George, "An introduction to impedance plane phase analysis eddy current equipment and its use on aircraft structures", British journal of Nondestructive testing, 1987.
- [14] D.J. Hagemaiier, "Eddy current impedance plane analysis, *Materials Evaluation*", 1982.
- [15] L. Udpa, S.S. "Udpa, Eddy current defect characterization using neural networks, *Materials Evaluation*" ,1990.

- [16] I. Dufour, M. Busawon, D. Premel, ‘ ‘ General analysis of inductive sensor based systems for non destructive testing’ ’, J, phy. III, France, 1994.
- [17] B. Georgel, " Traitement des signaux courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateurs de vapeur dans les centrales nucléaires REP", Traitement du signal, 1991.
- [18] C.V. Dood, W.E. Deeds, "Determination of multiple properties with multiple eddycurrent measurements", International advanced in Non-destructive Testing, (1981),
- [19] A. Bouzidi, B. Maouche, M. Feliachi, and G.Berthiau; regular article, ‘ Pulsed eddy current non-destructive evaluation based on coupled electromagnetic quantities method.
- [20] A. BOUZIDI, "Etude du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Pulsés en utilisant les Circuits Electromagnétiques Couplés" thèse Doctorat Filière : Génie Électrique, Option : Machines électriques électrotechnique, université ABDERRAHMANE MIRA Bejaia, 2013.
- [21] B. MAOUCHE, "Elaboration de modèles par les grandeurs électromagnétiques couplés : application à l’étude du contrôle non destructif par courants de Foucault", thèse Doctorat en électrotechnique, université FERHAT ABBAS, Sétif, 2007.
- [22] Omessaad HAJJI, Contribution au développement de méthode d’optimisation stochastique. Application a la conception des dispositifs électrotechniques, thèse doctorat, 2003.
- [23] Mlle. BENNANI Nadia ; Mlle. BENANOUNE Naima, thème "Modèle inverse associé à la Méthode des Grandeurs Electromagnétiques Couplées appliqué à l’Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault de et de l’épaisseur d’une cible et du lift-off".2011
- [24] Thollon, Frédéric, "Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques", Thèse de Doctorat en Génie Electric, Ecole centrale de Lyon, 1995.
- [25] D. Mugnier, F. Dauphine, J. La foucrière et R. Chery, "Champs magnétiques créés par des bobines circulaires de section droites finies et application aux topographies dites en r-1". Revue de Physique Appliquée, Tome 4, Déc. 1969.
- [26] John D. Jackson, "Électrodynamique classique - Cours et exercices d'électromagnétisme", 3e édition, Dunod, 2001.
- [27] Ernst Weber, «Electromagnetic field, Theory and Applications", Volume I Mapping of Fields, Brooklyn, New York, John Wiley & Sons, Inc. April, 1950.
- [28] G.Berthiau, B. de Barmon, "MESSINE, An Eddy Current Parametric Model for flaw characterization Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation", QNDE 86, Snowbird, Utah, USA, 1998.
- [29] GLOWINSKI Roland, "Partial differential equations: modelling & numerical simulation", Computational methods in applied sciences, Vol. 16, Springer, 2008.

- [30] B. MAOUCHE, M. Feliachi, "Calcul d'impédance par les potentiels magnétiques couplés d'un système de caractérisation par des courants de Foucault", colloque sur les matériaux du GENIE électrique "MGE'05", 8 et 9 décembre 2005, Lyon, France
- [31] Chunyan Xiao n, HaoLi, "Combined analytical-numerical approach to the voltage of a cylindrical coil with pulsed current", *NDT&E Int.* 45, 2012, 97–103
- [32] H. Mohellebi, F. Bouali, M. Felliachi, "Use of Semi-Analytical Method for the Detection of Defects in Diet Pulses", 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2010.
- [33] Ana Alonso Rodríguez, Alberto Valli, *Eddy Current Approximation of Maxwell Equations - Theory, algorithms and applications*, Springer-Verlag Italia 2010.
- [34] E. Durand, «Magnétostatique », Université de Paris -VI, (1969).
- [35] E. Boridy, « Electromagnétique théorie et application », 1992.
- [36] R. Pascal, "Modélisation du Traitement Thermique Superficiel par Induction", Thèse de Doctorat, Ecole MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique), 4 juillet 2003.
- [37] K.J. Binns, P.J. Lawrenson, C.W. Trowbridge, "The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields", Wiley 1992.
- [38] R. Petit, "Ondes électromagnétiques", Masson, Paris 1989.
- [39] Rémy LA, « Modélisation phénoménologique des signaux courants de Foucault en vue de la caractérisation des défauts des tubes de générateurs de vapeur ». Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, CEA\Saclay, France, février 1997.
- [40] A. Diche, H. Mohellebi, A. Zaoui, M. Feliachi, "3D analytical models for geometry and vector transformations for defects analysis in NDT systems", *IET Colloquium on Reliability of Electromagnetic Systems*, 2007.
- [41] A. BOUZIDI, "Contribution au Calcul par Eléments Finis des Courants de Foucault dans les Pièces de Structure Tridimensionnelle", Magister en Génie électrique, Machines électriques, Univ. Béjaïa, Juin Juin 1998.
- [42] Chen Huang, Xinjun Wun, Zhiyuan Xu, Yihua Kang, "Ferromagnetic material pulsed eddy current testing signal modeling by equivalent multiple-coil-coupling approach", *NDT&E Int.* 44, 2011.
- [43] M. LOUAAYOU, "Etude d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND) par la méthode des circuits couplés", stage DEA en électronique et génie électrique, université de Nante, 2002.
- [44] Abderrezzak Latreche, "Etude du Contrôle Non Destructif par la Méthode de Galerkin sans Maillage", Thèse de Magistère en Matériaux Electrotechniques, Univ. De Batna, 2009.

- [45] Gyimothy S., Pavo J., Tsuboi H., "Conceptual evaluation of inversion models used for layered structures", *Magnetics, IEEE Trans. on* , vol.42, no.4, pp.1091-1094, April 2006.
- [46] B. MAOUCHE "étude comparative de trois type de formulation par de formulation par la méthode des circuits électromagnétiques couples du phénomène électromagnétique transitoire de pièce en mouvement", *JCG'03*, Saint-Nazaire, Nantes, France, pp.443-447, 5-6 juin 2003.
- [47] B.MAOUUCHE, "Etude et développement semi analytique de l'équation de diffusion électromagnétique avec terme du déplacement dans le cas des dispositifs axisymétrique excité en courant ou en tension. ". Thèses de magistère en génie électrique, université A. Mira de Bejaia, 1996.
- [48] Jack Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, Second edition", Originally published by Chapman & Hali , 7 Springer Science, 1997.
- [49] J.H.V. Lefebvre, C. Mandache , J. Letarte, "Pulsed eddy current empirical modeling", *Proc. Vth International Workshop, Advances in Signal Processing for NDE of Materials*, Québec City, Canada, Aug. 2005
- [50] A. Bouzidi, B. Maouche, M. Feliachi, "Pulsed NDE of external groove by the coupled electromagnetic quantities model associated with Fourier reconstitution method", *International Congress on Telecommunication and Application'12 (ICTA'12)*, University of A.MIRA Bejaia, Algeria, 11-12 APRIL 2012.
- [51] V. Doriat, "Contribution à la modélisation de système de contrôle non destructif par courants de Foucault, application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique ", thèse de Doctorat en électronique et génie électrique, université de Nantes, octobre 2007.
- .
- [52] F. BOUALI (F.), "Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé", thèse magistère université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou, 2010.
- [53] PHILIPPE BELTRAME, "Modélisation de la perturbation électromagnétique au voisinage d'une fissure mince dans un matériau conducteur. Application au Contrôle Non Destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Centre de Génie Électrique de Lyon, Déc. 2002.
- [54] Stéphane Vivier, "Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis", thèse de doctorat en Génie Electrique, Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille, Juillet 2002.
- .

- [55] Ch. Darwin, "The origin of species by means of natural selection", Jhon Marray London, 1859.
- [56] Goldberg D. E " Algorithmes génétique- exploration, optimisation et apprentissage automatique" Edition Addison- Wesley, 1994.
- [57] X. ANTOINE, P. DREYFUSS, Y.PRIVAT, "Introduction à l'optimisation : aspects théoriques, numériques et algorithmes", ENSMN-ENSEM 2A (2006-2007).
- [58] Sarra Bouallagui, "Techniques d'optimisation déterministe et stochastique pour la résolution de problèmes difficiles en cryptologie", Institut National Des Sciences Appliquées De Rouen, thèse de doctorale 2010.
- [59] Holland J.H 75, "adaptation in naturel and artificial systems", 1975.
- [60] Tarek BOUCHALA, thèse Magister en Electrotechnique : Modélisation Semi Analytique des Courants de Foucault'' Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite''

Résumé :

Ce travail a pour but l'élaboration d'un modèle d'inversion par le biais des méthodes d'optimisations associé à la méthode des circuits électriques couplés (MCEC) en mode pulsé pour le CND-CF. Deux méthodes d'optimisations ont été utilisées, Simplex et les Algorithmes Génétiques pour leur efficacité et leur robustesse afin d'identifier les paramètres physiques des pièces à contrôler (rainure).

Les deux modèles élaborés sous environnement Matlab ont été appliqués sur un dispositif axisymétrique à capteur absolu de type pancake. Il permet pour le mode d'excitation (pulsé) l'évaluation des propriétés (En deux dimensions ($n=2$) ; largeur et profondeur, en trois dimensions ($n=3$) largeur, profondeur et différentes positions).