

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

Présenté par
MEHADDENE Hamid

Thème

APPLICATION DE LA METHODE DES RESEAUX DE NEURONES POUR LA RECONSTITUTION DES DEFAUTS

Mémoire soutenu publiquement le 01 JUILLET 2014 devant le jury composé de :

Mr M'hemed RACHEK	Maitre de conférences classe A, UMMTO, Président
Mr Hassane MOHELLEBI	Professeur, UMMTO, Rapporteur
Mr Slimane REZGUI	Maitre assistant classe A , UMMTO, Examineur
Mr Meziane HAMEL	Doctorant, UMMTO, Examineur
Mme Ghania YOUSFI	Doctorante, UMMTO, Co-promotrice

À mon très cher père

À ma très chère mère

Je ne vous remercierai jamais assez pour votre amour, soutien, bienveillance, conseil etc..., je vous offre ce travail

À mes frères Rafik, Nazim et Larbi

À ma sœur Lamia

Je suis très fier de vous offrir la primeur de mes efforts et de mes sentiments pour exprimer mon amour envers vous.

À toute ma grande famille

À H-MEJHAL

Un grand merci pour tous les conseils et pour le soutien que vous m'avez apporté. C'est l'occasion aussi de vous exprimer ma plus grande estime et ma gratitude.

À tous mes amis Djilali, Hend, Athmane, Mazigh, Civa, Mohand, Sarah, Nawel,

Merci pour tout, bon courage et bonne continuation

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Remerciements

*Ce mémoire de Master a été dirigé par Monsieur **MOHELLEBI Hassen**, Professeur à L'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (UMMTO). Et président du conseil scientifique de la Faculté de Génie Electrique et Informatique (FGEI); Ce moment est pour moi, l'occasion de vous témoigner ma plus grande estime et ma reconnaissance.*

*Je souhaite aussi exprimer toute ma reconnaissance à ma Co-promotrice Mme **YOUSFI Ghania** Doctorante à l'Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (UMMTO), pour sa redoutable efficacité.*

Je tiens à remercier, tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail et pour leur présence à ce jury.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants et de tout le personnel du département de Génie Electrique et Informatique (GEI).

Sommaire.

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Phénomènes Electromagnétiques

I.1. Introduction	3
I.2. Développement historique.....	3
I.3. Lois générales de l'électromagnétisme.....	4
I.3.1. Flux du champ magnétique.....	4
I.3.2. Circulation du champ magnétique, Théorème d'Ampère.....	4
I.3.2.1. Enoncé du Théorème d'Ampère généralisé.....	4
I.3.3. Lois de l'induction électromagnétique.....	5
I.3.3.1. Loi de Faraday.....	5
I.3.3.1. Loi de Lenz.....	6
I.3.4. Equations de Maxwell	6
I.3.4.1. Enoncé	6
I.3.4.2. Principales propriétés.....	7
I.3.4.3. Conservation de la charge	7
I.3.5. Lois du comportement des milieux	8
I.3.5.1. Loi d'ohm	8
I.3.5.2. Relations magnétique.....	8
I.3.5.3. Relation diélectrique	9
I.3.6. Conditions de transmission.....	9
I.3.7. Conditions aux limites	10
I.3.7.1. Condition de DIRICHLET	10
I.3.7.2. Condition de NEWMANN	10
I.3.8. Formulations utilisant le vecteur champ magnétique \vec{A}	11
I.3.8.1. Modèle magnétostatique	11
I.3.8.2. Modèle magnétodynamique.....	11
I.4. Conclusion	13

Chapitre II : Généralités sur le Contrôle Non Destructif

II.1. Introduction	14
II.2. Historique	14
II.3. Principe de la détection d'un défaut	15
II.4. Principales Méthodes du CND.....	15
II.4.1. Examen Visuel	16
II.4.2. Contrôle par ressuage.....	16

II.4.2.1. Application pratique du ressuage.....	17
II.4.3. Contrôle par magnétoscopie	18
II.4.3.1. Champ d'application ; Avantages et limites.....	18
II.4.4. Contrôle par Ultrasons	19
II.4.4.1. Champ d'application	19
II.4.5. Contrôle par Radiographie (radiologie industrielle)	20
II.4.5.1. Champ d'application	20
II.4.6. Contrôle par émission acoustique	21
II.4.6.1. Domaines d'applications.....	22
II.4.7. Contrôle par thermographie	22
II.4.8. Contrôle par courants de Foucault	23
II.4.8.1. Principes	23
II.4.8.2. Principaux paramètres d'influence	23
II.4.8.3. Analyse de la phase d'excitation	24
II.4.8.3.1. Modes d'excitation.....	25
a) Gammes de fréquences	25
b) Excitation mono fréquence	26
c) Excitation multifréquences	26
d) Excitation pulsées	27
II.4.8.4. Analyse de la phase de perturbation	27
II.4.8.5. Analyse de la phase de révélation	28
II.4.8.5.1. Capteurs	28
a) Différents types de capteurs et leur montage.....	29
b) Fonctions du capteur	29
c) Mode de contrôle	31
II.4.8.6. Matériaux à inspecter	32
II.4.8.6.1. Epaisseur de peau	32
II.4.8.6.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau à contrôler	33
II.4.8.6.3. Caractéristiques géométriques du matériau à contrôler	34
II.4.8.6.4. Défauts	34
II.4.8.6.5. Eléments perturbateurs	35
II.4.8.7. Visualisation.....	35
II.4.8.7.1. Impédance normalisée	35

III.B.1. Introduction	50
III.B.2. Historique	50
III.B.3. Les réseaux de neurones.....	51
III.B.3.1. Neurone Biologique	51
III.B.3.2. Neurone Artificiel	51
III.B.3.3. Architecture des Réseaux de Neurones	53
III.B.3.3.1. Les réseaux de neurones non bouclés	54
III.B.3.3.1.1. Les réseaux de neurones complètement connectés	54
III.B.3.3.1.2. Les réseaux de neurones à couches	54
III.B.3.3.2. Les réseaux de neurones bouclés	55
III.B.3.3.2.1. Forme canonique des réseaux récurrents.....	56
III.B.3.4. Structure d'Interconnexion.....	56
III.B.3.4.1. Réseaux monocouche	56
a) <i>Le mode Perceptron</i>	57
b) <i>Le mode Adaline</i>	58
III.B.3.4.2. Réseaux multicouches	58
III.B.3.4.3. Réseaux multicouche à connexions locales	69
III.B.3.4.4. Réseaux à connexions récurrentes	60
III.B.3.4.5. Réseaux à connexions complexes ;(Réseau d'Hopfield)	60
III.B.3.4.6. Perceptron Multicouches	61
III.B.3.4.6.1. Principe et architecture	61
III.B.3.5. Apprentissage des réseaux de neurones	62
III.B.3.5.1. Types d'Apprentissage des réseaux de neurones	63
III.B.3.5.1.1. Apprentissage supervisé	63
III.B.3.5.1.2. Apprentissage non supervisé	63
III.B.3.5.1.3. Apprentissage renforcé	64
III.B.3.5.2. Algorithme d'Apprentissage	64
III.B.3.5.2.1. Algorithme de rétro propagation du gradient.....	64
a) Principe de la rétropropagation	65
b) Adaptation des poids	65
c) Algorithme de la rétropropagation	65
III.B.3.5.2.2. L'algorithme de Leveberg-Marquardt	67
III.B.3.5.2.3. Méthode Quasi-newton	68

III.B.3.5.3. Les Algorithmes génétiques	68
III.B.4. Mise en œuvre des réseaux de neurones et domaines d'applications	69
III.B.5. Conclusion	71

Chapitre IV : Application et validation

IV.1. Introduction	72
IV.2. calcul du problème direct.....	72
IV.2.1. Application (1).....	72
IV.2.1.1. Structure Géométrique	72
IV.2.1.2. Propriétés Physique	72
IV.2.1.3. Domaine de résolution et Conditions aux limites	73
IV.2.1.4. Maillage du domaine	73
IV.2.1.5. Résultats et Interprétations	74
IV.2.1.5.1. Représentation du potentiel vecteur magnétique A	74
IV.2.1.5.2. Représentation de potentiel vecteur magnétique A sur une droite.....	75
IV.2.1.5.3. Représentation de l'induction magnétique B	75
IV.2.1.5.4. Calcul de l'impédance à travers l'induction ou le flux magnétique	76
IV.2.1.5.5. Représentation de la variation de l'impédance en fonction du déplacement	76
IV.2.1.5.6. Représentation de la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les fréquences ; 50 KHz, 100 KHz et 150 KHz.....	77
IV.2.2. Application (2).....	77
IV.2.2.1. Structure Géométrique	77
IV.2.2.2. Maillage du domaine	78
IV.2.2.3. Résultats et Interprétations	78
IV.2.2.3.1. Représentation du potentiel vecteur magnétique A	78
IV.2.2.3.2. Représentation de potentiel vecteur magnétique A sur une droite	79
IV.2.2.3.3. Représentation du champ magnétique H	80
IV.2.2.3.4. Représentation de la variation de l'impédance en fonction du déplacement	80

IV.2.2.3.5. Représentation de la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les fréquences ; 50 KHz, 100 KHz, 150 KHz et 300 KHz	81
IV.3. Traitement des problèmes inverses	82
IV.3.1. Evaluation de la profondeur du défaut	82
IV.3.1.1. Application (1)	82
IV.3.1.2. Application (2)	85
IV.4. Conclusion	86
Conclusion générale.....	87

***I**ntroduction
Générale.*

Le monde dans lequel nous vivons voit naître des systèmes dont la complexité s'accroît constamment. Avec le développement des nouvelles technologies et de leur utilisation dans les nouveaux produits, les fonctions de conception et de maintenance engendrent des tâches qui requièrent des niveaux de qualification de plus en plus élevés.

Par leurs possibilités de détection, de reconnaissance et de dimensionnement de défauts isolés dans un matériau ainsi que d'estimation de ses caractéristiques microstructurales et propriétés d'emploi, les techniques de contrôle non destructif font partie des outils incontournables de l'évaluation de la qualité et de la fiabilité des produits et des installations industrielles [19].

La mise en application d'une méthode de contrôle non destructif nécessite l'interprétation et/ou l'exploitation des différents résultats qu'elle fournit. Il est donc indispensable de bien maîtriser l'outil permettant cette exploitation/interprétation, cette dernière pouvant simplement être menée grâce au savoir faire du manipulateur/expérimentateur. Différents outils mathématiques peuvent toutefois être utilisés, à priori beaucoup moins soumis à la subjectivité de ce dernier.

Une démarche classique consiste à utiliser les méthodes inverses. Il s'agit alors de comparer un modèle de comportement aux mesures effectuées. Il est ainsi possible de remonter aux propriétés ou paramètres considérés en s'assurant simplement que l'écart entre les mesures et le modèle est négligeable.

Cette approche nécessite une connaissance parfaite du système étudié et la possibilité d'exploiter cette connaissance pour le modéliser finement, sous peine de ne pas identifier correctement les différentes propriétés recherchées. Des modèles paramétriques peuvent être envisagés. Cependant, leur capacité de généralisation est souvent très limitée.

Une solution est alors d'avoir recours à des outils permettant de développer des modèles à partir d'exemples (ou cas d'espèce) et qui sont ensuite capables de généraliser en exploitant l'information apprise. Ces outils, les réseaux de neurones artificiels et les systèmes neuro-flous, appartiennent au domaine de l'intelligence artificielle (IA). Ces systèmes permettent par ailleurs une prise en compte fine de la connaissance experte. Enfin, les possibilités offertes par les algorithmes génétiques sont en cours d'étude.

Structure de ce mémoire :

Ce mémoire est décomposé en Quatre chapitres. Le premier chapitre est dédié à la présentation des phénomènes électromagnétiques. Ce chapitre est destiné à présenter les lois fondamentales de l'électromagnétisme, les lois du comportement des milieux ainsi que les conditions aux limites.

Les notions générales du contrôle non destructif (CND), constituent le deuxième chapitre. Les principes de base, les conditions de mise en œuvre et les champs d'applications des techniques utilisant l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les Ultrasons, la radiographie, l'émission acoustique et la thermographie ont été présentés superficiellement contrairement à la technique utilisant les courants de Foucault qui est présentée avec détails.

Le troisième chapitre est constitué de deux parties : la première est dédié à la présentation des différentes méthodes de traitement et de modélisation des problèmes directs, à savoir ; les méthodes analytiques, les méthodes expérimentales et les méthodes numériques. On cite pour ces dernières la méthode des intégrales de frontière (BEM), la méthode des différences finies (FDM) et la méthode des éléments finis (FEM). . . etc. Parmi toutes ces approches, la méthode des éléments finis sera largement détaillée, étant donné qu'elle est considérée comme la plus adaptée pour la modélisation et le traitement des problèmes directs ainsi que des phénomènes électromagnétiques. Quant à la deuxième, elle est consacrée aux méthodes de traitement des problèmes Inverses « réseaux de neurones ».

Dans le dernier chapitre nous allons mettre en œuvre les réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts, à partir des valeurs de la variation de l'impédance du capteur.

Et enfin nous clôturons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

*P*hénomènes
Electromagnétiques.

I.1. Introduction :

Le magnétisme est l'une des plus anciennes disciplines de la physique. Depuis l'antiquité où nos ancêtres avaient déjà reconnu les propriétés particulières de la pierre aimant, les phénomènes magnétiques ont toujours retenu l'attention notamment en raison de leur action à distance. On les trouve partout, au quotidien depuis la fermeture des porte jusqu'aux suspensions des trains à grande vitesse, et à toutes les échelles de dimension depuis les particules élémentaires jusqu'aux amas de galaxies en passant par la terre.

I.2. Développement historique :

Le mot « *magnétisme* » provient du mot *magnétite* « pierre aimant » qui est constituée spécialement d'un oxyde de fer naturel Fe_3O_4 (c'est pourquoi on appelle ce type de matériaux ferromagnétique). Il semblait que l'on est trouvé ce minerai magnétique pour la première fois à proximité de la cité Thessalonique de Magnésie, les restes de cette ville se trouve dans l'actuelle Anatolie occidentale (Turquie). Aristote parla aussi de l'aimantation du fer doux [1].

Au dix-huitième siècle, *Benjamin Franklin* découvrit la nature électrique de la foudre (1752). Or, il y avait déjà à cette époque de nombreux témoignages de marins attirant l'attention sur des faits étranges, on cite :

- La perturbation des boussoles par les orages.
- L'aimantation de tous les objets métalliques d'un navire frappé par la foudre.

Franklin déduisit " la possibilité d'une association de nature entre les phénomènes électrique et magnétique". Les premières études quantitatives sont dues à *Charles augustin coulomb*.

L'étude quantitative des interactions entre aimants et courants fut faite par les physiciens *Jean-Baptiste Biot* et *Félix Savart* (1820). Une aiguille aimantée suspendue à un fil de coton et rendue sensiblement astatique par un aimant convenablement placé, fut mise en regard d'un courant rectiligne très long faisant partie d'un circuit très étendu [2].

Pierre Simon Laplace déduisit ce qu'on appelle aujourd'hui la loi de Biot et Savart.

Si l'élaboration de la théorie électromagnétique débuta en 1820 avec *Oersted*, elle ne fut mise en équations par *James Clerk Maxwell* qu'en 1873 en passant par *Ampère*, *Arago*, *Faraday*, *Foucault*, *Henry*, *Lenz*, *Weber*, *Helmholtz*, *Hertz*, *Thomson*, *Lorentz* et bien d'autres [2] et ne trouva d'interprétation et clarification satisfaisante qu'en 1905 dans le cadre de la relativité d'*Einstein* dont le postulat fondamental s'énonce ainsi : « *il est impossible de détecter physiquement le mouvement uniforme d'un repère au moyen d'observations faites entièrement à l'intérieur de ce repère* » ce postulat de base de l'électromagnétisme signifie que toutes les lois de la nature doivent être invariantes lors du passage d'un repère à un autre.

I.3. Lois générales de l'électromagnétisme:

I.3.1. Flux du champ magnétique :

Le mot flux est associé fréquemment à la notion de débit ou d'écoulement [3]. On peut, comme pour tout champ de vecteur, définir le flux du champ magnétique \vec{B} à travers une surface orientée S (Fig I.1) par la relation :

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{ds} \tag{I.1}$$

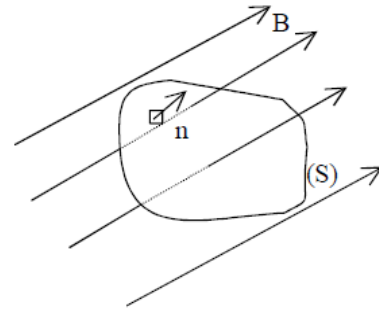


Fig.(I.1) : Ligne de champs magnétique \vec{B} Traversant une surface S

C'est une grandeur physique mesurable caractérisant l'intensité et la répartition spatiale du champ magnétique. Son unité d'expression dans le système MKSA est le Weber (W).

I.3.2. Circulation du champ magnétique, Théorème d'Ampère :

La notion de circulation s'introduit tout naturellement lorsqu'on examine le travail d'une force qu'il faut déplacer (faire circuler) d'un point A à un point B le long d'une courbe (Γ).

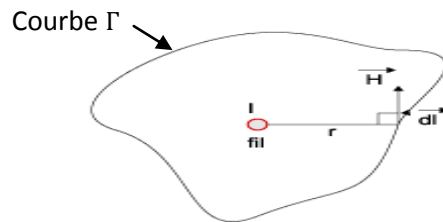


Fig.(I.2) : Circulation du champs magnétique créer par un fil infini le long d'un contour (Γ) fermé

I.3.2.1. Enoncé du Théorème d'Ampère généralisé:

Une semaine après l'exposé d'Oersted, André marie Ampère (1775-1836) donna l'explication de ce que celui-ci avait observé. Il prit comme objet élémentaire le fil conducteur parcouru par un courant électrique (ou, plus exactement, une portion infime de ce fil) et ramena le problème du magnétisme à celui de l'interaction entre fils électriques. Si un fil est susceptible d'agir sur un aimant, c'est parce qu'un aimant est au fond lui-même équivalent à une multitude de boucles (Spires) de courants élémentaires. Ampère trouvait ainsi la clé de l'ensemble des phénomènes magnétiques observés, mettant le doigt sur l'origine commune des phénomènes magnétiques et électriques [3] : le magnétisme résulte simplement de la présence de courants électriques, c'est-à-dire du déplacement de charges électriques. Il énonça alors son théorème comme suit :

La circulation du champ magnétique \vec{B} le long d'un contour orienté (Γ) appelé contour d'Ampère, est égal au produit par la constante μ_0 de la somme algébrique des courants I_{int} qui traversent la surface délimitée par le contour (Γ) [4], le signe du courant étant défini par rapport à l'orientation positive de la normale \vec{n} au contour. La circulation ne dépend pas de dimension du circuit [3].

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_{int} \quad (I.2)$$

La circulation de \vec{B} sur une courbe fermée est donc directement liée au courant qui traverse la surface délimitée par cette courbe.

Le choix du sens de la circulation sur le contour d'Ampère choisi, est purement arbitraire. Une fois ce choix fait, la règle de l'observateur d'Ampère ou du tire bouchon permet d'attribuer un signe aux courants qui traversent la surface ainsi délimitée [3]

I.3.3. Lois de l'induction électromagnétique :

L'induction électromagnétique souvent appelée Induction, repose sur la force de Lorentz. En effet, les électrons libres d'un conducteur placé dans un champ magnétique subissent cette force s'il y a déplacement.

Michael Faraday (Anglais/ 1792-1867) étudia ces phénomènes déjà observés et suite à de nouvelles expériences formula en 1831 la loi de *l'induction électromagnétique* [3].

Faraday réalise plus de douze situations expérimentales, donnant toute le même résultat, et qui stipule que : quand le flux de \vec{B} à travers une boucle change, il apparaît dans cette boucle un courant électrique. Par conséquent cette variation de flux entraîne l'apparition dans la boucle d'une "force électromotrice" [4].

I.3.3.1. Loi de Faraday :

Les phénomènes d'inductions prennent naissance dans un circuit électrique traversé par des flux ϕ variables dans le temps : une variation temporelle de ϕ fait apparaître dans le circuit une f.é.m e donnée par la loi de Faraday [3].

La f.é.m induite dans un circuit fermé est égale à l'opposé de la dérivée par-rapport au temps du flux magnétique à travers ce circuit :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (I.3)$$

Cette relation (loi fondamentale de l'électromagnétisme) est valable quelque soit la cause de la variation du flux que ce soit un circuit fixe dans un champ variable, un circuit mobile dans un champ permanent, un champ dû à des courants ou à des aimants, ou qu'il y ait superposition de tous ces aspects [3].

I.3.3.1. Loi de Lenz :

Cette loi qui tient son nom de Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), précise le sens du courant induit (l'expression du signe « - » contenu dans la loi de Faraday (I.3)) et s'énonce ainsi :

" *La force électromotrice induite tend à produire un courant de sens tel que le flux qu'il envoie à travers le circuit s'oppose à la variation du flux qui lui donne naissance*" [3].

En effet, si on considère une boucle conductrice plongée dans un champ magnétique et si le flux varie au cours du temps, il apparaît dans la boucle une force électromotrice et un courant électrique par induction [3].

La loi de Lenz peut être appliquée en utilisant la règle du tire bouchon : si le pouce indique le sens de \vec{B} induit, alors les quatre autres doigts courbés vers l'intérieur de la main indiquent le sens du courant induit.

Des lignes de champs magnétiques fermés encerclent le courant induit. Des lignes de champ électrique fermées encerclent à leur tour ces lignes d'induction, puis elles sont elles-mêmes à nouveau encerclées par des lignes de champ magnétique et ainsi de suite [3].

I.3.4. Equations de Maxwell :

Les équations de Maxwell constituent l'outil de base de tout ceux qui ont à appliquer ou développer l'électricité : génération et transmission de puissance, composants électronique, radio, hyperfréquence, communications optiques, lasers etc. elles sont au cœur de certaines découvertes modernes parmi les plus passionnantes, telles que lasers et fibres optiques. Il n'y a guère de doute sur d'autres découvertes, futures, soient elles aussi directement basées sur la compréhension des équations de Maxwell [5].

I.3.4.1. Enoncé :

Considérons dans un référentiel galiléen \mathcal{R} la densité volumique de charge ρ et la densité de courant \vec{j} , en un point M de l'espace et à l'instant t .

En ce même point M, et à ce même instant t , le champ électromagnétique satisfait aux équations locales suivantes appelées *équations de Maxwell* [6]:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Maxwell-Gauss}) \quad (\text{I.4})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Maxwell-Faraday}) \quad (\text{I.5})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Flux magnétique}) \quad (\text{I.6})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Maxwell-Ampère}) \quad (\text{I.7})$$

Les équations (I.5) et (I.6) ne font pas intervenir les sources ρ et \vec{j} . Elles sont intrinsèques. Et les équations (I.4) et (I.7) expriment la liaison entre les champs et les sources.

I.3.4.2. Principales propriétés:

- L'équation de Maxwell-Gauss (I.4) est équivalente, en appliquant le théorème de Green Ostrogradski, au fait que le flux du champ électrique sortant d'une surface fermée est égal à $\frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$ où Q_{int} est la somme algébrique des charges intérieures à cette surface [6].

De l'équation de (I.4), il résulte la relation intégrale suivante :

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (I.8)$$

Où S désigne une surface fermée orientée vers l'extérieure.

- L'équation de Maxwell-Faraday (I.5) est équivalente, en appliquant le théorème de Stokes, au fait que la circulation de \vec{E} le long d'une courbe fermée C est égale à la dérivée par-rapport au temps du flux \vec{B} à travers une surface s'appuyant sur C.

La forme Intégrale de l'équation (I.5) est donnée comme suit :

$$\oint_C \vec{E} \cdot \vec{dl} = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (I.9)$$

Où C est un contour fermée et S une surface orientée s'appuyant sur le contour C.

L'une des conséquences de cette équation est l'existence d'une f-é-m induite (loi de Faraday (équation I.3)) dans un circuit conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps.

- L'équation du flux magnétique (I.6), est équivalente en appliquant le théorème de Green-Ostrogradski, au fait que le flux du champ magnétique traversant toute surface fermée orientée est nul. Cela exclut en particulier l'existence de « monopoles magnétiques ».

- L'équation de Maxwell-Ampère (I.7), est équivalente, en utilisant le théorème de Stokes, au fait qu'un champ électrique variable dans le temps est source de champ magnétique.

Le terme $\vec{J}_D = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ est appelé densité de courant de déplacement.

I.3.4.3. Conservation de la charge :

En utilisant les équations (I.1) et (I.4), on établit la relation suivante :

$$\overrightarrow{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (I.10)$$

I.3.5. Lois du comportement des milieux :

Les inductions et les champs sont reliés entre eux par les lois de comportement qui expriment les propriétés des matériaux, ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu [7] [8] :

I.3.5. 1. Loi d'ohm :

Dans le cas des *conducteurs*, on peut supposer une variation linéaire de la densité de courant électrique de conduction en fonction du champ électrique [9]:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.11})$$

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

C'est la loi d'Ohm relative aux conducteurs immobiles. Lorsque le conducteur se déplace à la vitesse V , la relation (I.11) devient :

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + v \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.12})$$

Dans les conducteurs, la conductivité électrique σ est positive ; elle est nulle dans les diélectriques parfaits. La valeur de σ dépend du matériau.

Dans le cas des *générateurs*, la densité de courant est supposée connue \vec{J}_s , fixée et donc indépendante du champ électromagnétique et où la loi d'Ohm (I.11) ne s'applique plus. Il est alors commode de supposer $\sigma = 0$ dans le générateur et d'écrire une loi d'Ohm généralisée valable dans les différents milieux (conducteur, générateur) :

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + v \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \quad (\text{I.13})$$

Dans le cas d'un générateur, le terme $\sigma(\vec{E} + v \wedge \vec{B})$ s'annule alors que dans le cas d'un conducteur passif immobile, seule la partie $\sigma \vec{E}$ est conservée.

I.3.5.2. Relations magnétiques :

L'expérience montre que sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante ; chaque élément de volume est le siège d'un moment magnétique qui représente la polarisation de la matière. Dans le cas idéal, cette polarisation magnétique est proportionnelle au champ magnétique. Elle est représentée par l'intensité d'aimantation M [9] :

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (\text{I.14})$$

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (\text{I.15})$$

χ : \rightarrow Est la susceptibilité magnétique du matériau.

La relation entre le vecteur induction \vec{B} et le vecteur champ magnétique \vec{H} est donnée par :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi) & \text{(a)} \\ \vec{B} = \mu_0\vec{H}(1 + \chi) & \text{(b)} \\ \vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} & \text{(c)} \end{cases} \quad \text{(I.16)}$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$: \rightarrow La perméabilité magnétique absolue [H.m^{-1}].

μ_0 : \longrightarrow La perméabilité magnétique du vide [H.m^{-1}] ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$)

$\mu_r = (1 + \chi)$: \rightarrow La perméabilité magnétique relative.

I.3.5.3. Relation diélectrique :

La relation entre le vecteur induction électrique \vec{D} et le vecteur champ électrique est donnée par la relation suivante [7] :

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} & \text{(a)} \\ \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(I.17)}$$

ϵ La permittivité électrique absolue [F.m^{-1}].

ϵ_0 La permittivité électrique du vide [F.m^{-1}] ($\epsilon_0 = 10^{-39}/36\pi$).

ϵ_r Permittivité électrique relative.

I.3.6. Conditions de transmission :

Les champs subissent des discontinuités à l'interface entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de passage permettent d'exprimer des relations de continuité sur les composantes de ces champs [7].

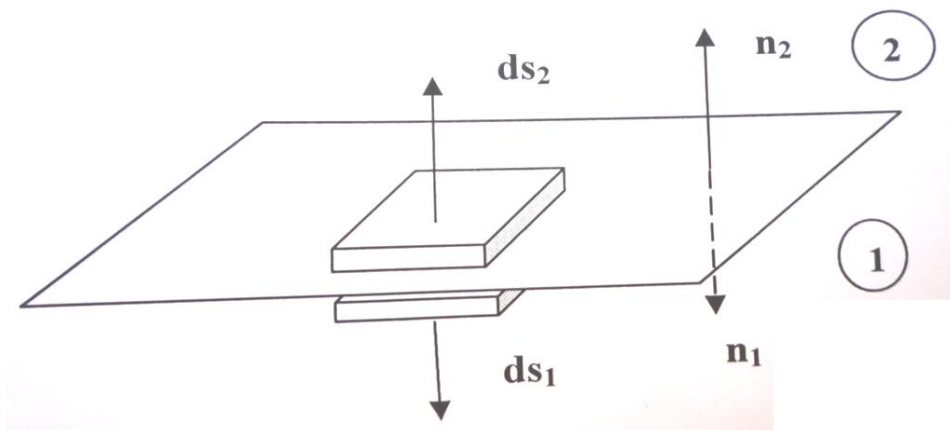


Fig (I.3) : Interface entre les milieux 1 et 2 avec propriété différentes.

En appliquant les équations de Maxwell sous leurs formes intégrales à la surface de séparation des deux milieux on obtient :

- Conservation de la composante normale du vecteur inducteur magnétique \vec{B} .

$$n \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{I.18})$$

- Conservation de la composante tangentielle du vecteur champ électrique \vec{E} .

$$n \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{I.19})$$

- La composante tangentielle du vecteur champ magnétique \vec{H} est discontinue lorsque la conductivité du milieu est infini (l'existence des courants surfaciques).

$$n \cdot (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = K \quad (\text{I.20})$$

- La composante normale du vecteur déplacement électrique \vec{D} n'est pas continue.

$$n \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{I.21})$$

K, ρ_s et n Sont respectivement la densité des courants surfacique, la densité de charge surfacique et le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux.

I.3.7. Conditions aux limites :

I.3.7.1. Condition de DIRICHLET :

Cette condition nous renseigne sur la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière extérieure du domaine de résolution (limite).

$$U = g_0 \quad (\text{I.22})$$

U est l'inconnue du problème et la constante g_0 représente la valeur de l'inconnue sur la frontière.

I.3.7.2. Condition de NEWMANN :

Cette condition nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite de domaine étudié. Elle permet de déduire qu'il existe un plan de symétrie dans le domaine d'étude lorsque la valeur de cette dernière est nulle [7].

$$\frac{\partial U}{\partial n} = h_0 \quad (\text{I.23})$$

$h_0 \rightarrow$ Constante ou nulle.

I.3.8. Formulations utilisant le vecteur champ magnétique \vec{A} :

Les équations de Maxwell telles qu'elles sont posées se prêtent mal à une résolution numérique. Pour les problèmes de symétrie de révolution on utilise généralement une formulation en potentiel vecteur magnétique [7].

I.3.8.1. Modèle magnétostatique :

En magnétostatique, le champ est produit par des sources de courant indépendantes du temps.

A partir de l'équation du Flux magnétique (I.6) on peut écrire :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Il existe un potentiel vecteur magnétique } \vec{A} \text{ tel que } \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$$

Par ailleurs nous avons l'équation $\vec{B} = \mu \vec{H}$, et en utilisant l'équation de Maxwell-Ampère (1.7) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{j}$$

Sachant que :

$$\vec{j} = \vec{j}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

On a :

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

Donc :

$$\vec{j} = \vec{j}_s$$

Finalement on donne l'équation magnétostatique en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} pour un milieu de perméabilité μ et alimenté par une densité de courant \vec{j}_s :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} = \vec{j}_s \quad (\text{I.24})$$

I.3.8.2. Modèle magnétodynamique :

Dans le cas où les sources dépendent du temps, le terme $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ (I.5) n'est donc pas nul. Les champs magnétiques et électriques sont couplés par la présence des courants induits

En remplaçant \vec{B} par $\vec{\nabla} \wedge \vec{A}$, l'équation (I.6) devient :

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

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

$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \Rightarrow$ Il existe un potentiel scalaire électrique V tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \Rightarrow \quad \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \quad (\text{I.25})$$

La combinaison des équations (I.11) et (I.25) et (I.13) nous donne :

- Pour un milieu en mouvement :

$$\vec{j} = -\sigma \left\{ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right\} + \sigma (\mathbf{v} \wedge \vec{B}) + \vec{j}_s \quad (\text{I.26})$$

Avec $\vec{j}_s = -\sigma \nabla \vec{V}$

$$\vec{j} = -\sigma \left\{ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - (\mathbf{v} \wedge \vec{B}) \right\} + \vec{j}_s \quad (\text{I.27})$$

\vec{j}_s Est imposée dans l'inducteur et nulle ailleurs.

$$\vec{j}_{ind} = -\sigma \left\{ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - (\mathbf{v} \wedge \vec{B}) \right\} \quad (\text{I.28})$$

$$\vec{j}_s = -\sigma \nabla \vec{V} \quad (\text{I.29})$$

En adaptant la notation $\frac{\overline{DA}}{Dt} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - (\mathbf{v} \wedge \vec{B})$ l'équation (I.27) devient :

$$\vec{j} = -\sigma \left\{ \frac{\overline{DA}}{Dt} \right\} + \vec{j}_s \quad (\text{I.30})$$

En remplaçant \vec{j} par son expression dans l'équation (I.7), on aboutit ainsi à l'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique \vec{A} , donnée par le système d'équations suivant :

$$\nabla \wedge (\mathbf{v}(\nabla \wedge \vec{A})) + \sigma \left(\frac{\overline{DA}}{Dt} \right) = \vec{j}_s \quad (\text{I.31})$$

- Cas 2D cartésien :

Dans le cas des coordonnées cartésiennes, le potentiel vecteur magnétique \vec{A} à une seule composante suivant z. $\vec{A} = (0, 0, A_z)$.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} \right) = -j_{sz} \quad (\text{I.32})$$

- Cas 2D axisymétrique :

Dans une configuration axisymétrique (coordonnées cylindriques (r, φ, z)), la formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique offre l'intérêt suivant :

→ Le système présente une seule inconnue, la composante orthoradiale (\vec{A}_φ) du vecteur \vec{A} lorsque le courant est lui-même orienté suivant cette direction. $\vec{A} = (0, A_\varphi, 0)$. Et $\vec{j}_s = (0, j_{s\varphi}, 0)$.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{\partial z} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \frac{\sigma}{r} \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) = -j_{sz} \quad (\text{I.33})$$

I.4. Conclusion :

Une bonne connaissance de l'**électromagnétisme**, partie de la physique qui traite des relations entre les phénomènes électriques et magnétiques, est une des bases nécessaires à l'électrotechnicien ; nous nous sommes donc efforcés de présenter un exposé logique, précis, et utile sur les lois générales de l'électromagnétisme.

Chapitre II

*Généralités sur le Contrôle
non destructif.*

II.1. Introduction :

Le contrôle non destructif regroupe un ensemble de méthodes dont le but est de caractériser les structures testées sans que leur intégrité n'en soit affectée. L'idée est ainsi de déterminer un traceur de caractérisation qui peut être une propriété (physique, optique, thermique...) ou bien une grandeur scalaire dont on peut surveiller les variations relatives par rapport à une valeur de référence [10].

La localisation de défauts est aussi une application des méthodes de CND. Le principe est alors de procéder à des tests en différents points de la structure et de comparer les différentes valeurs du traceur obtenues. Une valeur différente des autres peut être la conséquence de la détection d'un défaut [10].

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 [11].

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication, ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [12]:

- La rapidité d'exécution : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des couts du travail de la main d'œuvre ou des frais de fonctionnement de l'usine.
- La fiabilité : le contrôle doit remplir son cahier de charges, comme détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- La reproductibilité : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- La sensibilité : c'est le rapport entre la variation de la mesure et la variation que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- Le cout : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un cout non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- La résolution : la résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.
- La possibilité d'inspection globale et locale : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée.

II.2. Historique :

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique.

Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures [11].

Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates-formes offshores. La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques [11].

II.3. Principe de la détection d'un défaut :

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée [11]:

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
- modulation ou altération de ce processus par les défauts.
- détection de ces modifications par un capteur approprié.
- traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...).

II.4. Principales Méthodes du CND:

Les méthodes de contrôle non destructif les plus couramment employées peuvent être classées en deux familles principales en fonction du type d'anomalie recherchée dans la pièce [13].

❖ Les méthodes de surface, (anomalies en surface extérieure) sont les suivantes :

- Examen visuel.
- Ressuage.
- Magnétoscopie.
- Courants de Foucault.

❖ Les méthodes volumétriques (anomalies au sein de la pièce) sont les suivantes :

- Ultrasons.
- Rayonnements ionisants.

D'autres méthodes existent et ont l'avantage d'être globales et en temps réel. Il s'agit en particulier de :

- La thermographie.
- L'émission acoustique.

II.4.1. Examen Visuel :

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle non destructif dont la mise en œuvre est souvent la plus simple et la plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs [11][13].

Il s'agit d'observer la surface d'un objet pour y déceler d'éventuelles anomalies. Cette observation nécessite une source de lumière d'intensité et de longueur d'onde compatibles avec l'aptitude naturelle de l'œil de l'opérateur exécutant l'examen.

Le processus mis en jeu (*Fig.II.1*) se décompose en trois phases essentielles :

- l'excitation, qui consiste à produire le faisceau lumineux de lumière blanche ou monochromatique.
- la perturbation, qui consiste à placer la pièce dans le champ optique du faisceau et à rechercher l'orientation la plus favorable à la mise en évidence d'éventuels défauts de surface.
- la révélation, qui consiste à placer l'œil dans le champ du faisceau réfléchi par la surface de la pièce. Des aides optiques telles que loupe, binoculaire, microscope, endoscope... sont possibles.

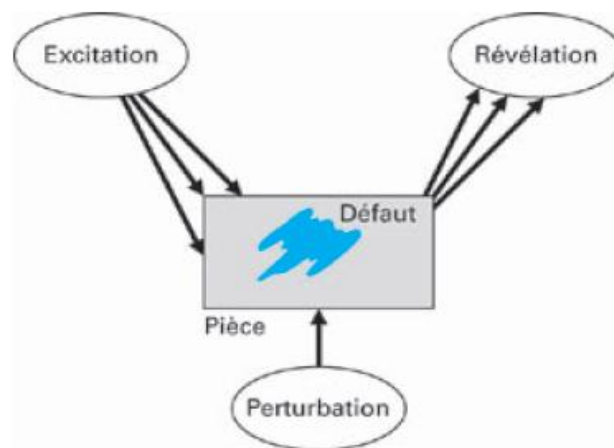


Fig. (II.1) : Processus mis en jeu lors d'un examen Visuel.

II.4.2. Contrôle par ressuage :

Le *ressuage* est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. L'imprégnation d'une fissure par un liquide, tirant profit de ses propriétés tensio-superficielles, conduit, par l'intermédiaire d'un ressuage avant l'observation visuelle, à un moyen de recherche de défauts de surface qui est parmi les plus anciens, les plus simples et les plus largement utilisés de nos jours [11].

Le contrôle non destructif par ressuage a pour objectif de détecter des défauts débouchant en surface sur des matériaux non absorbants (*Fig II.2*) [13].

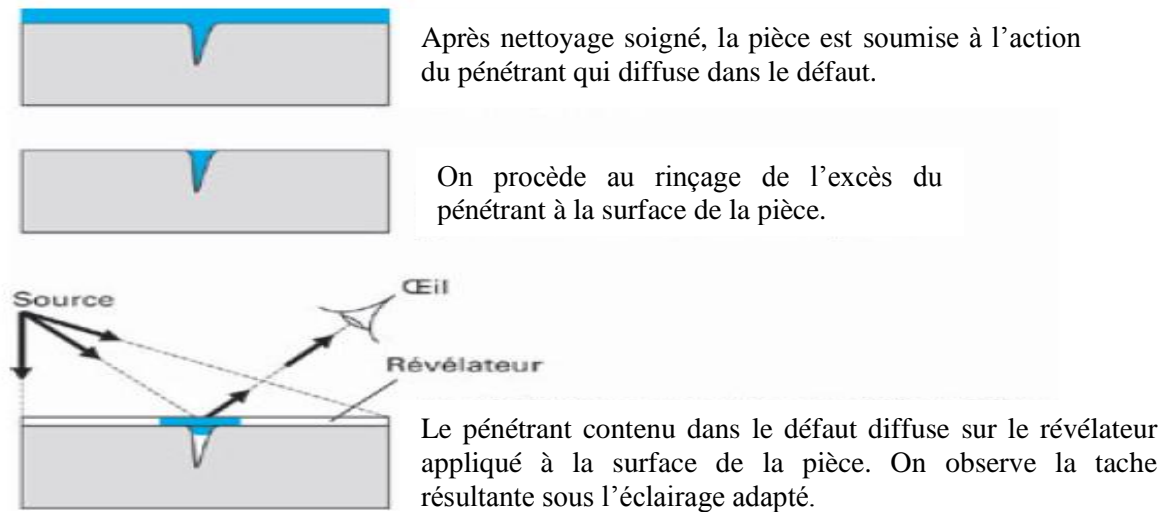


Fig.(II.2) : Principe de contrôle par ressuage.

❖ Le choix du produit pénétrant : on utilisera un produit d'autant plus sensible que la rugosité de surface est faible et que le matériau n'est pas poreux ; le classement dans l'ordre croissant des sensibilités, généralement admis, est le suivant :

- Produit coloré.
- Produit fluorescent pré-émulsionné.
- Produit fluorescent à post-émulsion ;

❖ la durée d'application : il est nécessaire de respecter les temps préconisés par le fabricant pour l'application considérée (généralement entre 15 et 30 min).

II.4.2.1. Application pratique du ressuage :

Le champ d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement (adsorption) avec le pénétrant [11].

Les limitations du procédé de ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface. Les défauts non débouchant ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peinture, oxydes, produits de lubrification mal éliminés par nettoyage. Le procédé lui-même est relativement lent (10 à 45 minutes), coûteux en temps et en personnel, pas facile à rendre totalement automatique, en particulier au niveau de l'élimination de l'examen visuel qui reste ainsi tributaire de l'acuité et de l'aptitude du contrôleur [11].

II.4.3. Contrôle par magnétoscopie :

Le contrôle non destructif par magnétoscopie a pour objectif de détecter les défauts de surface ou sous-jacents (Fig II.3) [13].

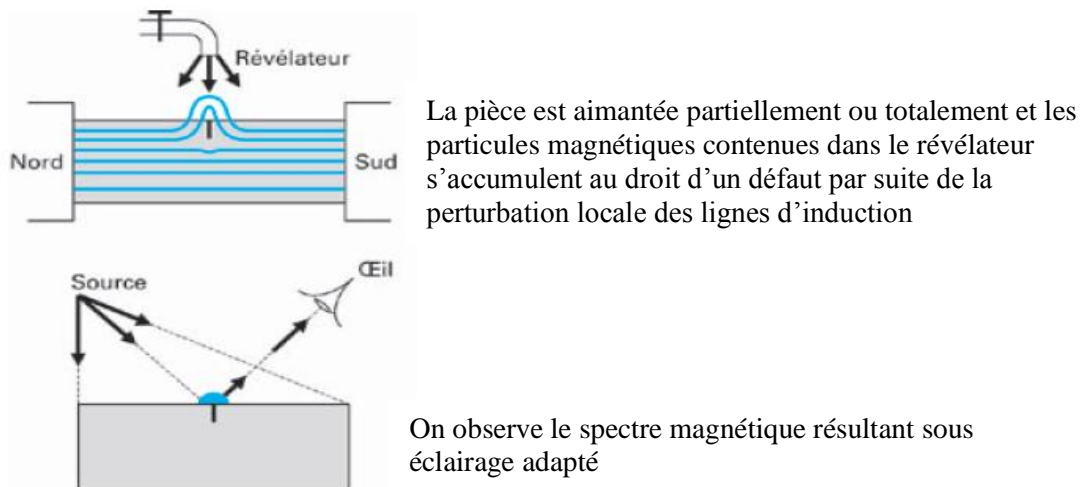


Fig (II.3) : Principe de la méthode de contrôle par magnétoscopie.

L'examen d'une pièce se déroule pratiquement en un seul temps, correspondant simultanément à la magnétisation, à l'apport du révélateur et à la lecture visuelle ; l'opération doit être répétée éventuellement en modifiant l'orientation du champ magnétisant, afin d'être sûr de détecter tous les défauts quelle que soit leur orientation. L'opération de contrôle doit être précédée d'une préparation de la pièce destinée à la mettre dans les conditions optimales d'examen : nettoyage, dégraissage, éventuellement démagnétisation préalable. Le contrôle sera lui-même suivi d'opérations de marquage, de repérage, éventuellement d'une démagnétisation [13].

La grande sensibilité de la magnétoscopie traditionnelle est altérée par un certain manque de fiabilité de l'inspection visuelle qui la caractérise et prend sa source dans la fatigue rapide de l'œil et les moments toujours possibles de distraction de l'opérateur. Pour les pièces de formes complexes, il n'est guère possible d'échapper à la procédure d'examen visuel ; par contre, pour les pièces de forme simple, et en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, il est possible de scruter la surface à l'aide de capteurs électriques sensibles aux faibles champs magnétiques, les capteurs de flux de fuite [13].

II.4.3.1. Champ d'application ; Avantages et limites :

Bien conduit, l'examen magnétoscopique se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface les plus ténus sur les pièces en acier et autres alliages ferromagnétiques. Le procédé, grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, s'adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées [11].

Une des faiblesses de la magnétoscopie est en effet sa faible productivité liée à la durée des manutentions et de l'examen visuel des surfaces [11].

II.4.4. Contrôle par Ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kilohertz (nettoyage) à plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique) [11].

La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques [11].

Les ultrasons sont émis au moyen de « transducteurs » qui fonctionnent le plus souvent par effet piézoélectrique (*Fig II.4*). On analyse la propagation d'ondes mécaniques de haute fréquence (quelques Mégahertz en général) au sein du matériau constitutif de la pièce à contrôler [13].

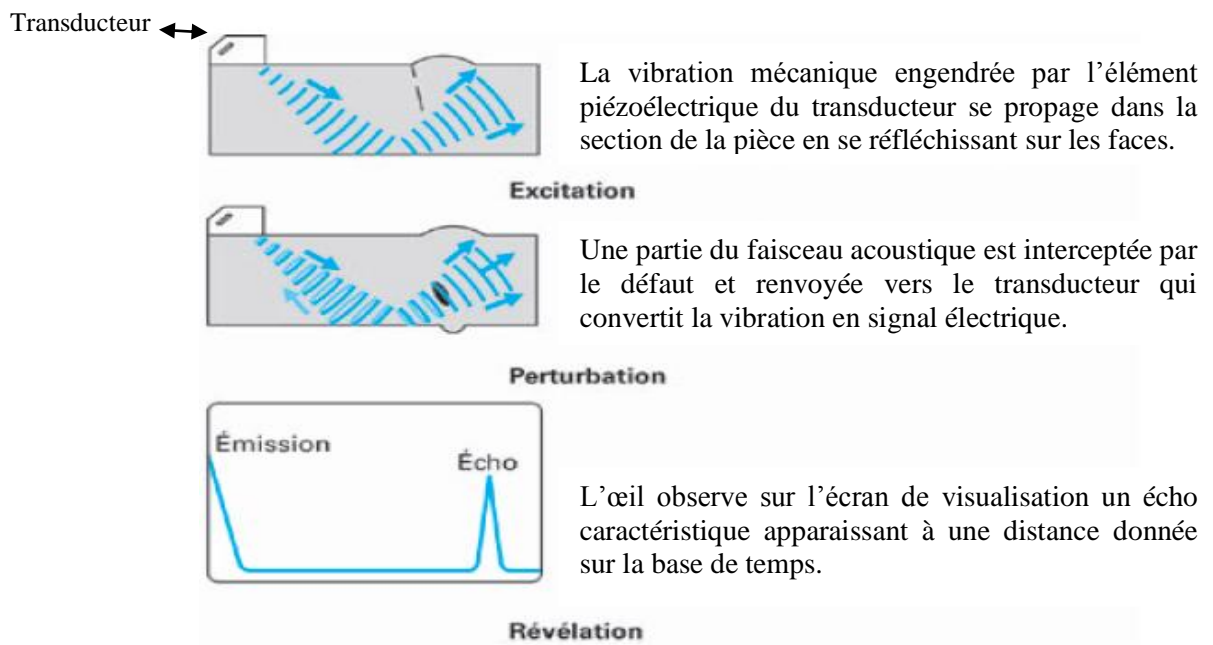


Fig. (II.4) : Principe du contrôle Ultrasons.

II.4.4.1. Champ d'application :

Le champ d'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, outre bien entendu le domaine médical, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques [11].

II.4.5. Contrôle par Radiographie (radiologie industrielle) :

La mise en œuvre d'un contrôle radiographique découle du schéma de principe de la (Fig II.5).

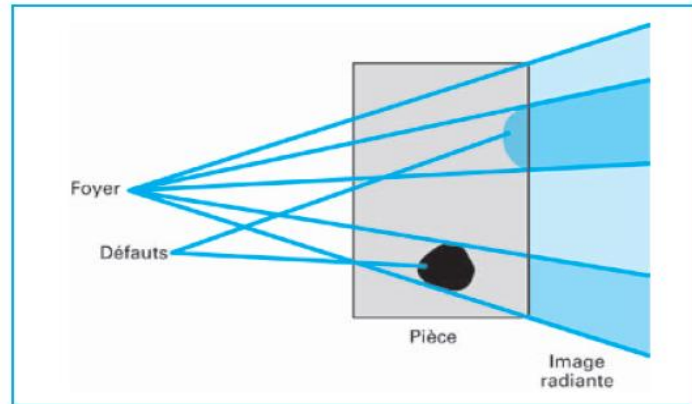


Fig.(II.5) : Principe du contrôle Radiographique.

L'examen de la structure ou de la santé interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau par un dispositif détecteur, sous forme d'une image sur un récepteur approprié [11] [13].

II.4.5.1. Champ d'application :

Le champ d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance. Traditionnellement, les domaines de prédilection du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manques de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce champ d'application hors des industries métallurgiques [11].

La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en radiographie, les épaisseurs contrôlées pouvant souvent être importantes [13].

La radiographie peut intervenir aussi bien pour la mise au point d'un procédé de fabrication que pour le contrôle d'un produit fini, qu'il soit mécanique, électronique ou alimentaire. Les applications sont nombreuses et concernent tous les domaines d'activité, allant de la chaudronnerie lourde à l'électronique, en passant par l'industrie alimentaire, les moyens mis en œuvre étant bien évidemment différents alors que le principe de base demeure le même [13].

II.4.6. Contrôle par émission acoustique :

L'Émission Acoustique (EA) est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation (*Fig II.6*).

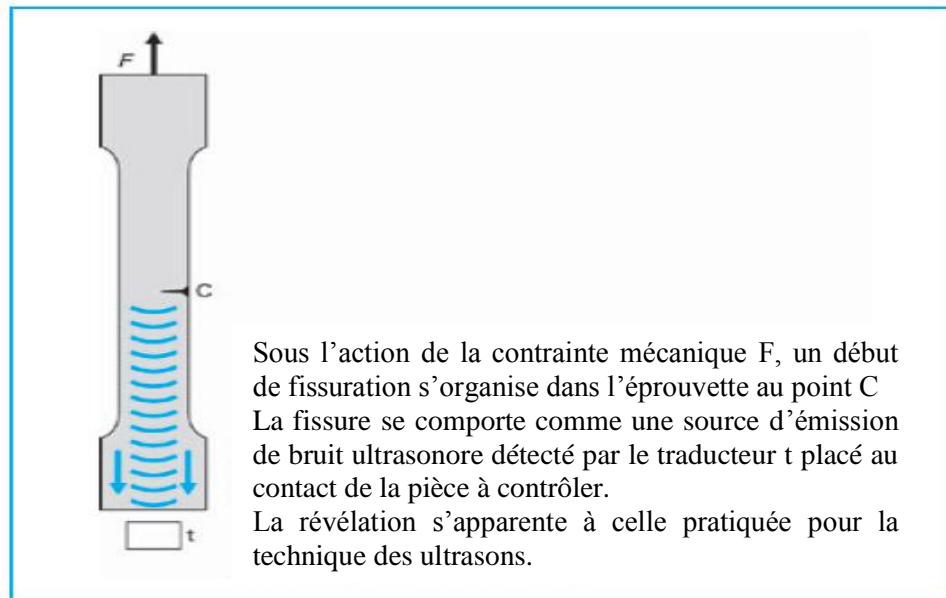


Fig (II.6) : Principe du contrôle par Emission Acoustique.

La détection et l'analyse des signaux permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts. La détection est réalisée par un capteur piézoélectrique avec une fréquence de 50 kHz à 1 MHz (généralement 50 à 500 kHz) [13].

L'émission acoustique diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif pour plusieurs raisons :

- le matériau génère lui-même le signal à analyser. Les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du matériau ont une importance prépondérante.
- un signal d'EA ne peut être obtenu que si la structure est sollicitée ; seuls les défauts actifs peuvent être détectés.
- l'EA peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité mais en aucun cas, l'EA ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...).
- une structure de grande dimension est contrôlable par l'EA en une seule opération au moyen d'un nombre limité de capteurs ; il n'est pas nécessaire que les zones critiques à contrôler soient accessibles directement.
- l'EA n'est pas simplement une technique de contrôle non destructif. Fondamentalement, il s'agit d'une technique de surveillance, puisque l'émission d'ondes de contrainte est étroitement associée aux mécanismes physiques qui accompagnent l'initiation et la propagation des défauts.

II.4.6.1. Domaines d'applications:

- * L'EA est utilisée comme une technique de mesure physique pour caractériser certaines propriétés des matériaux (ductilité, limite d'élasticité, etc.) ou pour classer différents matériaux (association fibre-matrice dans un composite, par exemple) en vue d'une application donnée.
- * L'EA peut en temps réel informer sur les écarts aux conditions nominales en cours de fabrication. De bons résultats ont été obtenus en surveillance de soudage, en surveillance d'outil pendant l'usinage ou le poinçonnage.
- * Examen non destructif ; C'est le domaine d'utilisation de l'EA le plus connu. Si dans certains pays, l'EA est pleinement acceptée comme méthode de contrôle non destructif, ce n'est pas le cas en Europe où elle est toujours considérée comme complémentaire par la plupart des praticiens et organisations en contrôle non destructif classique.
- * Surveillance en service : Ce domaine inclut l'inspection lors des épreuves périodiques, la surveillance en fonctionnement, la détection de fuite, le diagnostic de machines. Les potentialités de l'EA sont très vastes et quasiment uniques.

En effet, l'EA est l'une des seules techniques d'examen non destructif à pouvoir détecter l'initiation des défauts et surveiller leur propagation en fonctionnement. Les difficultés essentielles à surmonter sont le bruit de fonctionnement et les conditions d'environnement [13].

II.4.7. Contrôle par thermographie :

Le détecteur de la caméra présente une grande sensibilité. Cependant, la méthode est limitée dans ses applications. La source de chaleur à l'origine de l'excitation doit être aussi homogène que possible (*Fig II.7*). Le champ d'investigation est limité et une interprétation quantitative est souvent assez difficile [13].

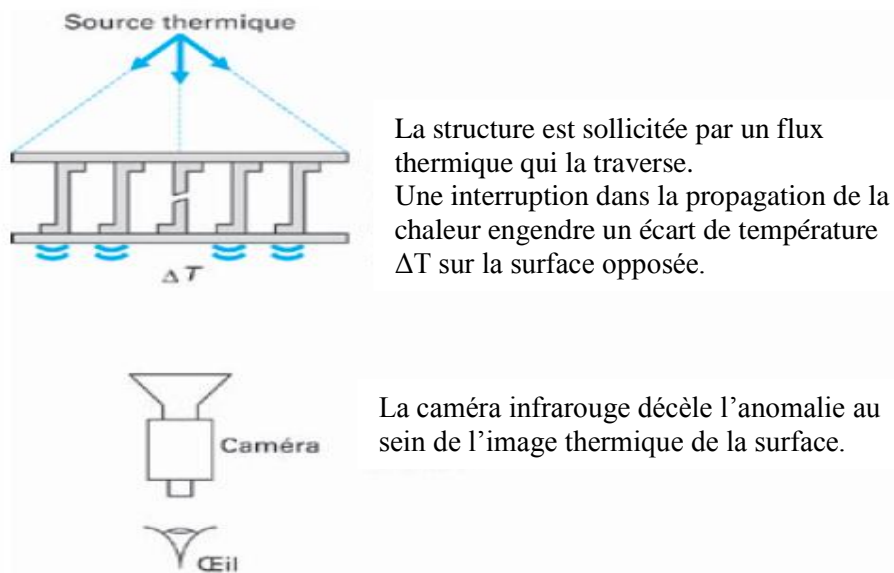


Fig.(II.7) : Principe du contrôle par thermographie.

II.4.8. Contrôle par courants de Foucault :

II.4.8.1. Principes :

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées, du point de vue électrique, en matériaux conducteurs. L'élément essentiel est le capteur. Celui-ci est une bobine où formé d'un ensemble de bobines [8].

Lorsqu'un matériau conducteur est placé à proximité d'une bobine dans laquelle circule un courant variable (alternatif sinusoïdal par exemple), il se crée au sein du matériau une circulation de courants induits appelés courants de Foucault. Les caractéristiques de ces courants dépendent des positions respectives des pièces et des conducteurs, des caractéristiques du matériau, conductivité, perméabilité, forme. Les courants de Foucault induisent eux-mêmes des courants soit dans une bobine placée à proximité, soit dans la bobine excitatrice elle-même (*Fig II.8a*). Si un défaut vient perturber la circulation des courants de Foucault, l'induction en retour sur la bobine excitatrice ou sur la bobine de mesure sera elle-même modifiée et l'impédance de cette bobine variera [14].

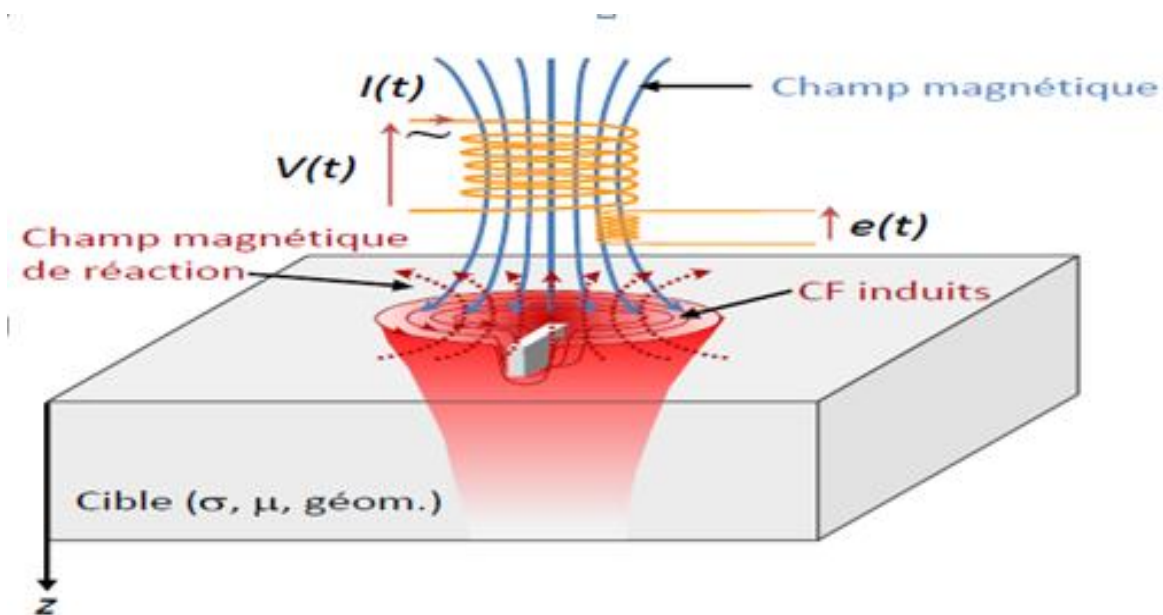


Fig. (II.8a) : Principe de contrôle par courants de Foucault.

II.4.8.2. Principaux paramètres d'influence :

Trois types de paramètres influent sur le contrôle par courants de Foucault [14] :

→ les paramètres liés au couplage entre la ou les bobines et le matériau : il s'agit dans le cas d'une bobine plate de la distance entre celle-ci et la surface du métal (entrefer ou lift off) et dans celui d'une bobine encerclante, du coefficient de remplissage, rapport entre section de la barre et celle de la bobine. Ces paramètres ont beaucoup d'influence sur les courants de Foucault.

→ les paramètres liés au matériau à contrôler : il s'agit de la conductivité électrique σ et la perméabilité magnétique μ et surtout, de leurs variations locales. Ces variations, souvent imprévisibles, ont une influence déterminante sur la circulation des courants de Foucault.

Leurs origines sont des plus diverses : présence de contraintes résiduelles importantes localement dues à la fabrication elle-même, zone localement décarburée ou recarburée.

→ les paramètres électriques liés au capteur et à son alimentation et constituant les paramètres de réglage du contrôle : fréquence d'excitation de la bobine et intensité de magnétisation.

II.4.8.3. Analyse de la phase d'excitation :

La pièce à contrôler est soumise à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps, de manière à induire des courants dans le matériau. C'est généralement une onde sinusoïdale qui est utilisée. Sa fréquence peut varier, suivant la nature des applications envisagées et des produits contrôlés, dans une plage comprise entre quelques hertz et plusieurs mégahertz [13].

La sensibilité de la méthode pour chaque application est fortement liée au choix de la fréquence qui conditionne la pénétration des courants induits (*Fig II.8b*). : C'est « l'effet de peau » s'étendant sur une profondeur qui dépend de la perméabilité magnétique absolue du matériau et de sa conductivité électrique. Dans la pratique, la répartition du champ magnétique créé par le capteur est souvent complexe. La géométrie du capteur et de la pièce et leurs positions relatives sont des paramètres déterminants pour définir les conditions d'excitation et le processus d'induction des courants dans le matériau [13] [14].

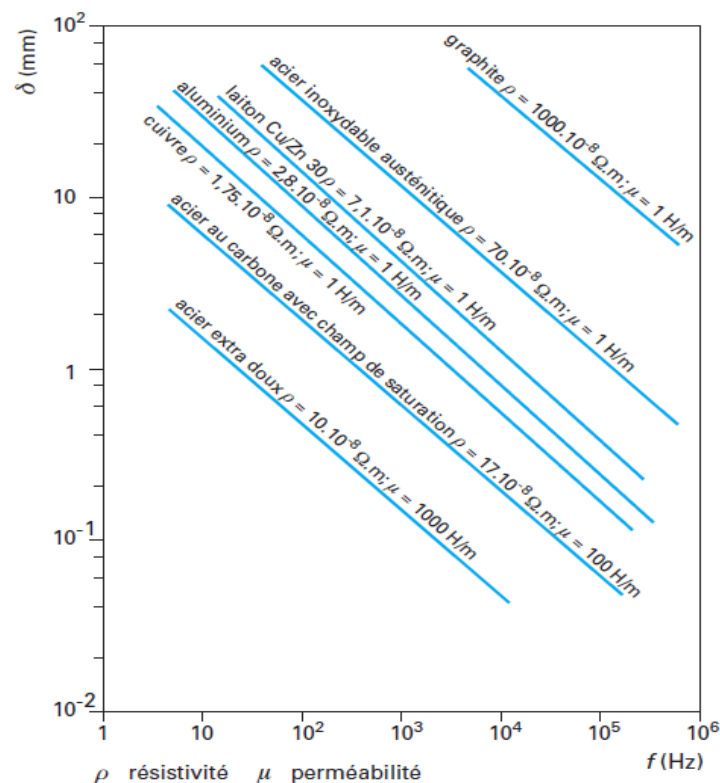


Fig (II.8b) : Profondeur de pénétration conventionnelle des courants de Foucault dans divers matériaux.

L'abaque de la (Fig II.8b). Permet de connaître, en fonction de la fréquence, cette profondeur de pénétration pour les matériaux qui font le plus couramment l'objet de contrôle par courants de Foucault. On voit que le ferromagnétisme des aciers augmente considérablement l'effet de peau, toutes choses égales par ailleurs. Dans ce cas, si besoin est, on peut accroître la profondeur de pénétration en diminuant la perméabilité μ à l'aide d'un champ magnétique continu de saturation. On voit aussi que, pour obtenir des profondeurs de pénétration de l'ordre du millimètre, il faut utiliser selon les matériaux des fréquences comprises entre 10 et 10^5 Hz, gamme de fréquence bien adaptée à la technologie électronique courante [14].

II.4.8.3.1. Modes d'excitation :

La sensibilité de la méthode dépend de la fréquence du courant d'excitation. Celle-ci conditionne en effet, la profondeur de pénétration des courants induits dans le matériau à inspecter, ce qui destine la technique au contrôle surfacique (pièces minces) et volumique (pièces de grande épaisseur) [8].

L'excitation est réalisée par un générateur délivrant un signal variable dans le temps ou périodique dans une gamme de fréquences déterminées.

Les mesures peuvent être faussées par une mauvaise définition de la forme de l'onde fournie ou par une variation de la fréquence. Par conséquent, le générateur doit impérativement délivrer un signal asservi en fréquence de manière à assurer une grande stabilité d'excitation et à réduire le bruit de fond et les dérives lentes [8]

a) Gammes de fréquences :

▪ Gamme basse fréquence [1Hz :1kHz]

Les courants de Foucault à basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. Cette technique convient pour le contrôle de produits de forte épaisseur ou le contrôle de qualité (tri de matériaux selon leur nuance à cœur) et les défauts volumiques et profonds. Elle est utilisée préférentiellement pour les produits ferromagnétiques en raison des problèmes liés à la profondeur de pénétration. C'est une technique très répandue dans l'industrie. Elle est relativement simple à mettre en œuvre, très peu coûteuses, très sensibles au manque de matières et une résolution spatiale réduite. Néanmoins, si la fréquence est trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la mesure ne sera pas précise à cause du bruit [8].

▪ Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz]

C'est le domaine le plus employé en mesure de faibles épaisseurs, telles que les plaques ou barres Co-filées. Ce domaine fréquentiel couvre également le contrôle de santé (détection hétérogénéité du type fissures débouchantes, inclusions, occlusion, ...) ainsi que le contrôle de caractéristiques métallurgiques (traitements superficiels, conductivité, ...) [8].

▪ Gamme haute fréquence : >1MHz

Les fréquences supérieures à 1MHz sont très peu utilisées. Elles peuvent engendrer des capacités parasites entre les spires du capteur et entre le capteur et le matériau. Son utilisation se limite essentiellement à des mesures d'entrefer, la détection de micro fissure de surface et la modélisation de micro bobine utilisées dans le domaine de la télécommunication et de la résonance magnétique nucléaire [8].

b) Excitation mono fréquence :

Le courant d'excitation est une onde sinusoïdale de fréquence fixe qui peut-être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences fixes commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts [8].

Il n'y a pas cependant des critères simples et uniques de choix de la fréquence. Pratiquement, le choix de la fréquence de sondage doit se faire après des essais sur échantillons de façon à mettre en évidence les paramètres perturbateurs. Ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et il n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs.

c) Excitation multifréquences :

Le contrôle multi fréquences [8] a été développé en particulier pour le contrôle des tubes des générateurs de vapeur et des rails ferroviaires. Ces environnements présentent en particulier des parties droites, des coudes et des éléments de fixation. Le contrôle dans certaines zones est rendu très délicat par l'apparition de signaux parasites de fortes amplitudes pouvant se superposer au signal du défaut. La méthode pratiquée consiste à neutraliser les signaux parasites en procédant à leur soustraction pour deux fréquences différentes injectées dans le capteur.

L'origine de la technique multi fréquence est encore liée au développement de programmes électronucléaires. Il semble que le problème se soit posé pour la première fois lors du contrôle des tubes formant l'échangeur de chaleur dans les générateurs de vapeur. Ces tubes en Inconel sont assemblés en faisceau. Chaque tube est cintré en épingle à cheveux. Il repose sur une plaque tubulaire et traverse des plaques servant d'entretoises. Lors du passage de la sonde de contrôle à l'intérieur du tube, un signal dit «signal plaque» apparaît au niveau de celles-ci. Un tel signal, relativement grand, est susceptible de masquer un éventuel défaut réel. De même, si lors d'un contrôle, deux défauts se trouvent sur une même zone de la pièce à examiner, le signal est difficilement interprétable car le signal électrique contient des informations relatives à chacun d'eux. L'opérateur doit alors rechercher les conditions optimales de réglage du matériel. Le développement de matériels multi fréquences répond au besoin impératif de séparer puis d'éliminer ce signal perturbateur.

Dans ce mode particulier d'utilisation des courants de Foucault, les générateurs excitent la bobine simultanément sur plusieurs fréquences. Le signal reçu est ensuite filtré par des passes bandes à forte pente. En ayant plus d'information, il est possible d'éloigner les signaux perturbateurs du signal recherché. Pour beaucoup d'informations, il faut faire des mesures à plusieurs fréquences d'excitation.

En effet, l'utilisation de n fréquences engendre $2n$ informations et peut permettre l'élimination de $2n-1$ perturbations.

La technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. La mesure en séquence excite le capteur par mono fréquence successive. Cette technique met un temps d'exécution et d'acquisition des données important. La mesure en fréquences simultanées consiste à injecter au capteur simultanément plusieurs signaux de fréquences différentes.

En pratique, on utilise un système d'excitation en double fréquence (10kHz et 100kHz) pour le contrôle des rails ferroviaires et à trois fréquences simultanées (100kHz, 240kHz, 500kHz) pour les tubes de vapeur.

d) Excitation pulsées :

Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation n'est pas une onde sinusoïdale mais variable dans le temps [8]. C'est une excitation impulsionnelle de formes rectangulaires, triangulaires ou autres. Toute fois, on préfère utiliser une forme semi sinusoïdale en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

La décomposition en série de Fourier de l'onde engendre des signaux de fréquences multiples.

Cette méthode représente donc une alternative à l'excitation multi fréquence. On utilise l'évolution temporelle des signaux pour extraire des informations. Une telle technique est plus riche en informations qu'en mono fréquence ou en multi fréquences.

Cette technique a été utilisée pour évaluer l'épaisseur de revêtements et les dépôts sur les pièces métalliques, pour la détection des défauts profonds et dans le domaine de l'inversion du phénomène.

II.4.8.4. Analyse de la phase de perturbation :

La trajectoire des courants induits dans la pièce est perturbée par des variations locales soit de la géométrie, soit des caractéristiques électromagnétiques du matériau [13].

La perturbation locale des lignes de courant modifie le champ induit s'opposant à chaque instant au champ d'excitation. Il en résultera une modification de l'impédance du capteur.

Trois natures différentes d'applications résultent de ce principe :

- détection de défauts superficiels ou légèrement sous-jacents ;
- mesure d'épaisseurs de revêtements ;
- tri de nuance.

Dans chaque cas, la méthode est comparative et nécessite un étalonnage préalable du capteur sur des pièces de référence.

II.4.8.5. Analyse de la phase de révélation :

On analyse dans cette phase les variations d'impédances consécutives à la perturbation que l'on cherche à mettre en évidence. La méthode la plus courante consiste à comparer le signal de déséquilibre d'un pont d'impédance au signal de référence délivré par l'oscillateur alimentant le capteur [13].

L'essentiel du traitement repose sur une démodulation qui permet d'apprécier à chaque instant sur une unité de visualisation la partie réelle et la partie imaginaire du signal de déséquilibre. Les paramètres influençant le résultat de la mesure à ce stade sont de deux natures [13] :

- paramètres de réglage propres au système de mesure.
- paramètres propres aux phénomènes physiques mis en jeu au cours de la propagation des courants induits à l'intérieur de la pièce.

Il faut adapter les réglages du système de mesure pour rendre optimale la détection de l'anomalie recherchée soit à partir de considérations théoriques, soit à partir de données expérimentales issues d'une procédure d'étalonnage rigoureuse. On cherche à réduire l'influence de phénomènes nuisibles. Par exemple dans le cas de recherche de défaut, on désire éviter la prise en compte des écarts de distance entre le capteur et la pièce [13].

II.4.8.5.1. Capteurs :

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines. Il sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de trois caractéristiques [8] :

- Type.
- Fonction.
- Mode de contrôle.

a) Différents types de capteurs et leur montage :

Les capteurs à courants de Foucault [14] se présentent essentiellement selon trois configurations géométriques appropriées aux types de produits à contrôler (Fig II.9) :

→ les capteurs à bobines encerclantes : pour le contrôle des barres et des tubes lors de leur fabrication.

→ les capteurs internes : pour le contrôle des tubes par l'intérieur.

→ les capteurs de surface : (encore appelés capteurs pick-up), dont l'axe est perpendiculaire à la surface, pour le contrôle des surfaces planes ou celles dont la courbure est faible devant les dimensions du capteur, bien adaptés au contrôle manuel et au contrôle sur machine automatique.

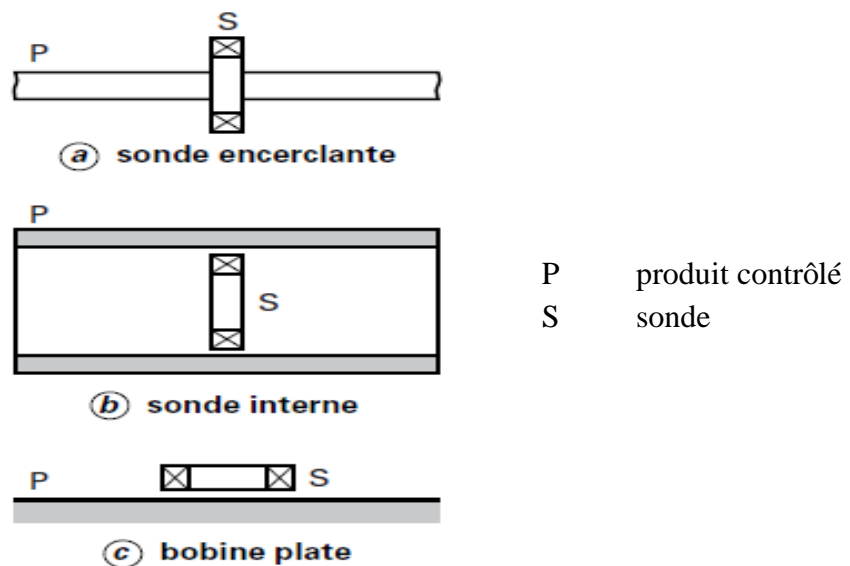


Fig (II.9) : Types de capteurs pour contrôle par courants de Foucault.

b) Fonctions du capteur :

Le fait qu'un bobinage peut être inducteur ou induit donne la possibilité au capteur de jouer le rôle de l'émetteur ou de récepteur ou les deux fonctions simultanées [8].

Pour chacune de ces configurations, il existe deux familles de capteurs [14] :

- les capteurs à double fonction constitués d'une seule bobine émettrice-réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa tension complexe (Fig II.10a).

L'extraction des informations se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou due à la présence d'un défaut dans ce matériau. Ce type de capteur favorise la mesure de grandeurs à évolution lentes tels que l'épaisseur de revêtement, l'entrefer (lift-off) et la conductivité [8].

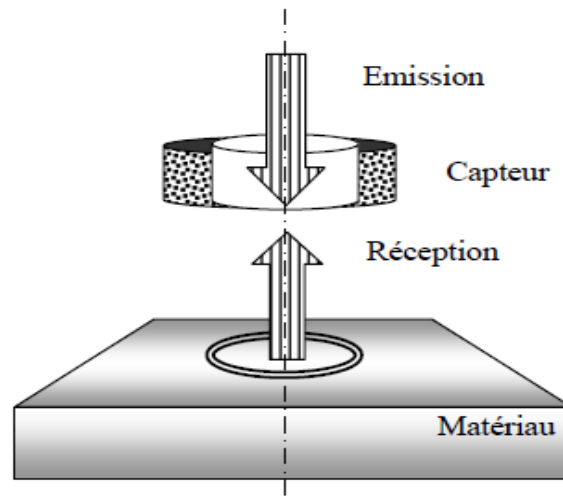


Fig. (II.10a) : Capteur à double fonctions.

▪ les capteurs à *fonctions séparées* constitué de deux bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications du matériau ou à la présence d'un défaut. Une variante intéressante est constituée par les *capteurs anisotropes* (Fig II.10b). Ces capteurs sont constitués de deux bobines, l'une émettrice E l'autre réceptrice R, distantes l'une de l'autre. En l'absence de défaut convenablement orienté entre émetteur et récepteur, les lignes de courants de Foucault restent confinées sous l'émetteur et aucun signal n'est capté sur le récepteur. En présence d'un défaut orienté entre les deux bobines, les lignes de courants de Foucault sont déformées jusqu'à circuler sous le récepteur qui délivre alors un signal de sortie. De par leur principe, ce type de sonde permet, au moins théoriquement, de s'abstraire des problèmes posés par des variations des paramètres électromagnétiques autres que ceux induits par les défauts seuls [14]. Cette conception est souvent utilisée pour la détection de défaut de grande taille ou profond [8].

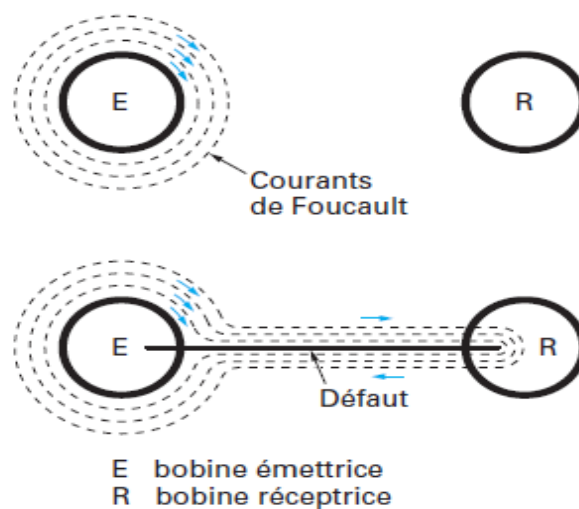


Fig. (II.10b) : Principe de base des Capteurs anisotropes.

c) Mode de contrôle :

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à identifier ou à contrôler et des perturbations éventuelles, les capteurs cités en dessus peuvent fonctionner selon trois modes de mesure [14] [8]:

- Mode de contrôle absolu.
- Mode de contrôle compensé.
- Mode de contrôle différentiel.

▪ Dans le premier cas (contrôle absolu), le capteur fonctionne seul [14]. Et il est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique. Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester) [8].

Ce type de contrôle est préférentiellement utilisé dans le domaine de la caractérisation électromagnétique et géométrique [8].

▪ Dans le second cas (contrôle compensé), la bobine de mesure est associée à une bobine externe alimentée dans les mêmes conditions et qui lui sert de référence (*Fig II.10c*), comme le montre la figure, la première capte les grandeurs utiles et perturbatrices alors que l'autre ne capte que les signaux perturbateurs. Une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles. l'intérêt étant ici de faciliter les réglages dans le plan d'impédance [14] [8].

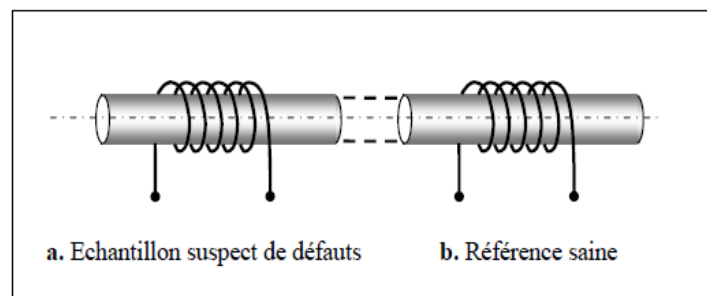


Fig.(II.10c) : Mesure absolue compensée.

▪ Dans le cas du mode différentiel, il existe deux bobinages de mesure identiques placés à proximité l'un de l'autre, alimentés l'un et l'autre dans les mêmes conditions et montés selon un pont différentiel (*Fig II.10d*). Le mode différentiel permet de s'affranchir de l'influence de paramètres perturbateurs tels que les variations locales de propriétés électromagnétiques, de distance ou de température, pourvu toutefois que ces paramètres n'évoluent pas dans la zone séparant les deux bobinages. Au contraire, un défaut affectera une bobine à la fois, engendrant un double signal de déséquilibre [14].

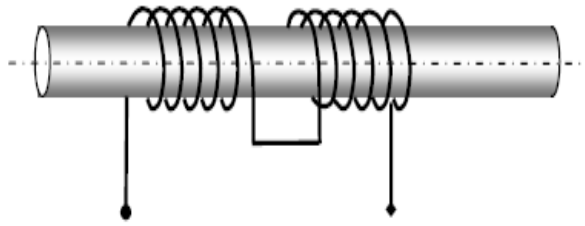


Fig. (II.10d) : Mesure différentielle.

Cette méthode est essentiellement utilisée en contrôle de santé. Elle permet de mettre en évidence des défauts métallurgiques (anisotropie) et les variations dimensionnelles brutales telles que des fissures. Les défauts ponctuels sont bien détectés [8].

L'avantage de ce mode de mesure réside dans la suppression de tout signal dû à des variations lentes telles que les variations dimensionnelles ou les fluctuations de température ou de conductivité [8].

À partir de ces montages de base, d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler et du type de défauts à mettre en évidence. Leur détectabilité dépend de leur géométrie ou de leur nature métallurgique. C'est ainsi que dans le cas des barres ou des fils, les défauts du type fissure en ligne sont plus délicats à détecter que les défauts ponctuels du type arrachement : des capteurs de surface de petites dimensions passant sur la zone à contrôler sont préférables à des capteurs à bobines encerclantes [8].

II.4.8.6. Matériaux à inspecter :

Au cours des ans, la technologie des capteurs et le traitement des données ont continuellement progressé et aujourd'hui la technique par courants de Foucault est reconnue comme étant rapide, simple et précise. C'est la raison pour laquelle elle est utilisée largement dans les industries de production et d'utilisation de produits métalliques pour la détection en surface ou en volume et la caractérisation physique des matériaux comme l'aluminium, l'acier inoxydable, le cuivre, le titane, le laiton, l'Inconel et même l'acier au carbone, le matériau à inspecter étant le siège des courants de Foucault [8].

II.4.8.6.1. Epaisseur de peau :

Les courants de Foucault sont très sensibles à différents paramètres géométriques (la présence de défauts, la distance entre la bobine et la pièce, l'épaisseur de la pièce), électromagnétiques (la conductivité, la perméabilité) et thermiques (*Fig II.10e*). Le paramètre perturbateur est la température car elle modifie localement ou totalement la perméabilité ou la conductivité du matériau et donc l'impédance de la bobine réceptrice [8].

Le phénomène de peau est un phénomène d'origine électromagnétique apparait dans tout matériaux conducteurs parcourus par un courant alternatif, ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps, dans le cas du contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce commencent à décroître d'une manière exponentielle à partir de la surface [15]. La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (II.1)$$

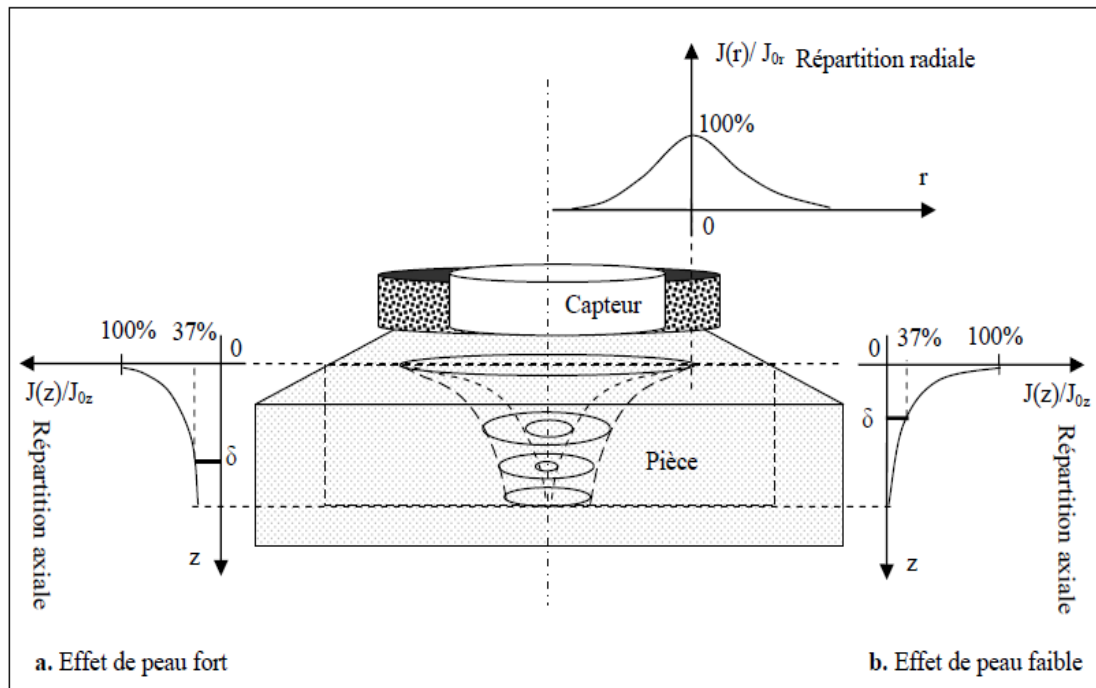


Fig.(II.10e) : effet de peau électromagnétique.

Ce phénomène engendre une décroissance exponentielle de la densité de courant de Foucault, soit :

$$j(z) = j_0 e^{-z/\delta} \quad (II.2)$$

II.4.8.6.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau à contrôler :

Les faibles variations de la composition chimique d'un matériau (exemple de l'acier) influent sur l'amplitude et la phase du signal. Ces variations de composition agissent surtout sur la dureté qui, à son tour, par l'intermédiaire de la conductivité et de la perméabilité, modifie l'amplitude du signal fondamental et de ses harmoniques.

L'induction magnétique est directement proportionnelle à la perméabilité d'un matériau.

L'inductance résultante d'une bobine avec un noyau ferromagnétique augmente donc d'un facteur μ_r ; ce qui rend l'épaisseur de peau très faible [8].

II.4.8.6.3. Caractéristiques géométriques du matériau à contrôler :

Pour réaliser le contrôle complet d'une pièce, il faut déplacer, à une vitesse qui peut atteindre quelques mètres par seconde, la bobine à la surface de celle-ci et décoder les variations d'impédance qui traduisent la présence d'une anomalie à l'intérieur de la pièce. Ce déplacement provoque des variations de position du capteur par rapport à la surface de la pièce (coefficient de remplissage) et engendre ainsi des fluctuations d'impédance dites lift-off (Fig II.10f). Ces fluctuations peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront des indications sur les caractéristiques des défauts. Il est donc essentiel d'en connaître l'influence et de maîtriser au mieux ce paramètre expérimental [8].

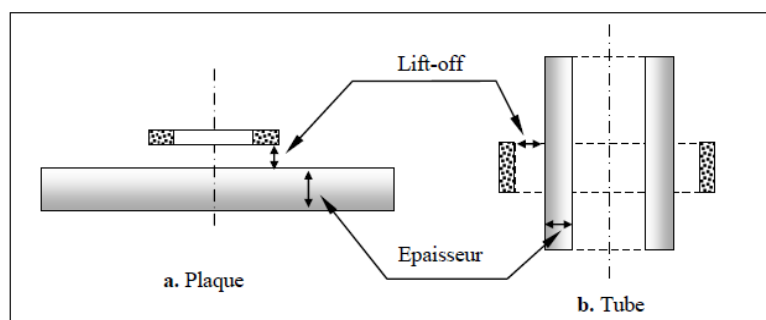


Fig.(II.10f) : Définition des paramètres géométriques.

Une des utilisations de la technique du contrôle par courants de Foucault est l'évaluation dimensionnelle des couches constitutives de la pièce. Cela revient à mesurer l'épaisseur des différentes couches isolantes et conductrices. La détection dimensionnelle des couches isolantes, du point de vue électromagnétique, est équivalente à la mesure de l'entrefer entre le capteur et la partie conductrice. C'est le lift-off. Dans ce cas, ce paramètre n'est plus perturbateur [8].

II.4.8.6.4. Défauts :

Les défauts (trous, fissures, rayures,...) tendent de modifier le parcours des courants de Foucault dans le matériau. On peut donc considérer qu'un défaut non-conducteur (inclusion, trou,...) provoque la même variation d'impédance qu'une variation de conductivité. De même, un défaut en surface peut être assimilé à une variation du coefficient de remplissage. La forme et la position des défauts relativement au matériau imposent des modèles géométriques bidimensionnel ou tridimensionnel [8].

L'objectif de la recherche de défauts, est lié à son identification et sa caractérisation à partir des signaux mesurés. Les dispositifs de contrôle utilisant les techniques présentées précédemment, permettent d'obtenir des signaux suffisamment riches en informations. Un traitement numérique adapté, à base d'un calcul direct et inverse permet de remonter aux différentes informations d'identification.

L'utilisateur de CND doit choisir la fréquence qui détectera le défaut avec la sensibilité et la fiabilité les plus élevées, tout en gardant dans l'esprit que dans les applications de caractérisation des matériaux, le défaut est un élément perturbateur [8].

II.4.8.6.5. Eléments perturbateurs :

Dans tous les traitements de problèmes à plusieurs variables, quand on s'intéresse à une grandeur, les autres paramètres doivent être maîtrisés. Dans les descriptions précédentes nous avons précisé, pour chaque nature de détection, les perturbations qui peuvent surgir lors de la pratique du contrôle. Pour la maîtrise des paramètres, on conçoit généralement des capteurs spécifiques (capteur différentiel) et des excitations en multi fréquences (double et triple fréquence) [8].

Dans le domaine de contrôle et d'évaluation non destructifs par courant de Foucault, la température est le seul élément purement perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies [8].

II.4.8.7. Visualisation :

a) Impédance normalisée :

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine pour une pièce de référence. En absence du matériau à contrôler [8], l'impédance complexe Z_0 du capteur est :

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{II.3})$$

Résistance à vide de
la bobine du capteur
Réactance à vide de
la bobine du capteur

En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge Z est :

$$\underline{Z} = R + jX \quad (\text{II.4})$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau. X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur.

Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide R_0 et X_0 (pertes à vide, l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on procède à la normalisation de l'impédance complexe du capteur en présence du matériau [8]. Cette normalisation est donnée par :

$$\underline{Z}_n = \frac{\underline{Z} - R_0}{X_n} = R_n + jX_n \quad (\text{II.5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \\ X_n = \frac{X}{X_0} \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

$$(\text{II.7})$$

R_n et X_n sont respectivement la résistance et la réactance normalisées du capteur.

II.4.8.8. Domaines d'application :

Les possibilités offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée du contrôle par courants de Foucault sont très appréciées sur le plan industriel. En effet le contrôle par courants de Foucault peut s'envisager sur n'importe quel produit conducteur de l'électricité. En fait, il concerne essentiellement des produits cylindriques tels que barres et tubes. Indépendamment des produits cylindriques, un nombre relativement important d'applications concerne les pièces à forte concentration de contraintes utilisées dans l'industrie aéronautique qui font l'objet de visites systématiques [11] [13].

Les tubes de faible épaisseur, tels qu'ils sont utilisés pour les éléments combustibles ou condenseurs et échangeurs de vapeur dans les centrales nucléaires, constituent un domaine d'application important du contrôle par courants de Foucault [13].

II.4.8.9. Avantages et limites du CND par courants de Foucault :

a) Avantages :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même aucune nuisance ou pollution n'est engendré ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement.
- Le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable.

b) Limites :

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

II.5. Conclusion :

Après avoir rappelé brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif, nous avons tout d'abord évoqué les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance.

Dans ce chapitre nous avons décrit plus en détail les principes physiques, la réalisation et la mise en œuvre du procédé par courants de Foucault.

Les perspectives d'extension du champ d'application des procédés de contrôle non destructif sont très grandes, en particulier en direction des secteurs industriels plus proches de la consommation courante que de la haute technologie.

Le contrôle par courants de Foucault vit actuellement avec l'évolution des moyens informatiques qui apportent une aide importante dans les domaines suivants [13] :

- aspect théorique de la modélisation du capteur ;
- gestion des paramètres de réglage et de l'acquisition des mesures ;
- traitement du signal et exploitation des résultats.

Chapitre III

*Méthodes de traitement des
problèmes directs & Inverses*

A) Méthodes de traitement des problèmes directs**III.A.1. Introduction :**

Depuis l'avènement des ordinateurs il y a maintenant plus d'un demi-siècle et, compte tenu en particulier de l'augmentation de leur puissance de calcul, la simulation numérique a remplacé l'expérimentation directe trop coûteuse et longue à mettre en œuvre ; celle-ci n'est plus, de nos jours, qu'un moyen de vérification des calculs effectués sur machine. Sur le plan mathématique, la simulation numérique nécessite essentiellement la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles qui conduisent à l'obtention de solutions approchées. Il existe de nombreuses méthodes d'approximation qui présentent toutes des avantages et des inconvénients ; citons, à titre illustratif, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, et la méthode des éléments finis [16].

On présente dans ce chapitre les méthodes connues d'analyse des problèmes physiques les plus courants. Les méthodes utilisées sont les méthodes analytiques, expérimentales et numériques. Selon la méthode spécifiée on parle respectivement de modèle analytique, expérimental ou numérique. Le but de tout scientifique est d'utiliser plus d'une méthode pour la validation des résultats obtenus.

III.A.2. Méthodes d'analyse :**III.A.2.1. Méthodes Analytiques :**

Le problème étant défini par un modèle mathématique choisi, la méthode analytique consiste à rechercher la solution exacte du problème en résolvant les équations qui régissent le modèle [17].

III.A.2.1.1. Modèle mathématique :

Un modèle mathématique est la mise en équation d'un phénomène dans le but de représenter fidèlement le comportement réel du phénomène. Des relations reliant les variables d'entrées aux variables de sorties sont établies. Le modèle est construit selon le but à atteindre. Par exemple pour analyser le mouvement de la terre autour du soleil, la terre et le soleil sont assimilés à des points matériels avec la loi de comportement correspondante tandis que si on veut étudier le mouvement de la terre par rapport à son axe, le modèle mathématique représente la terre par une sphère avec la loi de comportement donnant le mouvement de rotation de la terre par rapport à son axe. Le succès du modèle dépend de sa facilité d'utilisation et de la précision des résultats prédits par le modèle [18].

III.A.2.1.2. La formulation :

Le modèle mathématique est formulé par des équations aux dérivées partielles et des conditions aux limites qui garantissent l'unicité de la solution, donc le fonctionnement du système physique. Nous nous intéressons particulièrement aux différents types d'équations du second ordre, à deux variables indépendantes x et y , de la physique mathématique écrite sous la forme générale :

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D \frac{\partial \phi}{\partial x} + E \frac{\partial \phi}{\partial y} + F \phi = G(x, y) \quad (\text{III.1a})$$

Où $\phi = \phi(x, y)$ est la fonction recherchée, dépendante de x et y . C'est la fonction qui donne le comportement du modèle. A, B, \dots et F sont les coefficients de l'équation aux dérivées partielles. Ils sont fonction de x et y et peuvent être des constantes. On ne traitera pas les équations non linéaires c'est-à-dire des équations dont les coefficients dépendent de ϕ .

L'équation (II.1a) peut être réécrite sous la forme :

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y, \phi, \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}) \quad (\text{III.1b})$$

Selon le signe du déterminant $B^2 - 4AC$ on adopte le classement suivant

- Si $B^2 - 4AC < 0$ l'équation est dite elliptique.
- Si $B^2 - 4AC > 0$ l'équation est dite hyperbolique.
- Si $B^2 - 4AC = 0$ l'équation est dite parabolique.

III.A.2.1.3. Classification des problèmes aux limites :

Les problèmes aux limites sont régis par des équations aux dérivées partielles accompagnées de conditions aux limites spécifiques. Selon le type d'équation on obtient le problème aux limites correspondant.

- Si l'équation est elliptique, le problème est elliptique et on a un problème d'équilibre ou de valeurs aux limites (*PVL*).
- Si l'équation est parabolique, le problème est parabolique et on a un problème de valeurs initiales (*PVI*).
- Si l'équation est hyperbolique, le problème est hyperbolique et on a un problème de valeurs propres (*PVP*).

III.A.2.1.4. Les méthodes de résolution :

Les équations aux dérivées partielles peuvent être résolues par de nombreuses méthodes. *La méthode de la solution générale* et *La méthode de séparation de variables* sont les plus couramment utilisées.

La première méthode consiste d'abord à déterminer la solution générale de l'équation aux dérivées partielles puis de la particulariser afin d'obtenir la solution du problème en utilisant les conditions aux limites. La seconde méthode consiste, par contre, à rechercher d'abord des solutions particulières, puis de les utiliser à la recherche de la solution du problème. Cette deuxième méthode trouve un champ d'application bien plus vaste que la première.

III.A.2.1.5. Avantages et inconvénients des méthodes analytiques :

Il est toujours souhaitable d'avoir recours aux méthodes analytiques (exactes) du problème. Cependant ces méthodes sont souvent difficiles à être réalisées à cause des inconvénients suivants :

- Utilisation d'un grand nombre de termes pour obtenir la solution d'après le principe de superposition. Comme on ne peut atteindre des valeurs infinies de n , la solution peut être analytique au sens propre du mot.
- La solution est toujours difficile à trouver. La méthode est spécifique à chaque type de problème.
- La difficulté s'accroît d'avantage si les conditions aux limites et l'équation aux dérivées partielles sont non homogènes.
- La prise en charge de frontières complexes semble être hors de portée des méthodes analytiques.

III.A.2.2. Méthodes expérimentales :

La méthode expérimentale est définie comme une activité pratique de recherche par des techniques de mesure de paramètres entrant globalement dans la résolution d'un problème donné. C'est un autre moyen mis à la disposition de l'ingénieur (chercheur) pour valider un résultat analytique ou numérique.

L'expérimentation est le seul moyen précis d'évaluer les différentes hypothèses qui ont été émises, elle servira à aller chercher des données, c'est-à-dire des informations qui serviront à confirmer une hypothèse. Les résultats obtenus sont surtout confrontés aux résultats analytiques (quand ceux-ci existent) car ces résultats sont objectifs et résistent bien à la subjectivité. La méthode expérimentale pour être fiable, doit tenir en compte d'un certain nombre de critères ou normes scientifiques et qui sont les suivantes :

- Objectif à atteindre (émission d'hypothèses, formulation).
- Procédure d'analyse expérimentales et matériel expérimentale.
- Résultats (appelés données).
- Interprétation des résultats et validation.

On utilise dans certaines disciplines pour désigner la méthode expérimentale la désignation "*OPHERIC*" (Observation, Problème, Hypothèse, Expérience, Résultats, Interprétation, Conclusion), couramment utilisé dans la conduite d'activités expérimentales.

III.A.2.3. Méthodes Numériques :

Il existe plusieurs méthodes numériques de résolution de problèmes que rencontre l'ingénieur (chercheur). Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode des différences finies (*MDF*), les méthodes d'approximation intégrales et variationnelles qui ont données naissance à la méthode des éléments finis.

III.A.2.3.1. Méthode des différences finies (MDF) :

La méthode des différences finies est une méthode numérique de résolution des équations aux dérivées partielles. Sa formulation est basée sur l'approximation locale au voisinage d'un point donné des fonctions dérivées apparaissant dans les équations différentielles. C'est-à-dire : sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, Les fonctions dérivées sont approché par des fonctions polynomiales données par le développement en série de Taylor [19].

La méthode des différences finies a été rendue très populaire par l'avènement de l'ordinateur vers les années 1949, et consiste à discrétiser le problème posé et à le résoudre au calculateur numérique.

Les équations aux dérivées partielles peuvent se résoudre numériquement par la (MDF) en leur associant les conditions aux limites de types :

- Dirichlet (donnée de la fonction).
- Neumann (fournir la dérivée par rapport à la normale).
- Mixte (donnée de la fonction et de dérivée par rapport à la normale).

III.A.2.3.1.1. Approximation des dérivées :

On utilise généralement un réseau carré dans ces conditions et en se limitant au terme 1 dans les développements en série de Taylor (on accepte une erreur d'ordre h , $\varepsilon(h)$).

On peut écrire les dérivées successives par rapport à un point donné (i,j) comme suit :

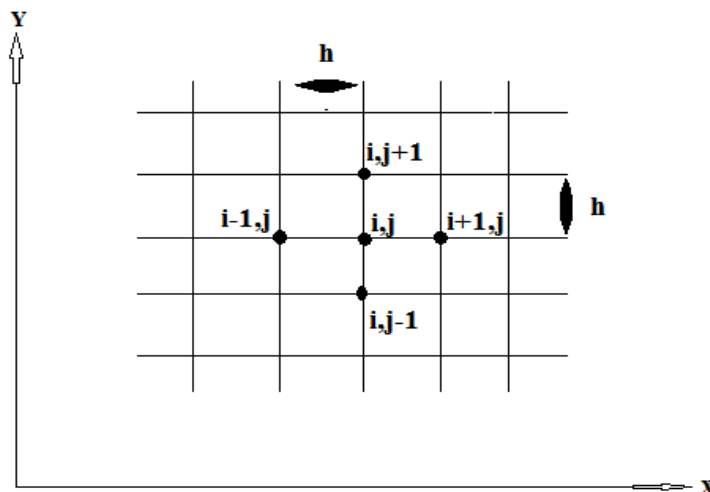


Fig. (III.1) : Maillage différences finies

L'approximation des dérivées aux point (i,j) est donnée par :

$$\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{A_{i+1,j} - A_{i-1,j}}{2h} \tag{III.2a}$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_{i,j} \cong \frac{A_{i,j+1} - A_{i,j-1}}{2h} \quad (III.2b)$$

Les dérivés d'ordre 2 s'écrivent:

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_{i,j} \cong \frac{A_{i+1,j} - 2A_{i,j} + A_{i-1,j}}{h^2} \quad (III.2c)$$

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right)_{i,j} \cong \frac{A_{i,j+1} - 2A_{i,j} + A_{i,j-1}}{h^2} \quad (III.2d)$$

La Somme membre à membre des équations (III.2c) et (III.2d) permet d'obtenir la formule générale de discrétisation du Laplacien, appelée aussi formule à « cinq points » suivante :

$$(\Delta A)_{i,j} = \frac{A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1} - 4A_{i,j}}{h^2} \quad (III.2e)$$

III.A.2.3.2. Méthodes d'approximation Intégrales et Variationnelles:

Pour discrétiser les modèles complexes de phénomènes physiques, l'ingénieur (chercheur) dispose, à l'heure actuelle, de méthodes d'approximation permettant de résoudre la plupart des problèmes pour lesquels il n'existe pas de solution formelle [20].

Toutes les méthodes d'approximation ont un même objectif, remplacer un problème mathématique défini sur un milieu continu (équations différentielles ou intégrales) par un problème mathématique discret (équation matricielle) de dimension finie que l'on sait résoudre numériquement.

La classification que nous proposons sur la (Fig III.2) n'est pas unique. Elle permet simplement de distinguer la méthode, en fonction de la démarche utilisée pour obtenir une forme intégrale. Il est important de noter qu'un problème physique peut être formulé de façon équivalente en un système d'équations différentielles ou sous une formulation variationnelles.

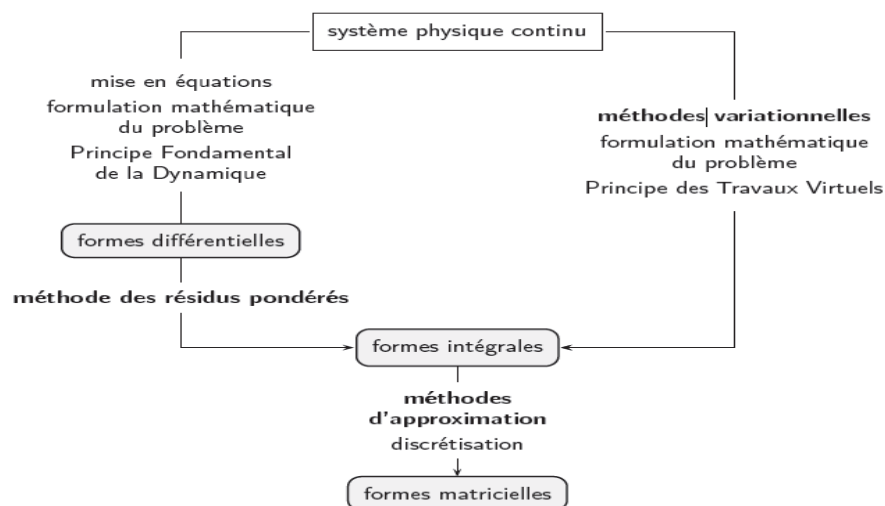


Fig (III.2) : Vue synthétique des méthodes d'approximation

III.A.2.3.2.1. Méthode des résidus pondérés ou projective (ou annulation d'erreur) :

Elle utilise comme point de départ les équations locales et les conditions aux limites du problème. Ces équations sont des équations différentielles définies sur l'intérieur du domaine, ce sont les équations locales, et sur la frontière du domaine, ce sont les conditions aux limites.

Le principe fondamental de la formulation projective est basé sur un théorème applicable dans un espace de *HILBERT* qui stipule, que seul le vecteur nul est orthogonal à tous les vecteurs de l'espace [19].

Soit : $(f,g) \in U^2 \implies$ l'orthogonalité de f et g se traduit par :

$$\int_{\Omega} f \cdot g \, d\Omega = 0 \quad (\text{III.3a})$$

La résolution d'un problème à équation aux dérivées partielles se ramène à la résolution de deux problèmes :

- L'un sur le domaine Ω : $L(U) - f = 0$
- L'autre sur la frontière : $G(U) - g = 0$

$L(U)$: Opérateur différentiel (généralement d'ordre 2 pour les problèmes de calcul de champ).
 $G(U)$: Opérateur différentiel d'ordre inférieur à $L(U)$ (n-1).

La méthode des résidus pondérés consiste à rechercher les fonctions U qui satisfont la condition aux limites et telle que pour toute fonction ϕ ayant des conditions de dérivabilité déterminée l'on ait :

$$\int_{\Omega} (L(A) - f) \cdot \phi \, d\Omega = 0 \quad (\text{III.3b})$$

III.A.2.3.2.2. Méthodes variationnelles ou méthodes à extremum :

Le point de départ de ces méthodes est un principe variationnelles qui est une formulation mathématique du problème basée sur des considérations énergétiques.

La formulation obtenue dépend bien entendu des hypothèses de modélisation du problème physique.

En générale les formulations variationnelles c'est-à-dire : les fonctionnelles correspondantes, sont construite à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type Intégrale définie comme suit : [19]

$$I_a = \int L(x_i, q_j, q'_{ik}) d\omega \quad (\text{III.3})$$

$x_i \implies$ variable. (i=1, . . . n)

$q_j \implies$ variable d'état. (j=1, . . . n)

$q_{ik} = \frac{\partial q_i}{\partial x_{qk}} \implies$ dérivées des fonctions d'états q_i .

$$L(x_i, q_j, q'_{ik}) = (W_c - W_p)$$

W_c : → Energie cinétique qui varie de manière quadratique par rapport aux dérivées partielles q_{ik} .

W_p : → Energie potentielle qui est une fonction compliquée des variables d'état q_i .

III.A.2.3.2.3. Approximation de la fonction inconnue :

En générale, on recherche la solution au problème différentiel initial sous forme d'une combinaison linéaire de fonction indépendante connue simple (cette solution est souvent approchée)[19].

Elles sont polynomiales par morceaux :

La fonction d'approximation recherchée U est notée U^*

$$U^* = A_1 N_1 + A_2 N_2 + \dots + A_N N_N \quad (III.4)$$

Les coefficients A_1, A_2, \dots, A_N sont déterminés de façon à réaliser la meilleure approximation de la fonction U sur la base des fonctions de formes N_1, N_2, \dots, N_N .

III.A.2.3.2.4. Principe de minimisation :

Le principe de la minimisation consiste à déterminer les coefficients U_1, U_2, \dots, U_N de l'approximation U^* par la réalisation d'un certain nombre de conditions à imposer à ces fonctionnelles[19].

❖ Cas de la formalisation variationnelles :

$$F(U) = \iint_{\Omega} L(U, U'_x, U'_y, x, y) d\Omega \quad (III.5)$$

La condition nécessaire pour la minimisation (maximum) est :

$$\frac{\partial F(U)}{\partial U_i} = 0 \implies \frac{\partial F(U)}{\partial U_1} = \frac{\partial F(U)}{\partial U_2} = \dots = \frac{\partial F(U)}{\partial U_N} = 0 \quad (III.6)$$

U_1, U_2, \dots, U_N : Inconnues du problème (où U est inconnue).

La résolution du système obtenu nous permettra de déterminer la fonction approximante U^* sur tout le domaine.

❖ Cas de la formalisation projective :

$$F = \iint_{\Omega} L((U) - f)\phi d\Omega \quad (III.7)$$

Où ϕ : c'est la base de fonctions de projection.

La condition de minimisation consiste à écrire :

$$F = 0 \implies F = \iint_{\Omega} L((U) - f)\phi d\Omega = 0 \quad (\text{III.8})$$

❖ Inconvénients des méthodes Variationnelles :

Le premier inconvénient est l'imprécision de cette méthode lorsque le domaine d'étude est infini.

Le deuxième inconvénient est la difficulté, pour ces méthode, de prendre en charge les domaines à frontière complexes.

Enfin le troisième inconvénient est la difficulté de programmer ces méthodes, car il n'existe pas un modèle qui se répète d'un exemple à un autre.

III.A.2.3.3. Méthode des volumes finis (MVF):

La méthode des Volumes Finis est la méthode de choix pour les équations de conservation non linéaires.

Les méthodes aux volumes finis ont supplanté les méthodes classiques basées sur les différences finies dans le traitement des problèmes complexes notamment tridimensionnels. La technique comprend deux étapes importantes :

- le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle.

III.A.2.3.4. La méthode des Eléments Finis (MEF) :

La méthode des éléments finis, bien connue aujourd'hui, est la méthode la plus utilisée actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir. Le succès de la méthode réside principalement dans sa formulation : elle réunit les principes les plus forts de la méthode des différences finies et ceux de la méthode des équations intégrales : respectivement la discrétisation du domaine d'intégration et le principe de construction de l'approximation et sa formulation [20] [21].

La méthode des éléments finis améliore ces deux principes comme suit :

- a) Le domaine d'intégration n'est plus discrétisé par des points comme pour le cas de la méthode des différences finies, mais par des sous domaines continus ou des "continuum" dont le nombre est fini, et qu'on appelle élément finis (Fig III.3). En utilisant ce découpage (modélisation géométrique), la méthode fournit un modèle qui représente aussi fidèlement que possible le phénomène physique dans sa réalité.

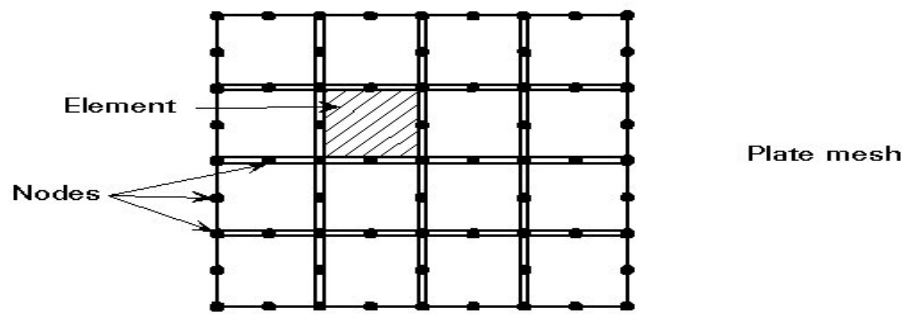


Fig.(III.3) : Exemple de maillage d'une plaque

- b) La formulation Intégrale, de type Galerkin, est appliquée non pas sur le domaine d'intégration global, mais sur des éléments finis standard, ayant des fonctions de formes normées, au lieu des fonctions de base de la méthode de Galerkin. La formulation devient unifiée pour les différents types de problèmes. Une bibliothèque d'éléments est alors mise à jour. La méthode devient alors programmable par excellence. Possédant tous ces atouts, la méthode ne cesse de se développer et de s'étendre de plus en plus à des domaines qui étaient jusque là du seul ressort des méthodes expérimentales.

La méthode des éléments finis à été introduite en grande partie par Zienkiewicz et développée en électromagnétisme par P.Silvester et M.V.K Chari en 1970. Elle consiste à découper, ou discrétiser le domaine étudié en éléments de forme simple, appelés éléments finis. Dans ce chaque élément on représente l'inconnue par des fonctions d'interpolations simples, qui sont généralement des polynômes de degrés un ou deux [19].

III.A.2.3.4. 1. Démarche éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes [20].

- discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations.

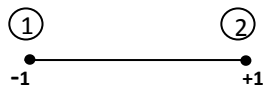
III.A.2.3.4. 2. Approximation par éléments finis :

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine concerné en un nombre fini de sous domaines appelés "Elément" dont on aurait préalablement choisi la géométrie.

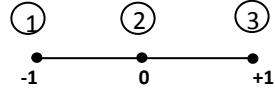
Pour des problèmes à une, deux ou trois dimensions, les éléments de bases appelés aussi éléments de références, sont :

➤ Eléments de bases :

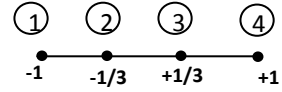
• **Eléments à une dimension :**



Linéaire (2 nœuds)



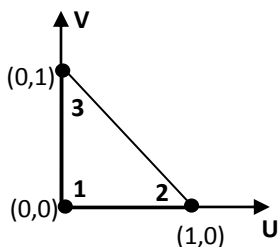
Quadratique (3 nœuds)



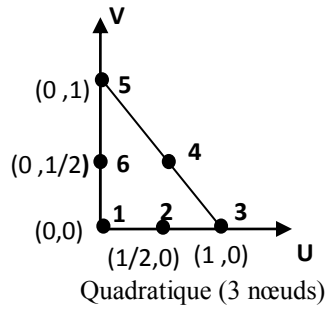
Cubique (4 nœuds)

• **Eléments à deux dimensions :**

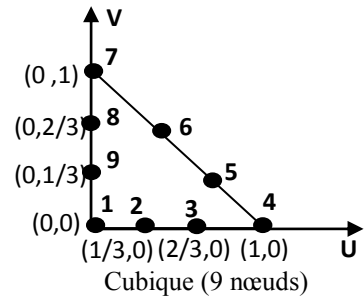
1) *Elément triangulaire :*



Linéaire (3 nœuds)

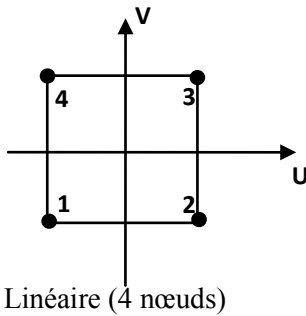


Quadratique (6 nœuds)

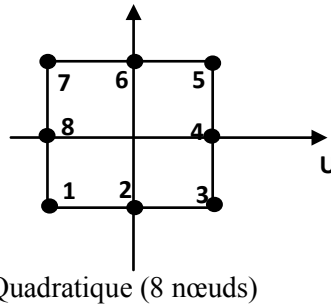


Cubique (9 nœuds)

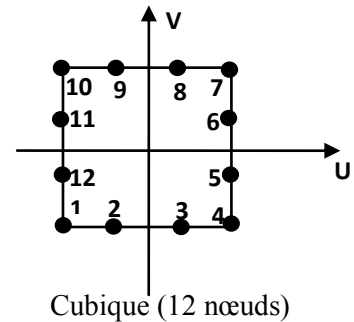
2) *Elément carré :*



Linéaire (4 nœuds)

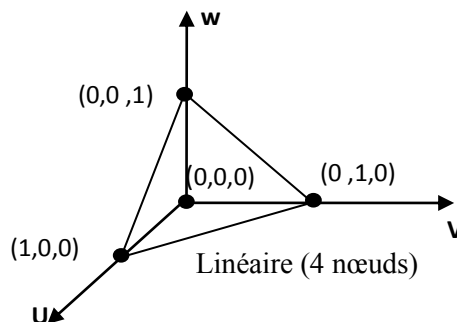


Quadratique (8 nœuds)



Cubique (12 nœuds)

• **Eléments à trois dimensions :**



Linéaire (4 nœuds)

III.A.2.3.4. 3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

❖ **Avantage :**

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte de la non linéarité accrue.
- Temps de calcul relativement avantageux.

❖ **Inconvénients :**

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaine infinie.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.

III.A.3. Formulations éléments finis des équations électromagnétiques :

L'équation magnétodynamique avec terme de source en coordonnées cartésiennes est donnée sous la forme suivante [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = -J_{sz} \quad (\text{III.9})$$

Nous appliquons la méthode de Galerkin à l'équation (II.9), la formulation intégrale de l'équation s'écrit :

$$\iint_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \right) \alpha_i \, dx dy = - \iint_{\Omega} J_{sz} \alpha_i \, dx dy \quad (\text{III.10})$$

C'est la forme forte de la formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique.

L'intégration par partie des dérivées d'ordre deux génère la forme faible de cette formulation, en appliquant le théorème de Green, nous aurons :

$$\iint_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] \right) \alpha_i \, dx dy = - \iint_{\Omega} \nu \overrightarrow{\nabla A_z} \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \, dx dy + \int_{\Gamma} \nu \frac{\partial A_z}{\partial n} \alpha_i \, d\Gamma \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant (III.11) dans (III.10) on aura :

$$\iint_{\Omega} \nu \overrightarrow{\nabla A_z} \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \, dx dy - \int_{\Gamma} \nu \frac{\partial A_z}{\partial n} \alpha_i \, d\Gamma + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \alpha_i \, dx dy = \iint_{\Omega} J_{sz} \alpha_i \, dx dy \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas des conditions aux limites de types Dirichlet ou Neumann homogènes, le terme sur la frontière est nul, donc $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$.

\mathbf{n} → est le vecteur unitaire normal au point considéré de la frontière.

Donc l'équation (III.12) devient :

$$\iint_{\Omega} \nu \overrightarrow{\nabla A_z} \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \, dx dy + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \alpha_i \, dx dy = \iint_{\Omega} J_{sz} \alpha_i \, dx dy \quad (\text{III.13})$$

L'interpolation d'un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément ; il s'agit alors de l'interpolation nodale.

Dans l'approximation nodale que nous utiliserons dans ce cas, l'inconnu A est exprimée dans le système cartésien par :

$$A(x, y) = \sum_{j=1}^{nn} \alpha_j(x, y) A_j \quad (III.14)$$

$A(x, y) \longrightarrow$: Inconnue.

$nn \longrightarrow$: nombre de nœuds du domaine subdivisé.

$\alpha_j(x, y) \longrightarrow$: Fonction de forme au nœud j.

$A_j \longrightarrow$: Valeur de l'inconnue au nœud j.

La discrétisation de A à l'aide des fonctions d'approximations (III.14) conduit à l'équation suivante :

$$\sum_{j=1}^{nn} \int_{\Omega} [v \nabla \alpha_i \cdot \nabla (\alpha_i A_j)] dx dy + \sum_{j=1}^{nn} \int_{\Omega} \left[\sigma \alpha_i \cdot \frac{d(\alpha_i A_j)}{dt} \right] dx dy - \int_{\Omega} [J_s \alpha_i] dx dy = 0 \quad (III.15)$$

L'équation obtenue est une équation différentielle du premier ordre par rapport au temps

La dérivée temporelle peut être traitée par la méthode d'Euler :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A^{t+1} - A^t}{\Delta t} \quad (III.16)$$

En remplaçant la dérivée temporelle intervenant dans le système (III.17) par l'approximation (III.18), il vient :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{nn} \Delta t \left(\int_{\Omega} \{ [v \nabla \alpha_i \cdot \nabla (\alpha_j)] dx dy \} A_j^{t+1} - \int_{\Omega} [J_s \alpha_i] dx dy \right) + \\ & \sum_{j=1}^{nn} \left(\int_{\Omega} [\sigma \alpha_i \alpha_j] dx dy \right) A_j^{t+1} - A_j^t = 0 \end{aligned} \quad (III.17)$$

Le système algébrique à résoudre sera donc donné par la relation matricielle suivante :

$$\Delta t ([M] \{A\} + \{F\}) + [K] (\{A^{t+1} - A^t\}) = 0 \quad (III.18)$$

$$M_{ij} = \int_{\Omega} [v \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j] dx dy \quad (III.19)$$

$$F_i = \int_{\Omega} [J_s \alpha_i] dx dy \quad (III.20)$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} [\sigma \alpha_i \alpha_j] dx dy \quad (III.21)$$

$\Delta t \longrightarrow$ Est le pas de temps

$A^{t+1} \longrightarrow$ Est le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel vecteur magnétique aux nœuds du maillage à l'instant t+1.

$A^t \longrightarrow$ Sa valeur à l'instant (t).

III.A.4. Conclusion :

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

B) Méthode du traitement des problèmes inverses :**III.B.1. Introduction :**

Le terme de réseaux de neurones « formels » (ou « artificiels ») fait rêver certains, et fait peur à d'autres.

La vérité est à la fois plus prosaïque et plus rassurante ; les réseaux de neurones constituent maintenant une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, qui devrait faire partie de la boîte à outils de tout ingénieur, chercheurs soucieux de tirer le maximum d'informations pertinentes des données dont il dispose : faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux, etc.... Tous les cursus relatifs au traitement de l'information dans les universités ou grandes écoles consacrent une place plus au moins importante à ces techniques [22].

III.B.2. Historique :

Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été menés par *McCulloch* et *Pitts*. Ils décrivent les propriétés du système nerveux à partir de neurones idéalisés : ce sont des neurones logiques (0 ou 1).

Dix années plus tard, on a constitué le premier modèle réel d'un réseau de neurones [22].

En 1960, le premier perceptron est créé par *Rosenblatt*.

La disponibilité croissante des minis et microordinateurs, vers la fin des années 1970, a permis aux réseaux de neurones de prendre un nouveau départ.

On attribue à *Hopfield* (un physicien de Caltech) un rôle majeur dans cette résurrection.

L'histoire des réseaux de neurones constitue un paradoxe : les quelques chercheurs qui, au début des années 1990, ont misé sur le développement de cette technique, ont gagné leur pari ; pourtant, les raisons de ce succès ne sont pas celles qu'ils envisageaient à l'époque. En effet, la motivation initiale du développement de réseaux de neurones formels était « neuromimétique ». Elle partait du constat que les organismes les plus simples – les invertébrés, par exemple – effectuent, sans effort apparent, des tâches que les ordinateurs ne réalisent qu'imparfaitement, au prix de lourds calculs : la reconnaissance d'objets indépendamment de leur taille, de leur orientation et de leur environnement, en est un exemple frappant [23].

Dans ces conditions, pourquoi ne pas s'inspirer du fonctionnement des systèmes nerveux pour concevoir des machines plus habiles que les ordinateurs conventionnels ?

Cette idée avait déjà présidé aux premières recherches sur les réseaux de neurones dans les années 1960 ; elles avaient échoué faute d'outils mathématiques adaptés à la conception et à l'analyse de réseaux de complexité suffisante. De nos jours encore, une approche véritablement « neuromimétique » se heurterait à une difficulté majeure : nul ne sait comment fonctionnent les systèmes nerveux. En dépit des immenses progrès réalisés au cours des vingt dernières années dans le domaine de la neurobiologie expérimentale, des questions aussi fondamentales que celle du codage des informations par le cerveau restent l'objet de nombreuses recherches et de vives controverses, sans réponse définitive. S'il existe de très nombreux modèles du fonctionnement de telle partie du cerveau ou de tel système sensoriel, il n'existe pas de théorie du traitement de l'information par les systèmes nerveux [22][23].

III.B.3. Les réseaux de neurones:

III.B.3.1. Neurone Biologique :

Le **neurone biologique** (Fig III.4) est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques [23].

Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées **axones**. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble.

Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (**synapse**) d'un autre neurone.

Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie [10].

La **dendrite** conduit l'influx nerveux, induit à son extrémité, jusqu'au corps cellulaire : c'est un prolongement afférent.

III.B.3.2. Neurone Artificiel :

Le neurone artificiel « formel » est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. À chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire (neurone) est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. À chaque connexion d'entrée est associé un poids [24].

Il est commode de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la (Fig III.5).

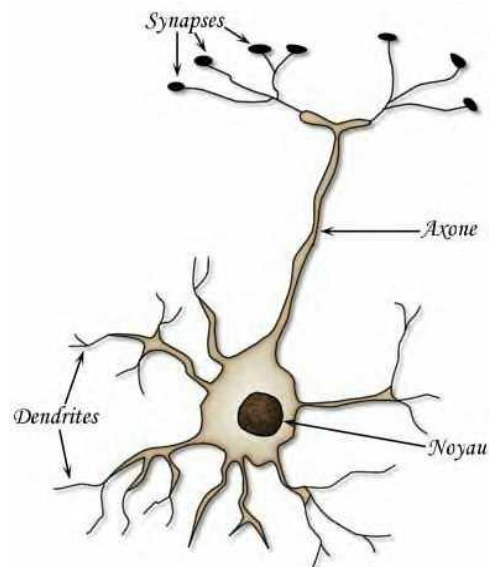


Fig.(III.4) : Neurone Biologique

Cette représentation est à l'origine de la première vague d'intérêt pour les neurones formels, dans les années 1940 à 1970 (Mcculloch et al., 1943), (Minsky et al., 1969).

Un traitement parallèle et efficace de l'information ainsi que des mécanismes d'apprentissage inspirés des cellules nerveuses leur confèrent des propriétés émergentes leur permettant de solutionner des problèmes longtemps qualifiés de « complexes », notamment dans les domaines de la classification, de la modélisation ou de la commande.

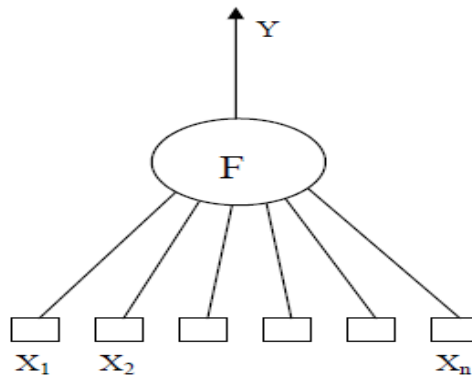


Fig. (III.5) : Neurone Artificiel « formel ».

Le neurone réalise alors trois opérations sur ses entrées [24]:

- ✓ Pondération : multiplication de chaque entrée par un paramètre appelé poids de connexion,
- ✓ Sommation : une sommation des entrées pondérées est effectuée
- ✓ Activation : passage de cette somme dans une fonction, appelée fonction d'activation (Fig III.6).

La valeur calculée est la sortie du neurone qui est transmise aux neurones suivants.

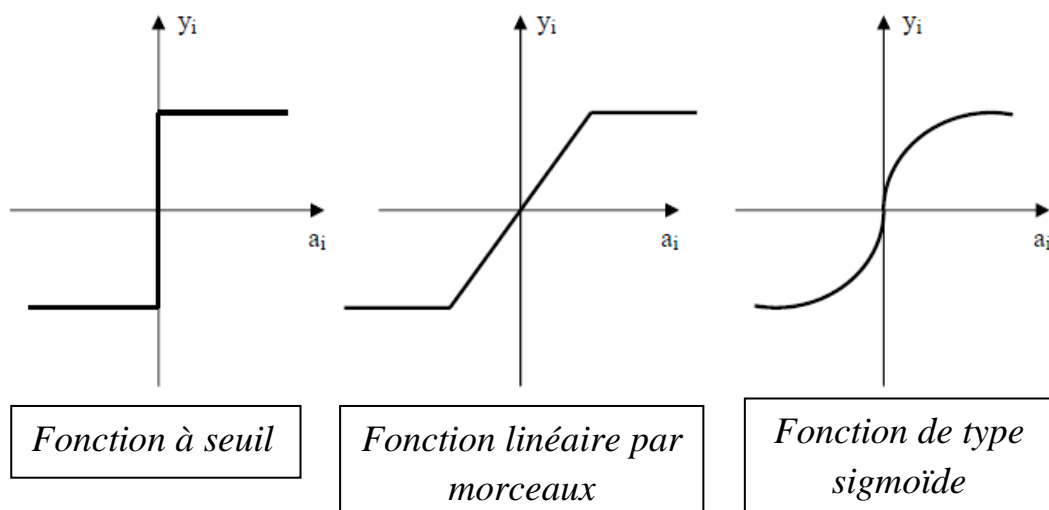


Fig. (III.6) : Différents types de fonction de transfert pour le neurone artificiel.

La fonction f est appelée fonction d'activation (*Fig III.6*). Elle peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable, et bornée entre 0 et 1 :

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-bx}} \quad (\text{III.22})$$

La fonction f peut être paramétrée de manière quelconque. Deux types de paramétrages sont fréquemment utilisés :

- ✓ Les paramètres sont attachés aux entrées du neurone : la sortie du neurone est une fonction non linéaire d'une combinaison des entrées $\{x_i\}$ pondérées par les paramètres $\{w_i\}$, qui sont alors souvent désignés sous le nom de poids.

$$y = th \left[w_0 + \sum_{i=1}^{n-1} w_i \cdot x_i \right] \quad (\text{III.23})$$

- ✓ Les paramètres sont attachés à la non-linéarité du neurone : ils interviennent directement dans la fonction f .

III.B.3.3. Architecture des Réseaux de Neurones :

Un réseau de neurone Artificiel, est constitué généralement de trois couches :

- **Une couche d'entrée** : elle est constituée de l'ensemble des neurones du réseau qui reçoivent les données du problème. Sa taille est directement liée aux nombre de variable d'entrées.
- **Une couche de sortie** : elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. Les résultats souhaités sont fournis par cette couche.
- **Les couches cachées** : ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau. En générale, les fonctions d'activation sont non linéaires sur ces couches.

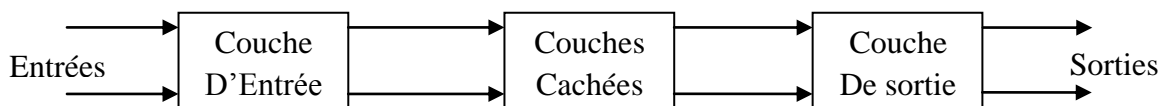


Fig. (III.7) : Architecture générale d'un réseau de neurones.

On distingue deux structures de réseau [24], en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à-dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les «connexions» entre eux-ci :

- ✓ Les réseaux de neurones non bouclés (ou acycliques, ou statiques).
- ✓ Les réseaux de neurones bouclés (ou récurrents, ou dynamiques).

III.B.3.3.1. Les réseaux de neurones non bouclés :

Un réseau de neurones *non bouclé* réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones.

Dans un tel réseau (*Fig III.8*), le flux d'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. Si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les « connexions »* entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique.

Tout neurone dont la sortie est une sortie du réseau est appelé « neurone de sortie ». Les autres, qui effectuent des calculs intermédiaires, sont des « neurones cachés ».

Il existe deux types de réseaux de neurones : les réseaux complètement connectés et les réseaux à couche. Le réseau de neurones à une couche cachée et une sortie linéaire est un cas particulier de ce dernier type.

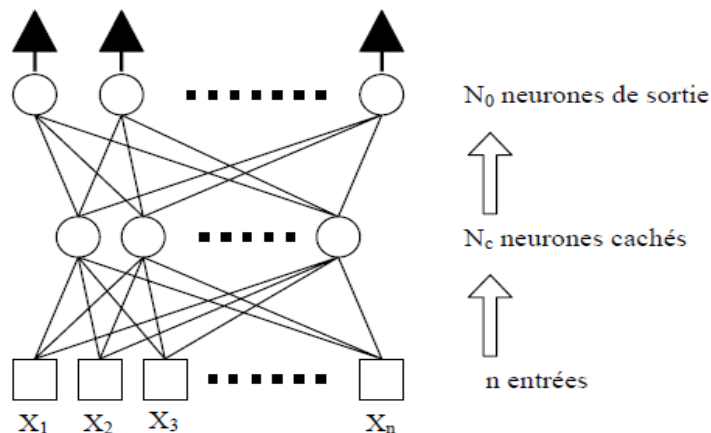


Fig. (III.8) : Réseaux de neurones à n entrées, une couche de N_c neurones cachés et N_0 neurones.

III.B.3.3.1.1. Les réseaux de neurones complètement connectés :

Dans un réseau complètement connecté, les entrées puis les neurones (cachés et de sortie) sont numérotés, et, pour chaque neurone :

- Ses entrées sont toutes les entrées du réseau ainsi que les sorties des neurones de numéro inférieur.
- Sa sortie est connectée aux entrées de tous les neurones de numéro supérieur.

III.B.3.3.1.2. Les réseaux de neurones à couches :

Dans une architecture de réseaux à couches, les neurones cachés sont organisés en couches, les neurones d'une même couche n'étant pas connectés entre eux. De plus les connexions entre deux couches de neurones non consécutives sont éliminées.

(*) Le terme de "connexions" est une métaphore : dans la très grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par des programmes d'ordinateurs, non des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; néanmoins, le terme de connexion, issu des origines biologiques des réseaux de neurones, est passé dans l'usage, car il est commode quoique trompeur. Il a même donné naissance au terme de *connexionnisme*.

Une telle architecture est historiquement très utilisée, surtout en raison de sa pertinence en classification.

Remarque :

Dans un réseau de neurones non bouclé, le temps ne joue aucun rôle fonctionnel : si les entrées sont constantes, les sorties le sont également. Le temps nécessaire pour le calcul de la fonction réalisée par chaque neurone est négligeable et on peut considérer ce calcul comme instantané [24].

Pour cette raison, les réseaux non bouclés sont souvent appelés « réseaux statiques », par opposition aux réseaux bouclés ou « dynamiques ». Ils sont utilisés en classification, reconnaissance des formes (caractères, parole, ...), en prédiction.

III.B.3.3.2. Les réseaux de neurones bouclés :

L'architecture la plus générale pour un réseau de neurones est le « réseau bouclé », dont le graphe des connexions est cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de « cycle »). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération.

Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arête de son graphe) est attaché, outre un poids comme pour les réseaux non bouclés, un retard, multiple entier (éventuellement nul) de l'unité de temps choisie. Une grandeur, à un instant donné, ne pouvant pas être fonction de sa propre valeur au même instant, tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul.

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales. Pour éliminer le problème de la détermination de l'état du réseau par bouclage, on introduit sur chaque connexion « en retour » un retard qui permet de conserver le mode de fonctionnement séquentiel du réseau (Fig III.9)

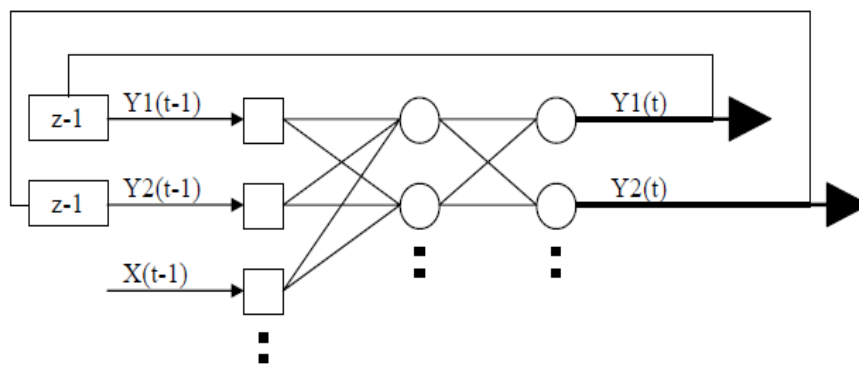


Fig (III.9) : Réseaux de neurones bouclés.

Le graphe des connexions de réseaux récurrents est cyclique. Ces réseaux sont décrits par un système d'équations aux différences [24].

III.B.3.3.2.1. Forme canonique des réseaux récurrents :

Il a été montré [Nerrand et al., 1993] que tout réseau bouclé peut être mis sous une forme particulière, appelée forme canonique, qui est la représentation d'état minimale de la fonction réalisée par ce réseau. Cette forme canonique est constituée d'un graphe acyclique, et de connexions à retard unité reliant certaines sorties de ce graphe à ses entrées. La fonction réalisée par un réseau de neurones ayant cette structure particulière est décrite par les équations aux différences suivantes [24]:

$$x(k + 1) = \phi(x(k), u(k + 1)) \tag{III.24}$$

$$y(k + 1) = \psi(x(k + 1), u(k + 1)) \tag{III.25}$$

Où :

- $\mathbf{x}(k)$ est le vecteur d'état à l'instant k .
- $\mathbf{u}(k)$ est le vecteur des variables de commande exogènes.
- $\mathbf{y}(k)$ le vecteur des sorties.
- Ψ et Φ sont deux fonctions qui dépendent de la structure de la partie acyclique du réseau.

III.B.3.4. Structure d'Interconnexion :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la «topologie» du modèle. Le plus souvent, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones [23]; cependant, celui-ci peut être quelconque.

III.B.3.4.1. Réseaux monocouche :

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids. Fig (III.10a). [10]

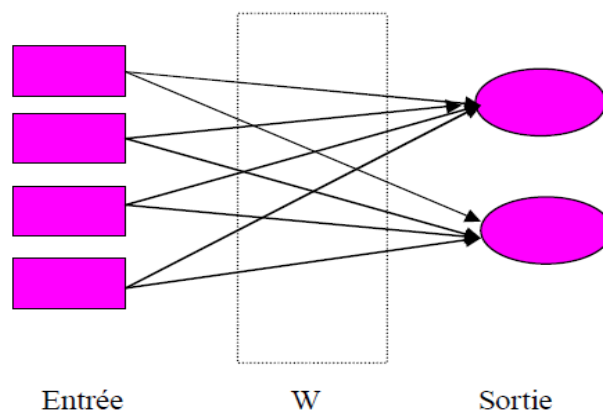


Fig (III.10a) : Réseaux monocouche

Parmi les réseaux de neurones à une seule couche on trouve, le mode perceptron et le mode l'Adaline [15].

a) Le mode Perceptron :

Le perceptron (Fig III.10b) est le premier réseau de neurones mis au point, il est linéaire et monocouche, avec une fonction d'activation à seuil.

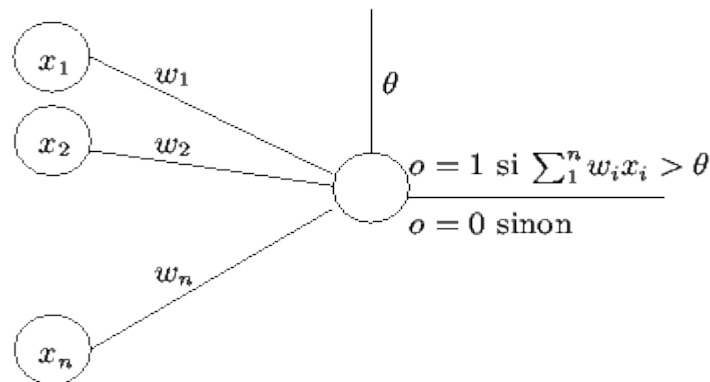


Fig.(III.10b) : Schéma du perceptron.

$$y = F(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + \theta) \tag{III.26}$$

Le biais θ qui intervient dans l'expression ci-dessus sert à translater la fonction de décision parallèlement à elle-même. De même, les n poids symétriques font tourner la droite de décision, durant la phase d'apprentissage, pour la ramener au point de fonctionnement du réseau.

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

$$F(s) = \begin{cases} 1 & \text{Si } s \geq 0 \\ -1 & \text{Si } s < 0 \end{cases} \tag{III.27}$$

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

$$w_1 \cdot x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n + \theta = 0 \tag{III.28}$$

Durant le processus d'apprentissage, le mouvement de la droite de décision dans le cas d'un perceptron monocouche, est régit par la règle de correction de l'erreur plus généralement appelée d'apprentissage du perceptron.

$$w_{ij}(k + 1) = w_{ij}(k) + \alpha(d_i - y_i(k)) \cdot X_j \tag{III.29}$$

Avec :

α : Constante positive.

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

d_i : $i^{\text{ième}}$ sortie désirée.

k : $k^{\text{ième}}$ itération.

W_{ij} : poids reliant la $j^{\text{ième}}$ composante du vecteur d'entrée au $i^{\text{ième}}$ neurone.

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

b) Le mode Adaline :

L'adaline (**Ad**aptatif **L**inear **E**lement) de Widrow et Hoff est un réseau à une seule couche. Ce modèle est similaire au modèle de perceptron, seule la fonction de transfert change, mais reste toujours linéaire

Le réseau Adaline trouve son application en classification de problème linéairement séparable en approximation linéaire de fonctions.

+ Remarque :

Les modèles des neurones utilisés dans le perceptron et l'adaline sont des modèles linéaires.

Séparation linéaire : on dit que deux classes A et B, sont linéairement séparables si on arrive à les séparer par une droite coupant le plan en deux (Fig III.10c).

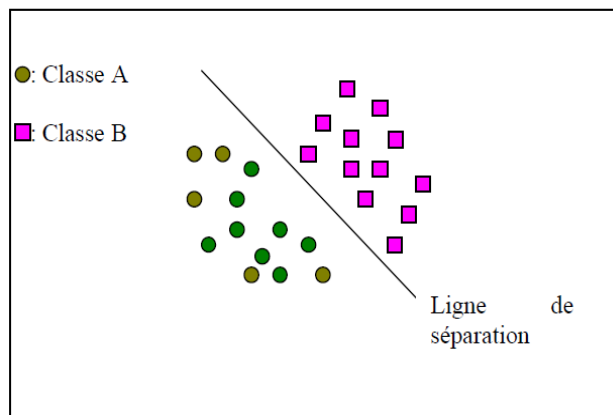


Fig. (III.10c) : La séparation linéaire entre la classe A et B.

III.B.3.4.2. Réseaux multicouches :

Les neurones sont arrangés par couche. On place ensuite bout à bout plusieurs couches et l'on connecte les neurones de deux couches adjacentes. Les entrées des neurones de la deuxième couche sont en fait les sorties des neurones de la couche amont. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent le vecteur d'entrée Fig (III.11). Ils calculent alors leurs sorties qui sont transmises aux neurones de la seconde couche qui calculent eux aussi leurs sorties et ainsi de suite de couche en couche jusqu'à celle de sortie. Il peut y avoir une ou plusieurs sorties à un réseau de neurones [23].

Dans un réseau multicouche classique, il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones de la couche aval. Tous les neurones de la couche amont sont connectés à tous les neurones de la couche aval.

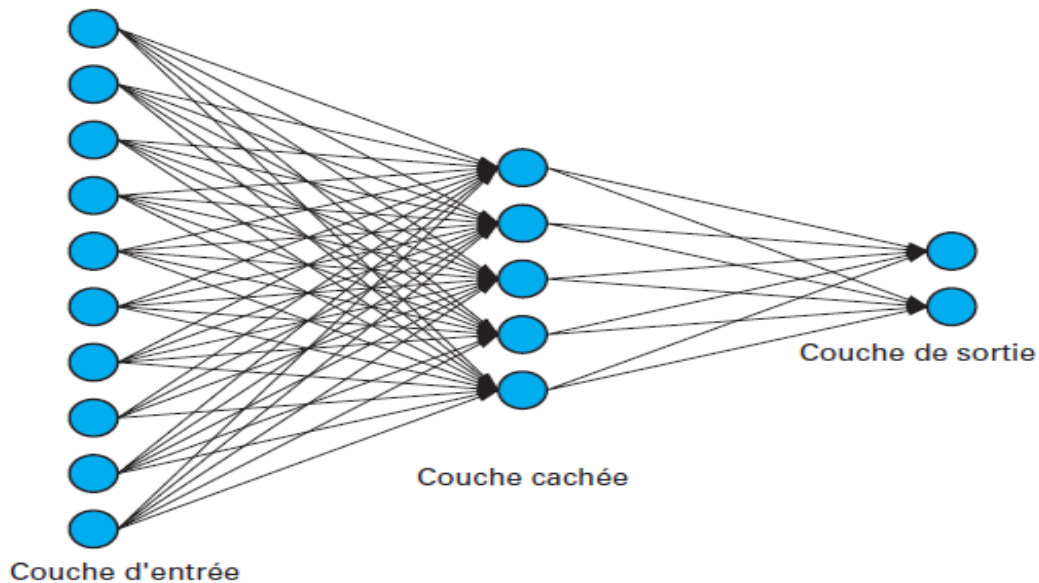


Fig.(III.11) : Réseaux multicouches classique.

III.B.3.4.3. Réseaux multicouche à connexions locales :

C'est aussi un réseau multicouche, mais tous les neurones d'une couche amont ne sont pas connectés à tous les neurones de la couche aval *Fig (III.12)*. Nous avons donc dans ce type de réseau de neurones un nombre de connexions moins important que dans le cas du réseau de neurones multicouche classique [23].

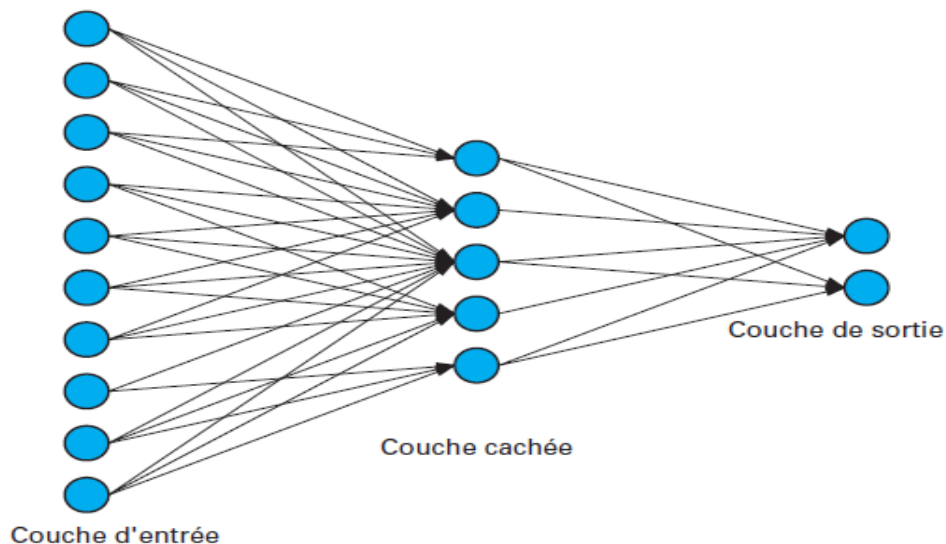


Fig.(III.12) : Réseaux multicouche à connexions locales.

III.B.3.4.4. Réseaux à connexions récurrentes :

Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche *Fig (III.13)*. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche.

Les réseaux à connexions récurrentes sont des réseaux plus puissants car ils sont séquentiels plutôt que combinatoires comme l'étaient ceux décrits précédemment. La rétroaction de la sortie vers l'entrée permet à un réseau de ce type de présenter un comportement temporel [23].

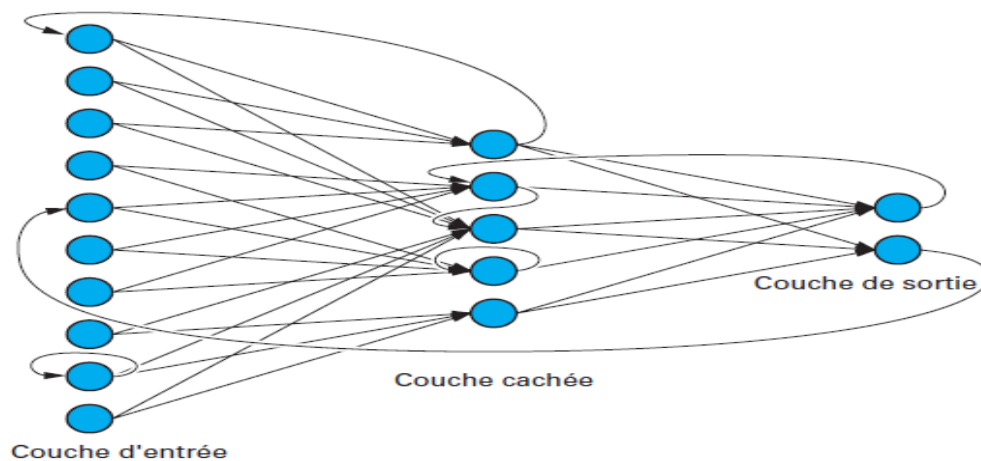


Fig.(III.13) : Réseaux à connexions récurrentes.

III.B.3.4.5. Réseaux à connexions complexes ;(Réseau d'Hopfield):

Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau y compris lui-même, c'est la structure d'interconnexion la plus générale *Fig (III.14)*.

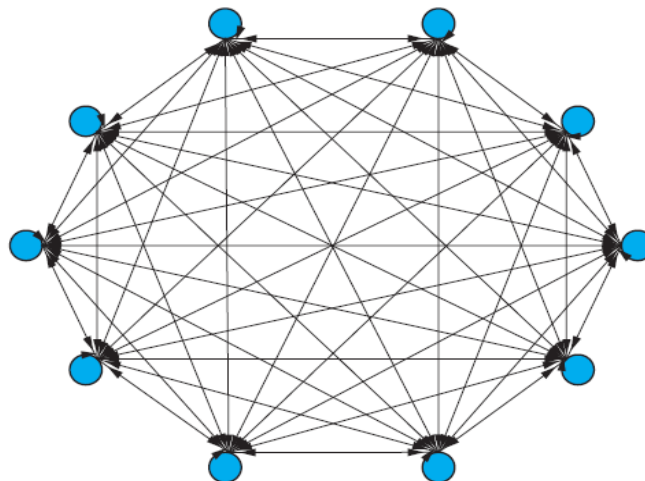


Fig.(III.14) : Réseaux à connexions complexes.

III.B.3.4.6. Perceptron Multicouches :

Nous nous focalisons ici sur une forme particulière de réseaux de neurones, les perceptrons multicouches, c'est sans doute, avec les cartes topologiques, le modèle neuronal le plus populaire et le plus utilisé [27].

III.B.3.4.6.1. Principe et architecture :

Dans un perceptron multicouche (PMC) il n'existe pas de cycles dans les connexions (à noter qu'une multitude de variantes existe, notamment des réseaux de neurones dits récurrents qui incluent des cycles dans les connexions). Un PMC est organisé en couches de neurones, la couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et la couche de sortie. Il n'existe de connexions que d'un neurone d'une couche vers un neurone de la couche suivante. L'information fournie en entrée du réseau, c'est-à-dire sur sa couche de « capteurs », est propagée de couche en couche, sur la première couche cachée, puis de là sur la seconde couche cachée... jusqu'à la couche de sortie (*Fig III.15*).

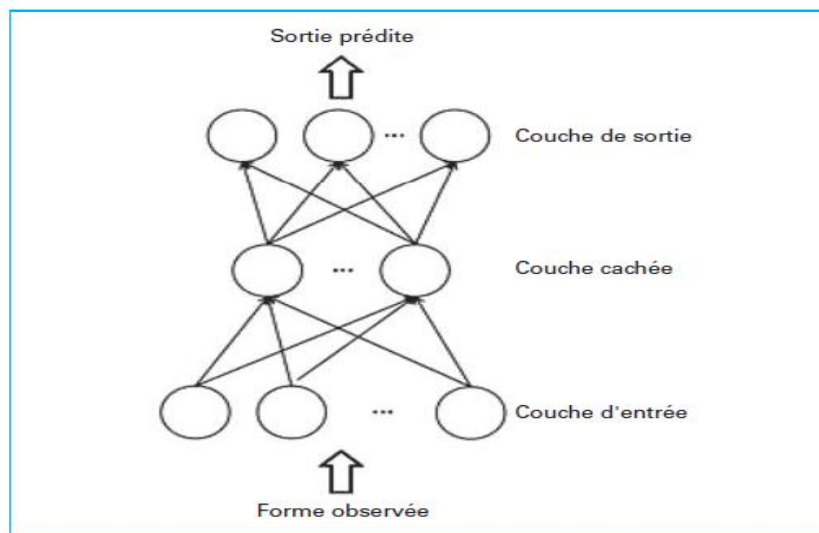


Fig.(III.15) : Architecture d'un perceptron Multicouche à une couche cachée.

A titre d'illustration, la fonction implémentée par un PMC à une couche cachée est donnée par :

$$F_w(x) = \left[g^O \left(w_{i,O}^O + \sum_{j=1}^{N_H} w_{i,j}^O \cdot g \left(w_{j,O}^H + \sum_{k=1}^{N_I} w_{j,k}^H \cdot X_k \right) \right) \right]_{i=1 \dots N_O} \quad (III.30)$$

Où on a pris la convention de suffixer les variables par I, H, et O, suivant qu'il s'agit de la couche d'entrée (Input), de la couche cachée (Hidden) et de la couche de sortie (Output). Ainsi N_I représente le nombre d'entrées du réseau (la dimension des formes), N_H le nombre de cellules cachées et N_O le nombre de sorties du réseau (usuellement le nombre de classes). Les poids sont indicés par les indices des neurones dans la couche d'arrivée et dans la couche de départ.

Ainsi $w_{i,j}^0$ représente le poids de la connexion du neurone j de la couche cachée vers le neurone i de la couche de sortie. Les indices de neurones égaux à 0 correspondent à des valeurs de biais.

La famille des perceptrons multicouches à une couche cachée est une famille d'approximateurs universels, ce qui signifie que toute fonction de \mathbb{R}^n vers \mathbb{R}^p , « suffisamment régulière », peut être approximée à quelque précision que ce soit par un réseau de neurones à une couche cachée avec n neurones d'entrée et p neurones de sortie. Il s'agit toutefois d'un théorème d'existence qui ne dit pas combien ce réseau a de cellules sur sa couche cachée ni quelles valeurs de poids utiliser.

III.B.3.5. Apprentissage des réseaux de neurones:

Le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées face à une source d'information (Hebb, 1949; Grossberg, 1982; Rumelhart et al., 1986).

On appelle « apprentissage » des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée.

Autrement dit : l'« apprentissage » est une phase du développement du réseau de neurones durant laquelle on calcule les poids des neurones de telle manière que les sorties du réseau soient aussi proches que possible des sorties désirées [23]. L'apprentissage fait appel à des exemples de comportement du processus à modéliser.

Sur la (Fig III.16) ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test.

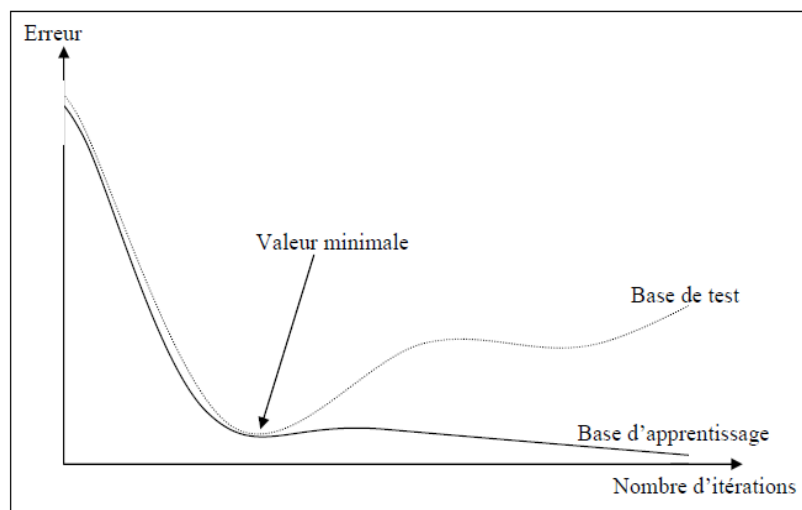


Fig. (III.16) : Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations

III.B.3.5.1. Types d'Apprentissage des réseaux de neurones:

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories (Hassoum, 1995) : les règles d'apprentissage *supervisé*, *non supervisé*, et *renforcé*. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision (Weiss et Kulikowski, 1991).

III.B.3.5.1.1. Apprentissage supervisé :

L'apprentissage est dit **supervisé** lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type: (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée) *Fig (III.17)*. Tout le problème de l'apprentissage supervisé consiste, étant donné un vecteur d'apprentissage de n couples (x, y) $i = 1, 2, \dots, n$, à déterminer le vecteur des poids des neurones capables de prédire le même vecteur de sortie à partir du même vecteur d'entrée.

Cet apprentissage n'est possible que si un large jeu de données est disponible et si les solutions sont connues pour les exemples de la base d'apprentissage.

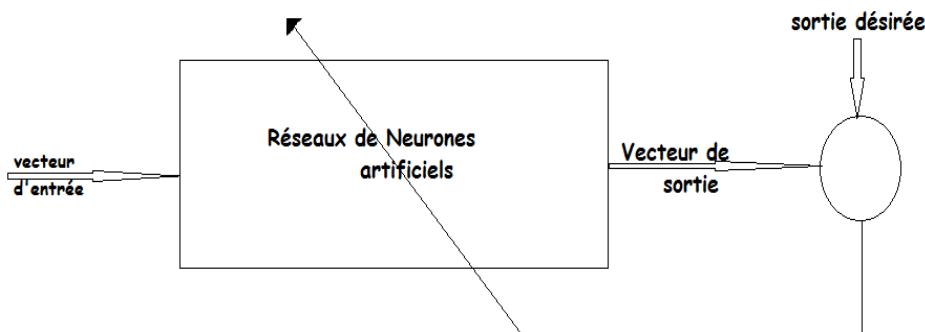


Fig.(III.17) : Apprentissage supervisé.

III.B.3.5.1.2. Apprentissage non supervisé :

L'apprentissage est qualifié de *non supervisé* lorsque seules les valeurs d'entrées sont disponibles *Fig (III.18)*. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse pour des valeurs d'entrées similaires.

L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto-organisation, « self-organizing » (Kohonen, 1987).

L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle.

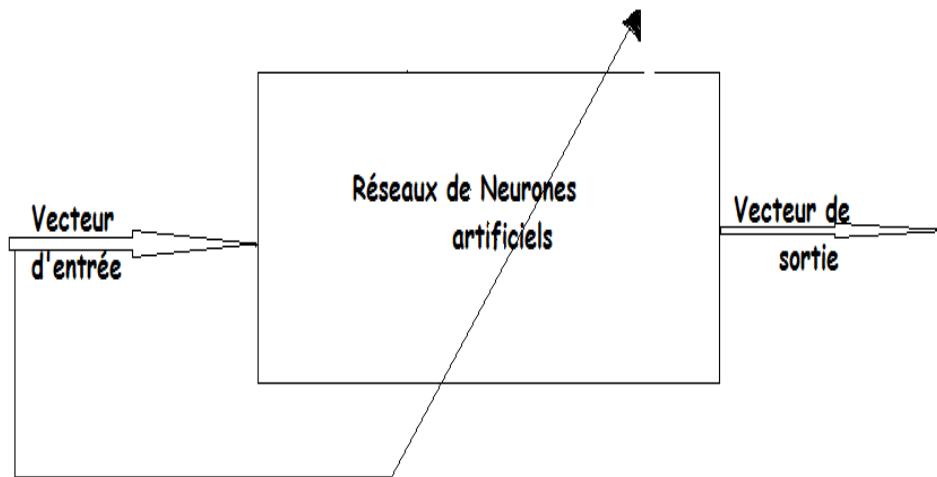


Fig. (III.18) : Apprentissage non supervisé.

III.B.3.5.1.3. Apprentissage renforcé :

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations.

Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle (White et Sofge, 1992; Sutton, 1992).

III.B.3.5.2. Algorithme d'Apprentissage:

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétro propagation, la Méthode Quasi-Newton, etc.....

III.B.3.5.2.1. Algorithme de rétro propagation du gradient :

La rétropropagation est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine de réseaux de neurones. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables.

La technique de rétro propagation du gradient (Back propagation en anglais) est une méthode qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau, de la dernière couche vers la première. L'historique des publications montre que l'ARP a été découvert indépendamment par différents auteurs mais sous différentes appellations.

Mathématiquement, cette méthode est basée sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables. Dans cette méthode, l'erreur commise en sortie du réseau sera rétropropagée vers les couches cachées d'où le nom de rétropropagation.

L'objectif de la méthode de la rétropropagation est d'adapter les paramètres w_{ij} de façon à minimiser une fonction de cout donnée par :

$$E(W) = \sum_{p=1}^T E_p(w) \quad (\text{III.31})$$

$$\text{Avec : } E_p(W) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m [y_i^d(k) - y_i(k)]^2 \quad (\text{III.32})$$

Où $E(w)$ est l'erreur quadratique au niveau de la couche de sortie du réseau, $y_i^d(k)$ est le vecteur de sortie désiré, $y_i(k)$ le vecteur de sortie de réseau et T le nombre d'exemples ou longueur de l'ensemble d'entraînement.

a) Principe de la rétropropagation :

L'approche la plus utilisée pour la minimisation de la fonction E est basée sur la méthode du gradient. On commence l'entraînement par un choix aléatoire des vecteurs initiaux du poids.

Le principe de la rétro propagation peut être décrit en trois étapes fondamentales : acheminement de l'information à travers le réseau; rétro propagation des sensibilités et calcul du gradient; ajustement des paramètres par la règle du gradient approximé. On refait la même procédure pour tous les exemples d'apprentissage. Ce processus est répété jusqu'à ce que les sorties du réseau soient suffisamment proches des sorties désirées.

b) Adaptation des poids :

L'adaptation des poids se fait par la méthode du gradient basée sur la formule itérative suivante :

$$W_{ij}^l(k+1) = W_{ij}^l(k) - \Delta W_{ij}^l \quad (\text{III.33})$$

$$\text{Avec : } \Delta W_{ij}^l = \eta \cdot \frac{\partial E(W)}{\partial W_{ij}^l(k)} \quad (\text{III.34})$$

Où k : représente le numéro d'itération, et η est une constante appelée facteur ou taux d'apprentissage

c) Algorithme de la rétropropagation :

Etape 1 : Initialiser les poids w_{ij}^l et les seuils internes des réseaux de neurones à des petites valeurs aléatoires.

Etape 2 : Calculer le vecteur d'entrée et de sortie désirée, correspondant.

Etape 3 : Calculer la sortie du réseau en utilisant les expressions suivante :

$$U_i^l(k) = f^l(P_i^l(k)) \quad (\text{III.35})$$

Avec :
$$P_i^l(k) = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} W_{ij}^l \cdot U_j^{l-1}(k) \quad (\text{III.36})$$

Etape 4 : Calculer l'erreur de sortie en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{\partial E_p(k)}{\partial W_i^l(k)} = -(y_i^d(k) - y_i(k)) \quad (\text{III.37})$$

Etape 5 : Calculer l'erreur dans les couches en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{\partial E_p(W)}{\partial W_i^l(k)} = \sum_{p=1}^{N_{l+1}} \frac{\partial E_p(W)}{\partial W_p^{l+1}(k)} \cdot \frac{\partial W_p^{l+1}(k)}{\partial W_i^l(k)} \quad (\text{III.38})$$

Etape 6 : Calculer le gradient de l'erreur par-rapport aux poids en utilisant l'expression (IV.13)

Etape 7 : Ajuster les poids selon l'expression (III.33).

Etape 8 : Si la condition sur l'erreur ou sur le nombre d'itérations est atteinte, aller à l'étape 9, sinon aller à l'étape 2

Etape 9 : Fin.

Ou : l nombre de couches.

$i=1,2,\dots,N_l$ (N_l nombre de neurones dans la couche l).

$J=1,2,\dots,N_{l-1}$ (N_{l-1} nombre de neurones dans la couche $l-1$).

$q=1,2,\dots,N_{l+1}$ (N_{l+1} nombre de neurones dans la couche $l+1$).

Bien que l'algorithme de rétropropagation soit le plus utilisé pour l'apprentissage supervisé des MLP, son implantation se heurte à plusieurs difficultés techniques. Il n'existe pas de méthodes permettant de :

- Trouver une architecture appropriée (nombres de couches, nombre de neurones).
- Choisir une taille et une qualité adéquate d'exemples d'entraînement.
- Choisir des valeurs initiales satisfaisantes pour les poids, et des valeurs convenables pour les paramètres d'apprentissage permettant d'accélérer la vitesse de convergence.
- Problème de la convergence vers un minimum local, qui empêche la convergence et cause l'oscillation de l'erreur.

III.B.3.5.2.2. L'algorithme de Levenberg-Marquardt :

L'algorithme de *Levenberg-Marquardt*, ou algorithme LM, permet d'obtenir une solution numérique au problème de minimisation d'une fonction, souvent non linéaire et dépendant de plusieurs variables. L'algorithme interpole l'algorithme de *Gauss-Newton* et l'algorithme du *gradient*. Plus stable que celui de Gauss-Newton, il trouve une solution même s'il est démarré très loin d'un minimum. Cependant, pour certaines fonctions très régulières, il peut converger légèrement moins vite. L'algorithme fut découvert par *Kenneth Levenberg*, puis publié par *Donald Marquardt*.

Cet algorithme est une méthode itérative de minimisation de fonctions. Supposons que l'on cherche à minimiser une fonction J par rapport à un vecteur de variables θ , que l'on se trouve, à l'étape $k-1$, au point θ_{k-1} et que l'on cherche à se déplacer vers un point θ_k . Alors, si le déplacement $\theta_{k-1} - \theta_k$ est suffisamment petit, on peut approcher le vecteur des résidus par un développement de Taylor au premier ordre :

$$y_p - f(X, \theta_k) \cong y_p - f(X, \theta_{k-1}) + Z_{k-1}(\theta_k - \theta_{k-1}) \quad (\text{III.39})$$

L'idée de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est de choisir θ_k de manière à minimiser la fonction $J(\theta_k)$ tout en limitant la distance entre θ_{k-1} et θ_k . On écrit donc :

$$E(\theta_k) = [y_p - f(X, \theta_k)]^t \cdot [y_p - f(X, \theta_k)] + \mu[\theta_{k-1} - \theta_k]^t \cdot [\theta_{k-1} - \theta_k] \quad (\text{III.40})$$

En utilisant l'équation (IV.18), on obtient l'expression des poids tels que $\frac{\partial E(\theta_k)}{\partial \theta_k} = 0$:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + (2 \cdot Z_{k-1}^t \cdot Z_{k-1} + \mu_{k-1} \cdot I)^{-1} \left. \frac{\partial J}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_{k-1}} \quad (\text{III.41})$$

Cette méthode fait partie des algorithmes de second ordre. En effet, on reconnaît dans l'expression précédente une approximation classique du Hessien de la fonction de coût :

$$H = \left\{ \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right\}_{i,j=1,\dots,N} = 2ZZ^t \quad (\text{III.42})$$

Le paramètre μ , appelé plus haut pas de l'apprentissage, permet d'adapter l'algorithme à la forme de la fonction de coût et de réaliser un bon compromis entre la méthode de Newton (μ nul), qui converge très rapidement au voisinage d'un minimum, et la méthode du gradient simple (μ grand), efficace loin des minima.

Pour rendre l'optimisation plus performante, on peut utiliser des méthodes de second ordre telles que les méthodes dites de Quasi-Newton ou de Newton modifiée.

III.B.3.5.2.3. Méthode Quasi-newton :

Cet algorithme nécessite la connaissance des valeurs de la fonction objective à minimiser et du vecteur des dérivées premières au point solution courant. Le vecteur des dérivées est évalué analytiquement.

Avec les méthodes Quasi-Newton (Dennis et al. 1983 ; Thibault et Grandjean, 1991), on veut généraliser la formule itérative de Newton.

$$X^{k+1} = X^k - \alpha^k [\nabla^2 \cdot f(x^k)]^{-1} \cdot \nabla f(x^k) \quad (\text{III.43})$$

Le principe des méthodes de résolution de type Quasi-Newton est de générer une séquence de matrices symétriques définies positives qui soient des approximations, toujours améliorées, de la matrice Hessienne réelle ou de son inverse. Désignons par H_k la suite d'approximation de l'inverse de la matrice Hessienne $[\nabla^2 \cdot f(x^k)]^{-1}$ et par B_k la suite des estimations de la matrice Hessienne $\nabla^2 \cdot f(x^k)$.

On recherche une méthode telle que, dans le cas d'un problème quadratique, la matrice B_k converge vers la valeur exacte des dérivées secondes (constantes dans ce cas), de sorte qu'en fin de convergence, on retrouve une convergence de type Newton. Si l'on applique la méthode à une fonction quelconque, B_k peut être considéré, à chaque instant, comme une approximation (définie positive) du Hessien.

III.B.3.5.3. Les Algorithmes génétiques:

Les algorithmes génétiques sont issus des travaux de *Holland*, en 1975. Initialement, ils n'étaient pas conçus pour faire de l'optimisation de fonctions, mais pour modéliser des comportements adaptatifs. En effet, les algorithmes génétiques modélisent un processus d'évolution des espèces. Ils sont inspirés de la théorie de l'évolution de *Darwin*.

Dans un algorithme génétique adapté à l'optimisation, une solution potentielle est considérée comme un individu dans une population [GOLDERBERG 1989]. La valeur de la fonction de coût associée à une solution mesure « l'adaptation » de l'individu associé à son environnement. Un algorithme génétique simule l'évolution, sur plusieurs générations, d'une population initiale dont les individus sont mal adaptés, au moyen d'opérateurs génétiques de production et de mutation. Après un certain nombre de générations, la population est constituée d'individus bien adaptés, autrement dit de solutions supposées « bonnes » au problème d'optimisation. La principale différence avec le circuit simulé ou la recherche tabou est que les algorithmes génétiques manipulent des populations de solutions, au lieu de manipuler une seule solution, au lieu de manipuler une seule solution que l'on améliore statiquement de manière itérative. Ils peuvent être vus comme des algorithmes de recherche locale généralisés.

Actuellement, les algorithmes génétiques souffrent de limitations majeures, principalement dues à leur mise au point très délicate. Des choix structurels cruciaux doivent être faits pour leur mise au point (codage des solutions, types d'opérateurs de production, taille de la population initiale, nombre de générations nécessaire, pourcentage de mutations, de croisement, etc.). De plus, ces algorithmes sont lents et peuvent nécessiter des capacités de mémoire importante pour stocker les individus de plusieurs générations. En termes de résultats théoriques, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de résultats théoriques solides, comparables à ceux du recuit simulé.

III.B.4. Mise en œuvre des réseaux de neurones et domaines d'applications :

Pour réaliser l'approximation de la fonction de régression cherchée, à partir d'échantillons généralement bruités, à l'aide d'un réseau de neurones, trois étapes successives sont nécessaires [28]:

- il faut tout d'abord choisir l'architecture du réseau, c'est-à-dire les entrées externes, le nombre de neurones cachés, et l'agencement des neurones entre eux, de telle manière que le réseau soit en mesure de reproduire ce qui est déterministe dans les données ; le nombre de poids ajustables est un des facteurs fondamentaux de la réussite d'une application : si le réseau possède un trop grand nombre de poids, c'est-à-dire si le réseau est trop "souple", il risque de s'ajuster au bruit qui est présent dans les données de l'ensemble d'apprentissage, et, même en l'absence de bruit, il risque de présenter des oscillations non significatives entre les points d'apprentissage, donc de posséder de mauvaises propriétés d'interpolation (ou, dans le jargon des réseaux de neurones, de "généralisation") ; si ce nombre est trop petit, le réseau est trop "rigide" et ne peut reproduire la partie déterministe de la fonction. Le problème de la détermination de l'architecture optimale est resté pendant longtemps un problème ouvert, mais il existe actuellement diverses méthodes, mettant notamment en jeu des tests statistiques, qui permettent de déterminer cette architecture pour une vaste classe de réseaux; la (Fig III.19) illustre l'influence du nombre de paramètres sur la qualité de l'approximation.
- Il faut calculer les poids du réseau - ou, en d'autres termes, estimer les paramètres de la régression non linéaire - à partir des exemples, en minimisant l'erreur d'approximation sur les points de l'ensemble d'apprentissage, de telle manière que le réseau réalise la tâche désirée. Ce calcul des coefficients synaptiques constitue *l'apprentissage supervisé* pour le réseau de neurones.
- Il faut enfin estimer la qualité du réseau obtenu en lui présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage.

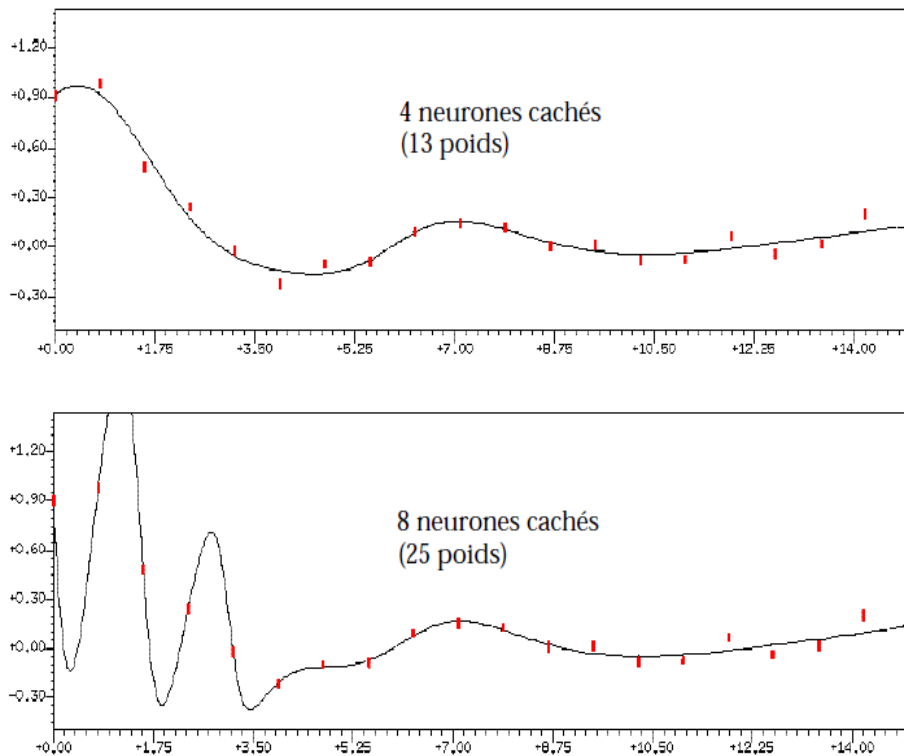


Fig (IV.19) : Le "surajustement" : le réseau le plus parcimonieux (4 neurones cachés, soit 13 coefficients) produit un bien meilleur ajustement qu'un réseau trop riche en coefficients (8 neurones cachés, soit 25 coefficients).

Les grands domaines d'application des réseaux de neurones découlent naturellement de leur propriété fondamentale :

- la régression non linéaire, ou modélisation de données statiques : il existe une immense variété de phénomènes statiques qui peuvent être caractérisés par une relation déterministe entre des causes et des effets ; les réseaux de neurones sont de bons candidats pour modéliser de telles relations à partir d'observations expérimentales, sous réserve que celles-ci soient suffisamment nombreuses et représentatives.
- la modélisation de processus dynamiques non linéaires : modéliser un processus, c'est trouver un ensemble d'équations mathématiques qui décrivent le comportement dynamique du processus, c'est-à-dire l'évolution de ses sorties en fonction de celle de ses entrées ; c'est donc typiquement un problème qui peut être avantageusement résolu par un réseau de neurones, si le phénomène que l'on désire modéliser est non-linéaire.
La prédiction de séries chronologiques (prédictions financières, prédiction de consommation, etc.) entre dans ce cadre.
- la commande de processus : commander un processus, c'est imposer à celui-ci un comportement défini à l'avance en fonction des signaux de commande ; l'ensemble commande + processus peut donc être considéré comme un système qui réalise une fonction (non linéaire) qu'un réseau de neurones peut approcher.

→ la classification : supposons que l'on désire classer des formes en deux catégories, A ou B, en fonction de certaines caractéristiques de ces formes ; on peut définir une fonction φ qui vaut +1 pour toutes les formes de la classe A et -1 pour toutes les formes de la classe B. Les réseaux de neurones sont de bons candidats pour réaliser une approximation de cette fonction φ , et l'on peut démontrer que cette approximation constitue une estimation de la probabilité d'appartenance de la forme inconnue à la classe A. Les réseaux de neurones fournissent donc une information très riche, qui est loin d'être une simple réponse binaire. Cette propriété remarquable (que les réseaux de neurones partagent avec d'autres classifieurs) n'est malheureusement pas mise à profit dans la plupart des applications.

III.B.5. Conclusion :

Aujourd'hui, ce n'est pas le paradigme neurobiologique qui contribue au développement des réseaux de neurones formels : au contraire, ce sont les réseaux de neurones formels qui constituent, de plus en plus fréquemment, à la compréhension des systèmes neuronaux vivants, car ils constituent des outils précieux pour en construire des modèles, simples mais utiles. Peut-être cette situation changera-t-elle dans l'avenir : les progrès réalisés dans l'analyse des systèmes vivants pourraient conduire, à leur tour, à la conception de réseaux de neurones formels plus efficaces que ceux que nous décrivons aujourd'hui. Il y a là un champ de recherche fascinant, complètement ouvert.

Les réseaux de neurones artificiels, constitués de structures élémentaires, permettent d'aborder sous des angles nouveaux les différentes problématiques liées à l'apprentissage et au raisonnement.

Les années qui viennent concrétiseront cet optimisme ou bien relègueront cette technique parmi les nombreuses " recettes " informatiques.

Chapitre IV

*A*pplications

&

*V*alidation.

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons mettre en œuvre les réseaux de neurones artificiels (RNA) dans le but de reconstituer des défauts à partir des résultats obtenus lors d'un contrôle non destructif (CND par courant de Foucault). Les défauts de type fissure sont fréquemment rencontrés en CND, leur géométrie est caractérisée par le fait qu'une des dimensions est très petite par rapport aux deux autres [29].

Un programme de calcul éléments finis a été élaboré sous environnement Matlab.

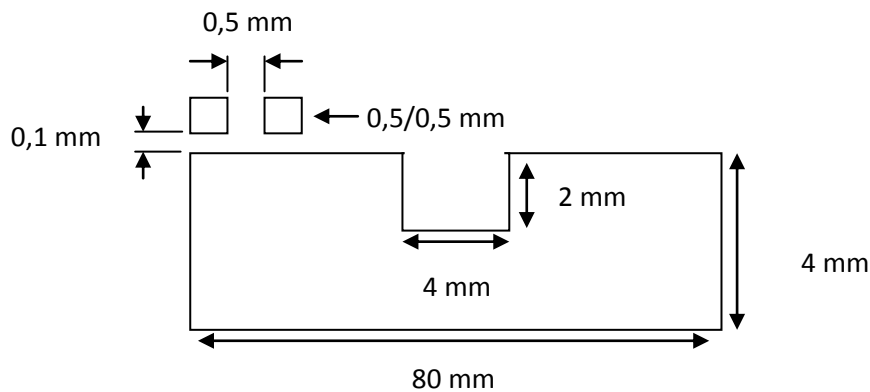
IV.2. calcul du problème direct :

L'objectif de cette application est d'évaluer le modèle de calcul d'impédance du capteur basé sur les équations de Maxwell en effectuant un calcul élément finis.

IV.2.1. Application (1):

IV.2.1.1. Structure Géométrique :

Il s'agit d'une bobine qui se déplace au dessus d'une plaque métallique conductrice comportant un défaut (fissure par exemple) et qui a pour rôle l'inspection de la pièce.



(Fig IV.1) : Géométrie & dimensions du système

IV.2.1.2. Propriétés Physique :

Fréquence : $f = 50 \text{ KHz}, 100 \text{ KHz}, 150 \text{ KHz}, 300 \text{ KHz}$.

Le capteur :

Nombre de spires : 170

Rayon intérieur : 0,25 mm

Rayon extérieur : 0,75 mm

Hauteur: 2,2 mm

Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$

Densité de Courant d'excitation : $J_s = 2.73 \cdot 10^4 \text{ [A/m}^2\text{]}$

La charge :

La longueur : 80 mm

La largeur : 40 mm

Epaisseur : 4 mm

Conductivité électrique : $5,81 \cdot 10^7 \text{ [ohm/m]}^{-1}$

Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$

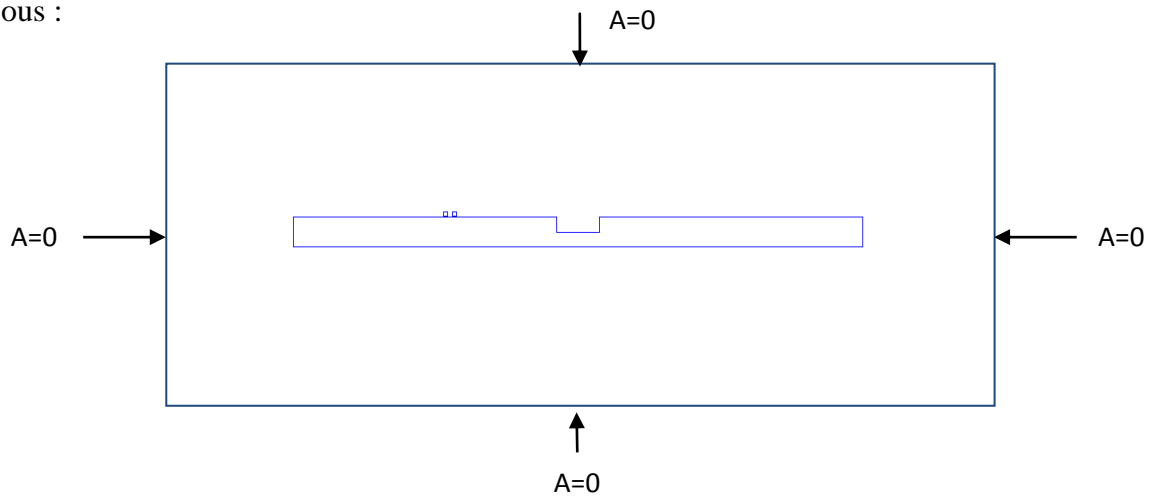
L'air :

Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$

Conductivité électrique : 0

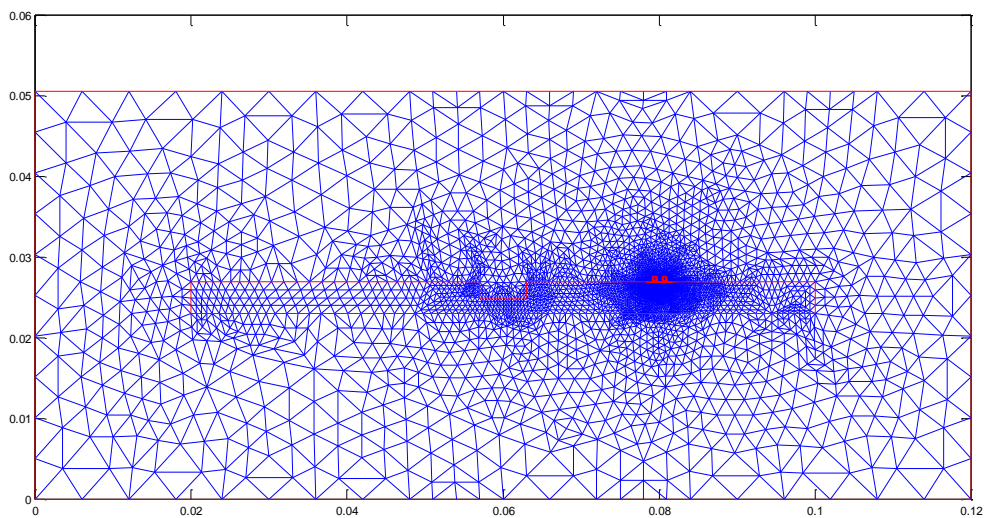
IV.2.1.3. Domaine de résolution et Conditions aux limites :

Le domaine de résolution et les conditions aux limites sont représentés par la figure ci-dessous :



(Fig IV.2) : Domaine de résolution & condition aux limites.

IV.2.1.4. Maillage du domaine :



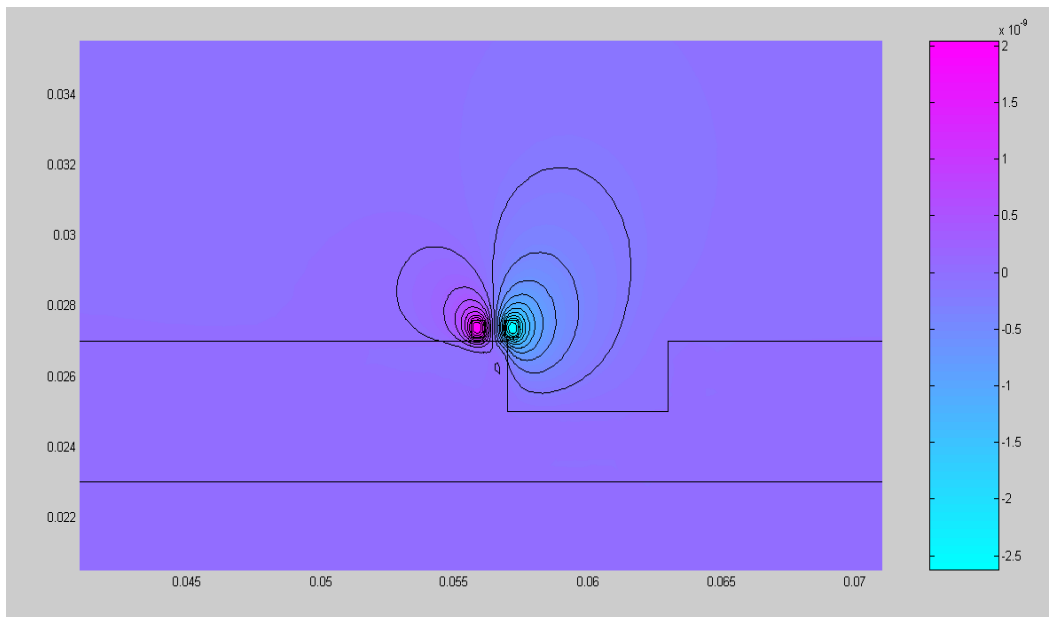
(Fig IV.3) : Maillage du Domaine.

IV.2.1.5. Résultats et Interprétations :

Pour ces résultats, le capteur est alimenté par une fréquence de 50 KHz.

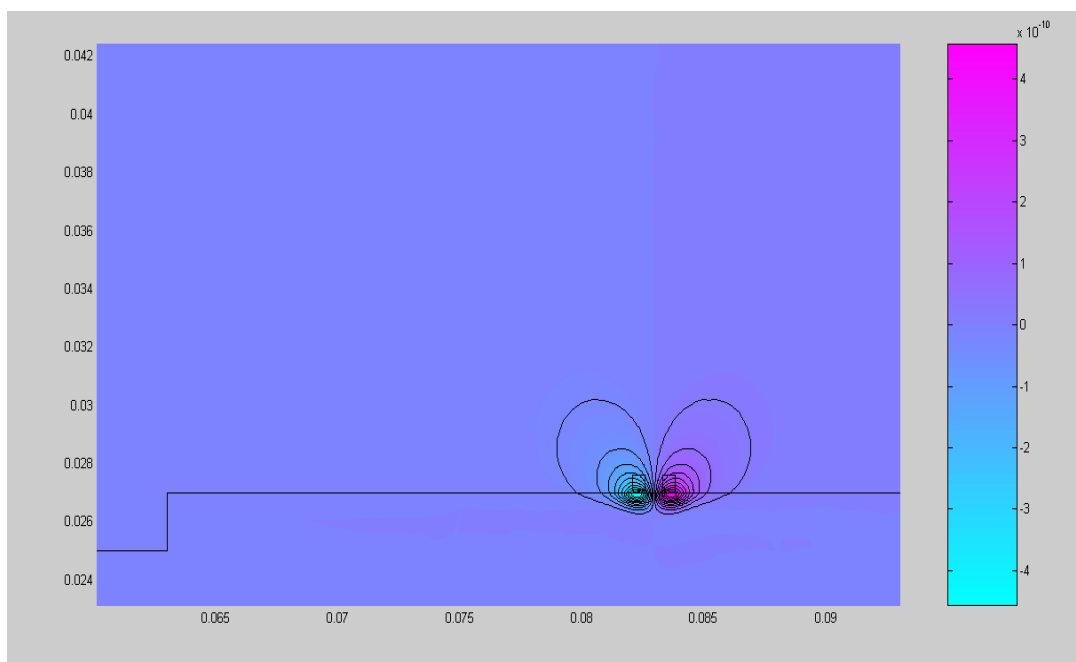
IV.2.1.5.1. Représentation du potentiel vecteur magnétique A :

Le capteur se trouvant à la position x1



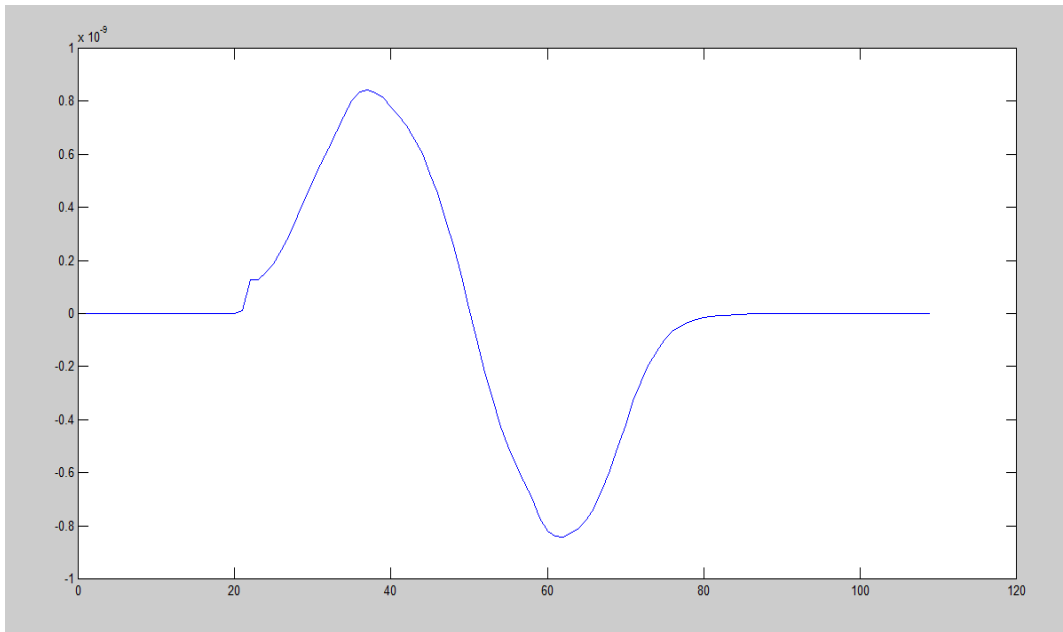
(Fig IV.4) : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A au alentour du défaut.

Le capteur se trouvant à la position x2



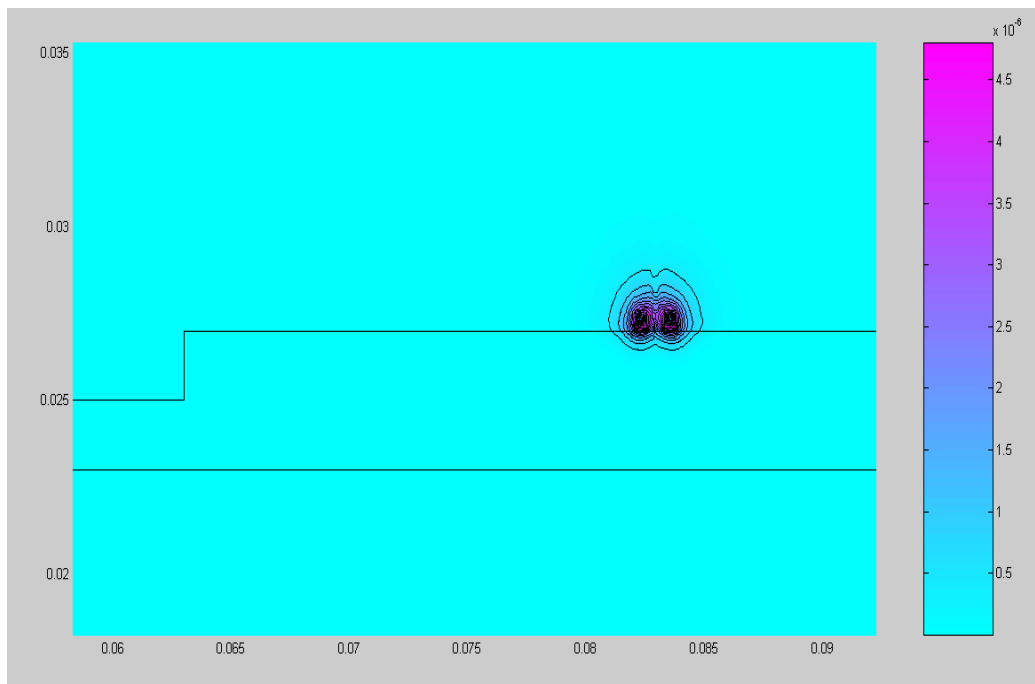
(Fig IV.5) : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A pour la région sans défaut.

IV.2.1.5.2. Représentation de potentiel vecteur magnétique A sur une droite :

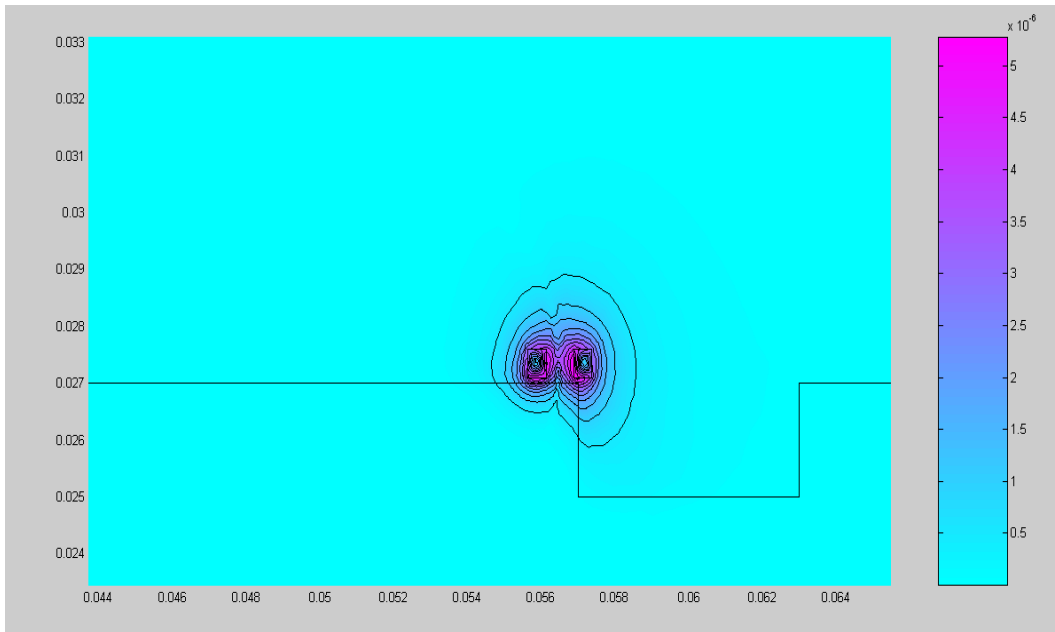


(Fig IV.6) : Allure du potentiel vecteur magnétique A sur une droite.

IV.2.1.5.3. Représentation de l'induction magnétique B :



(Fig IV.7) : Topologie des lignes de l'induction magnétique B pour la région sans défaut.



(Fig IV.8) : Topologie des lignes de l'induction magnétique B au alentour du défaut.

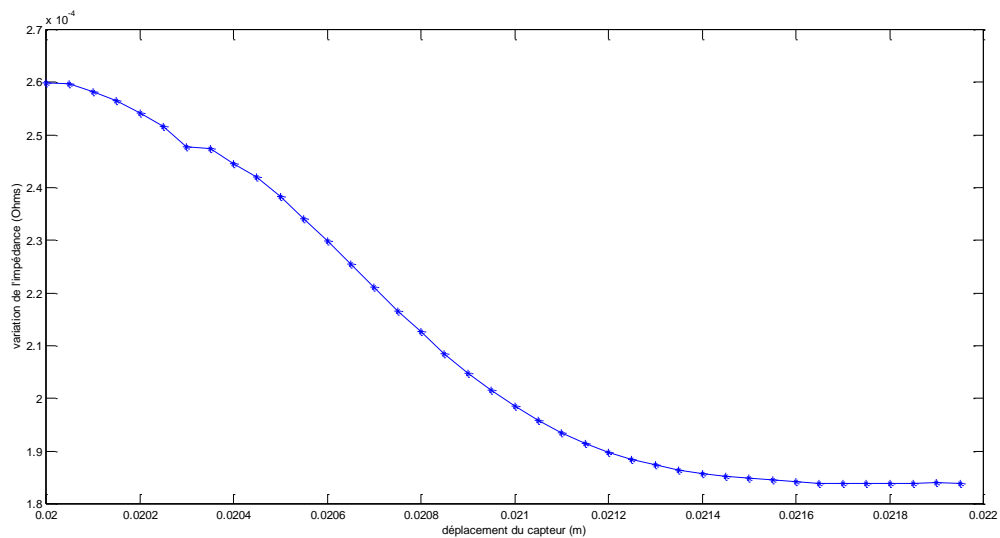
IV.2.1.5.4. Calcul de l'impédance à travers l'induction ou le flux magnétique :

Le calcul de l'impédance est donnée par :

$$Re(Z) = \frac{N^2}{j.S^2} \omega. \iint_S 2. \pi. r. IM(A). ds \quad (IV.1)$$

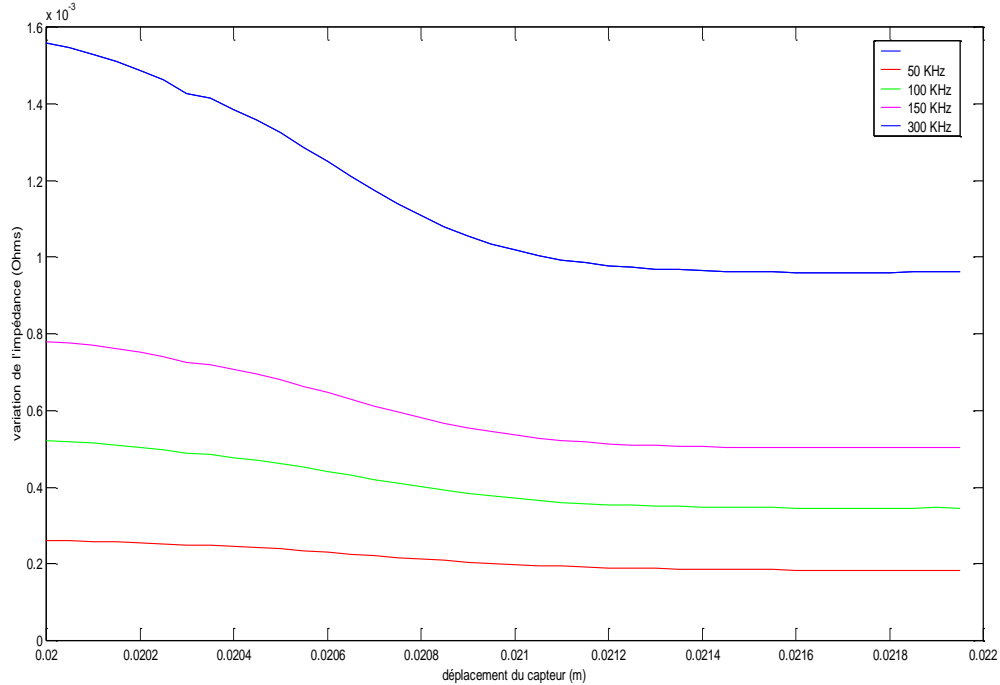
$$Im(Z) = \frac{N^2}{j.S^2} \omega. \iint_S 2. \pi. r. Re(A). ds \quad (IV.2)$$

IV.2.1.5.5. Représentation de la variation de l'impédance en fonction du déplacement :



(Fig IV.9) : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.

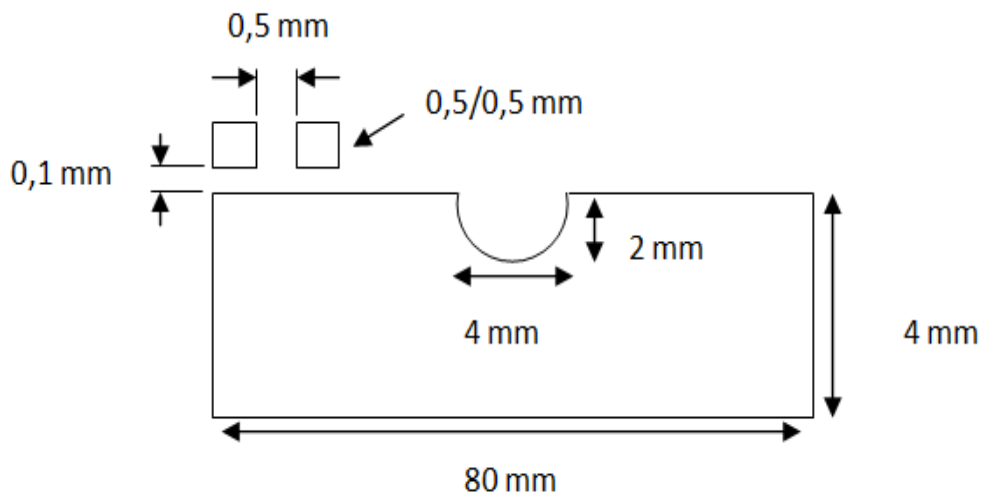
IV.2.1.5.6. Représentation de la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les fréquences ; 50 KHz, 100 KHz et 150 KHz :



(Fig IV.10) : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

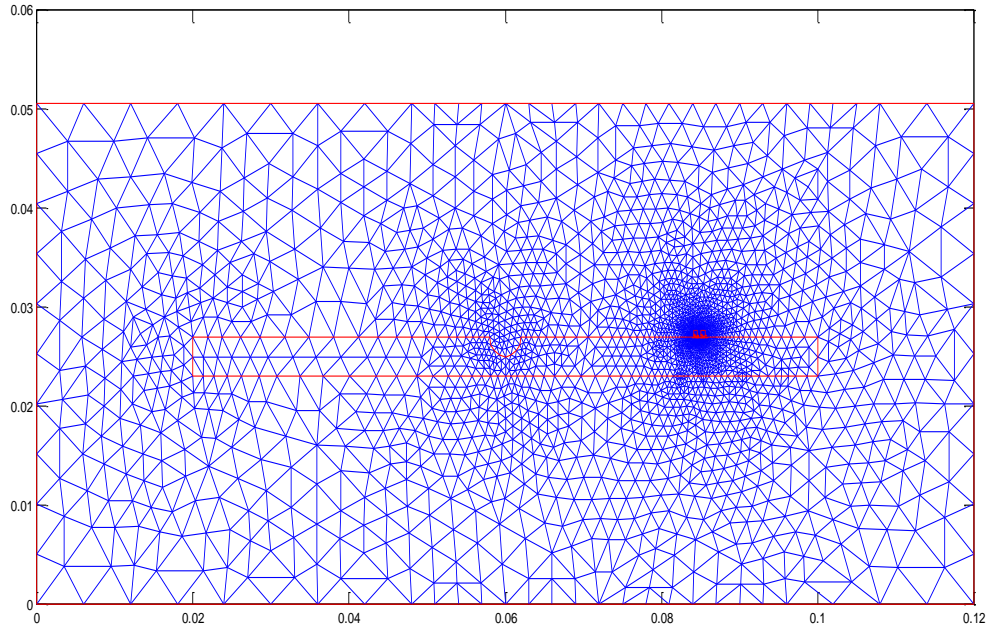
IV.2.2. Application (2):

IV.2.2.1. Structure Géométrique :



(Fig IV.11) : Géométrie & Dimension du système.

IV.2.2.2. Maillage du domaine :

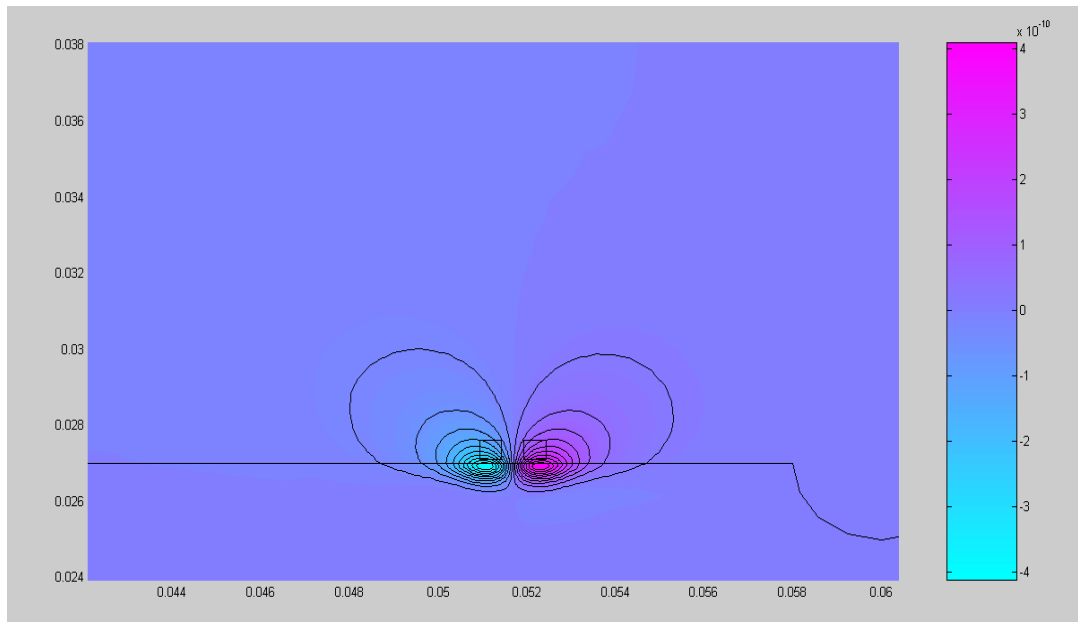


(Fig IV.12) : Maillage du domaine.

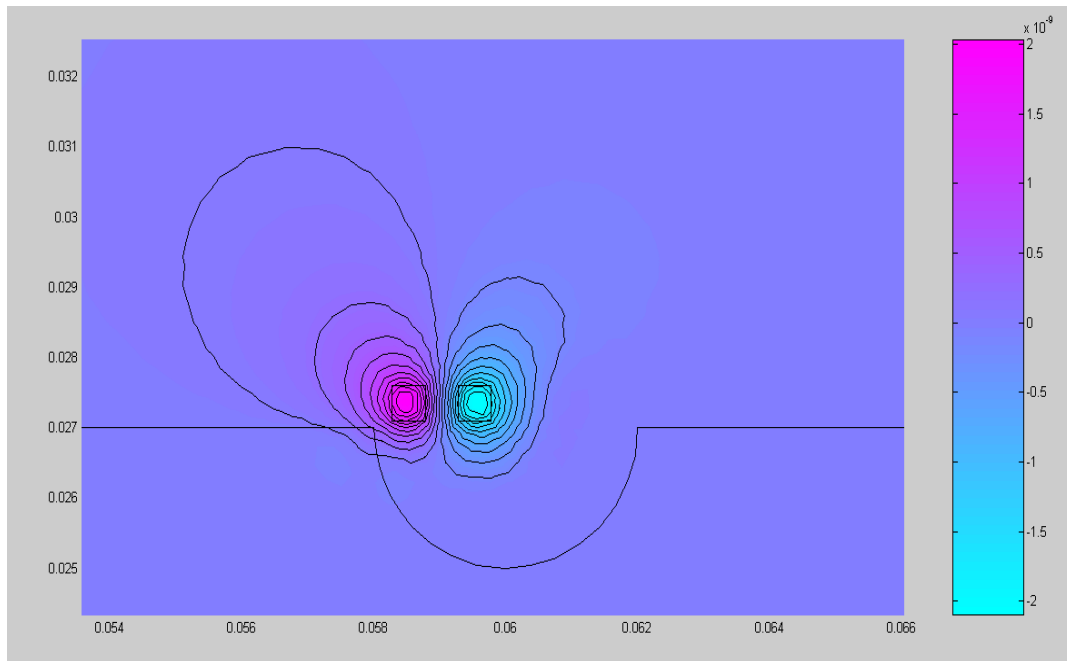
IV.2.2.3. Résultats et Interprétations :

Pour ces résultats, le capteur est alimenté par une fréquence de 50 KHz.

IV.2.2.3.1. Représentation du potentiel vecteur magnétique A :

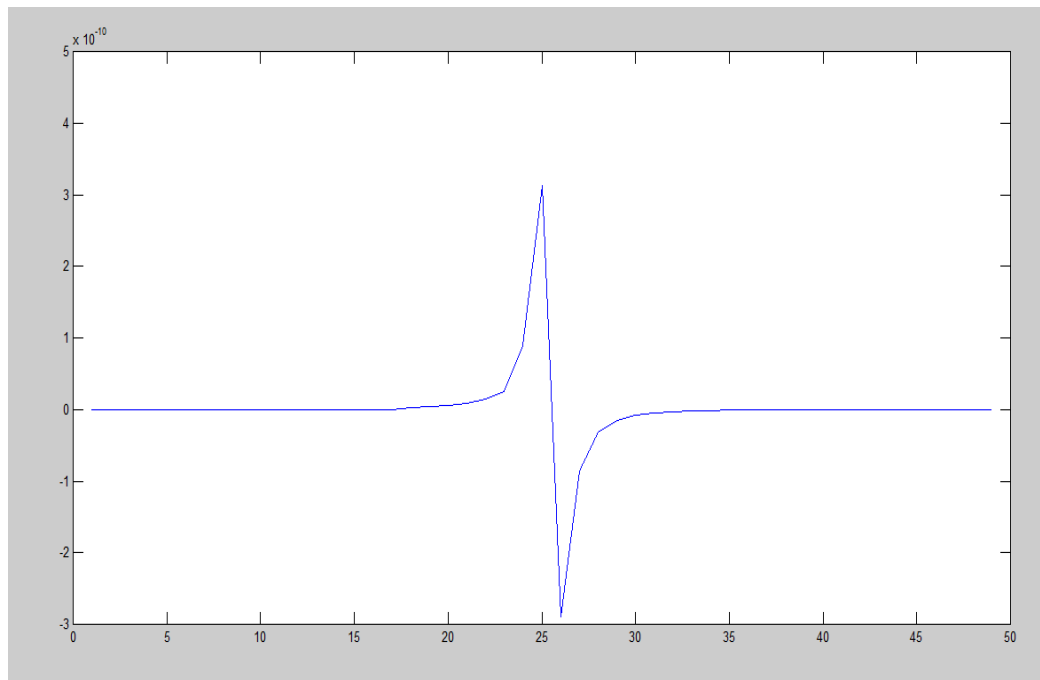


(Fig IV.13) : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A pour la région sans défaut.



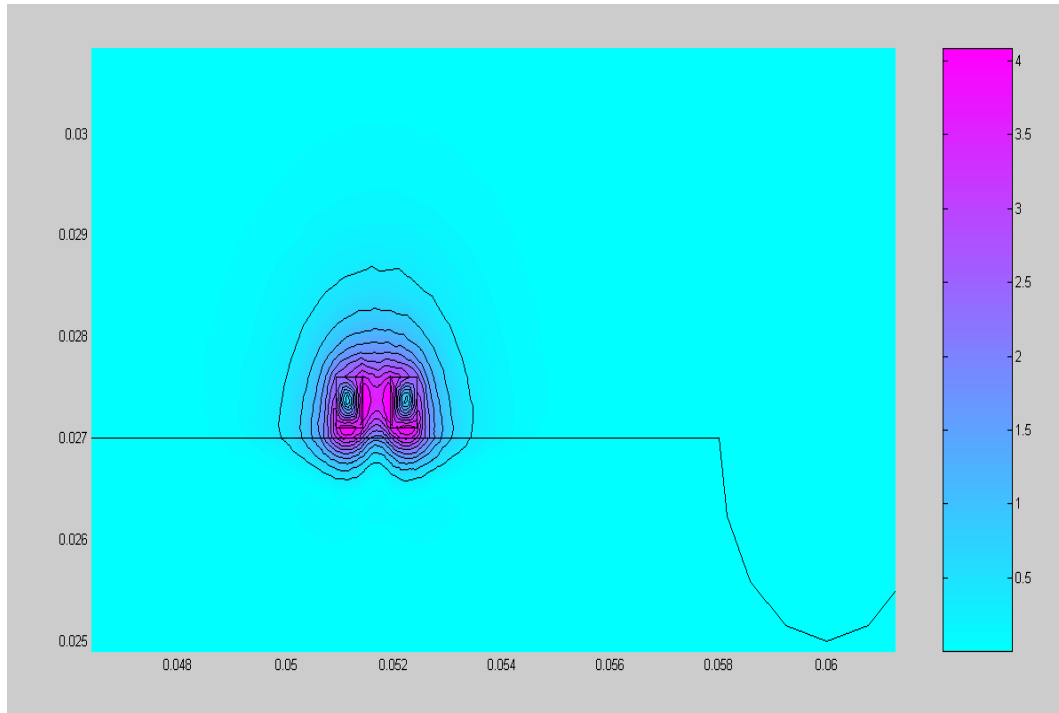
(Fig IV.14) : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A au alentour du défaut.

IV.2.2.3.2. Représentation de potentiel vecteur magnétique A sur une droite :

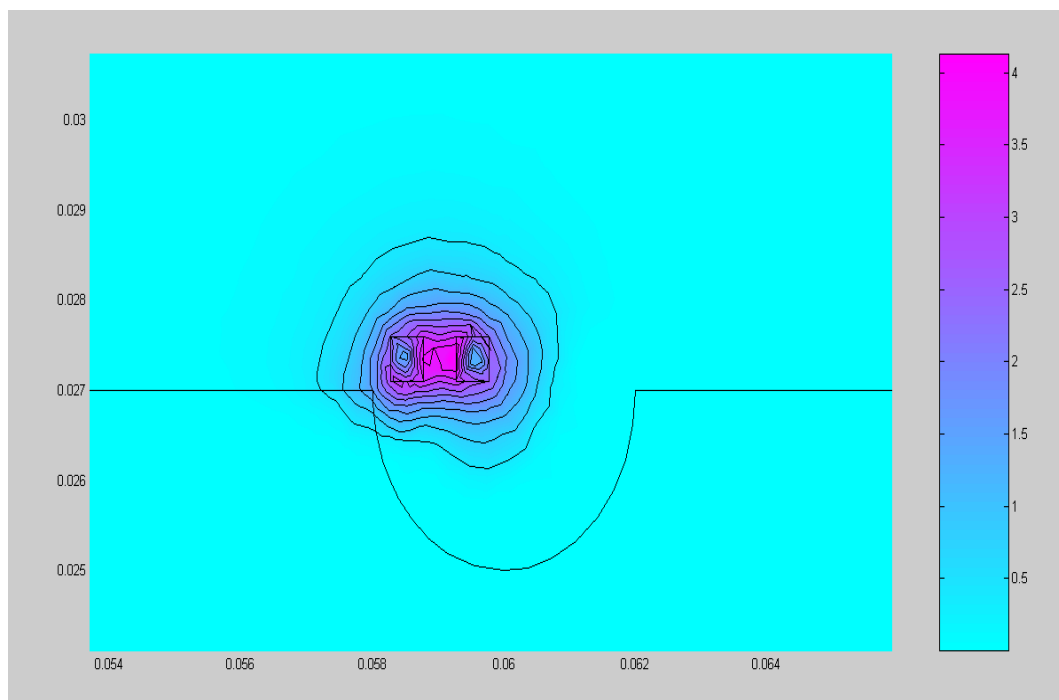


(Fig IV.15) : Allure du potentiel vecteur magnétique A sur une droite.

IV.2.2. 3.3. Représentation du champ magnétique H :

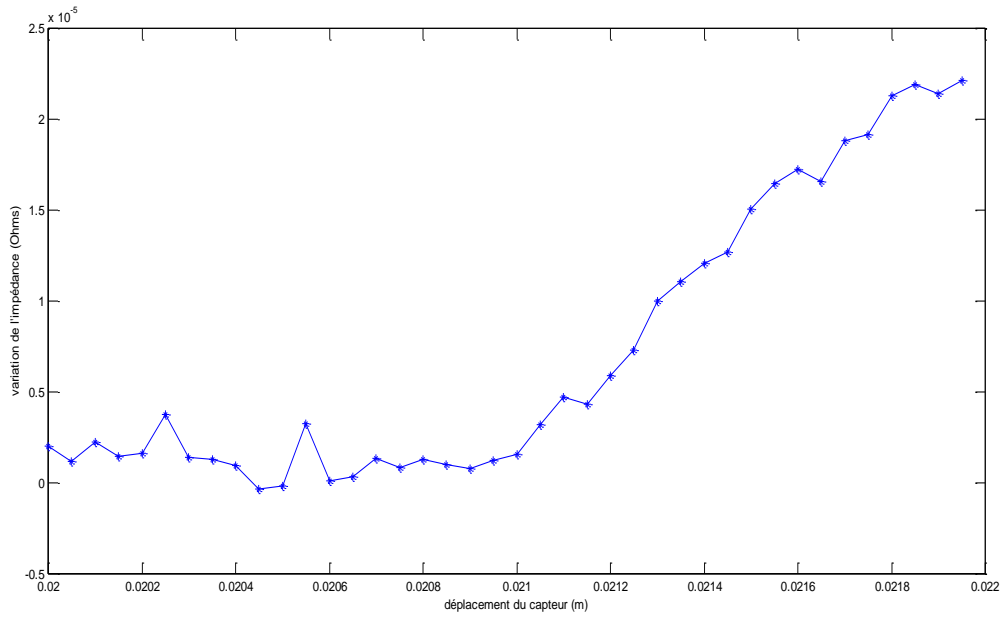


(Fig IV.15) : Topologie des lignes du champ magnétique H pour la région sans défaut.



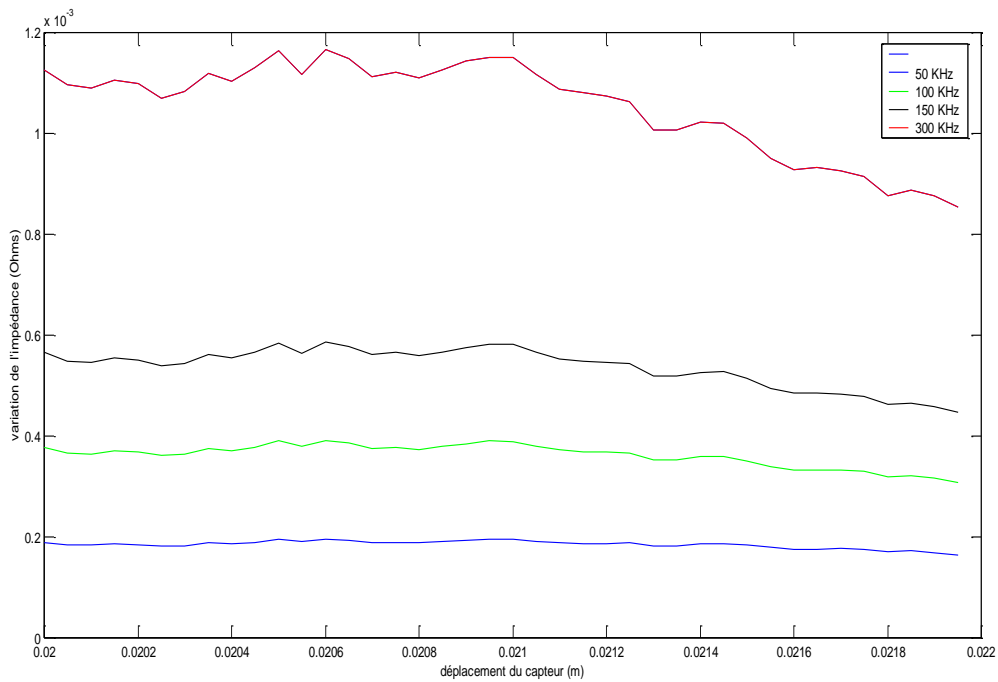
(Fig IV.16) : Topologie des lignes du champ magnétique H au alentour du défaut.

IV.2.2.3. 4. Représentation de la variation de l'impédance en fonction du déplacement :



(Fig IV.17) : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.

IV.2.2.3.5. Représentation de la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les fréquences ; 50 KHz, 100 KHz, 150 KHz et 300 KHz :



(Fig IV.18) : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

IV.3. Traitement des problèmes inverses :

Pour cette partie, nous allons mettre en œuvre les réseaux de neurones artificiels dans le but de reconstituer des défauts à partir des résultats obtenus lors d'un contrôle non destructif par courant de Foucault.

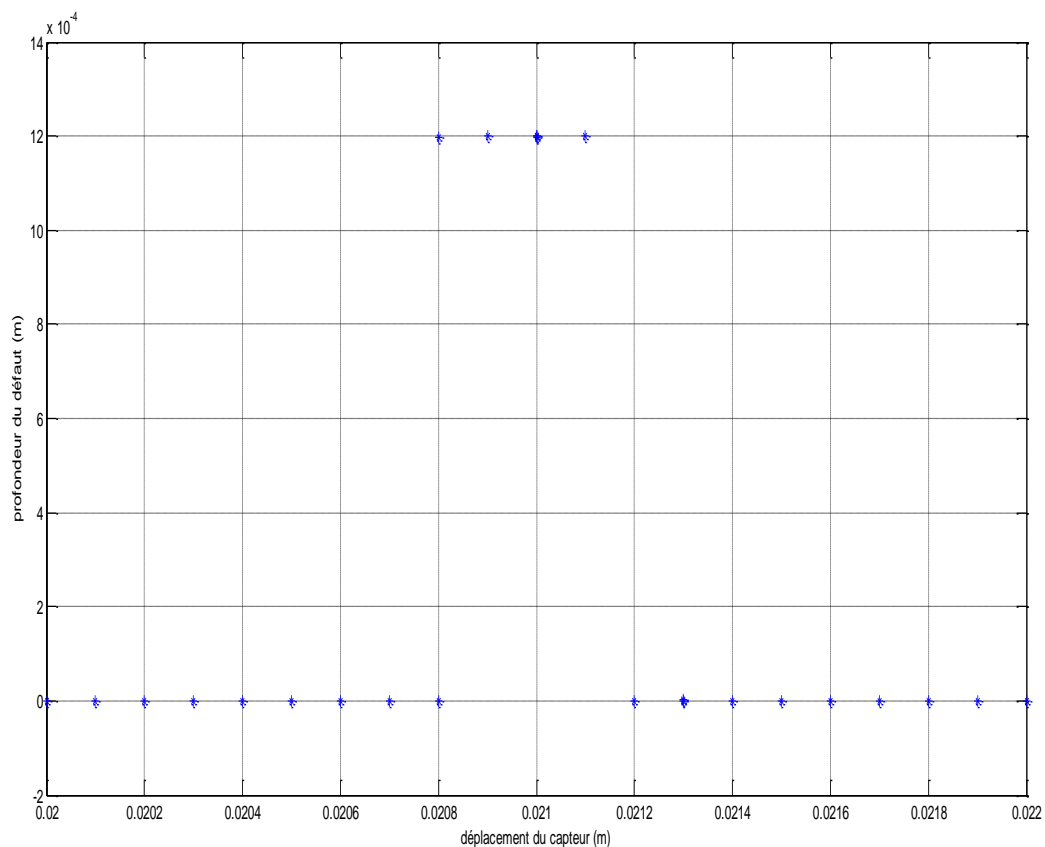
Les réseaux de neurones utilisés pour l'évaluation de ce défaut (*Fig. IV.11*) sont implémentés sous le logiciel MATLAB.

IV.3.1. Evaluation de la profondeur du défaut :

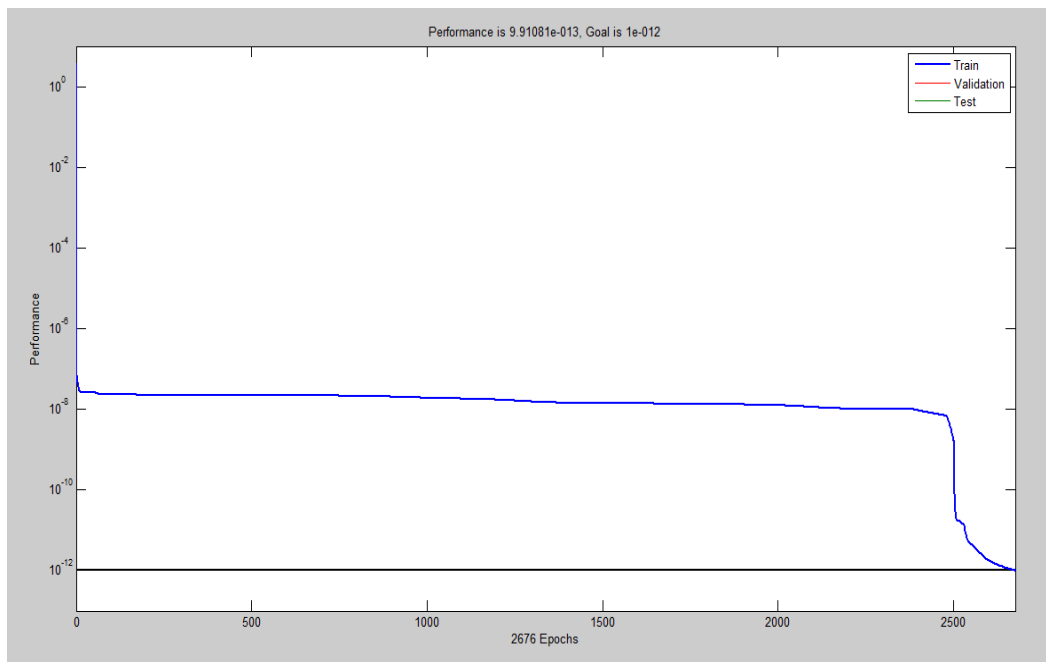
Le PMC destiné à l'évaluation de la profondeur est constitué de 8 neurones dans la couche cachée à fonction d'activation tangente sigmoïde et un neurone de sorti à fonction d'activation linéaire. Le réseau reçoit à son entrée les valeurs de l'impédance et fournit à sa sortie les valeurs de la profondeur du défaut.

IV.3.1.1. Application (1) :

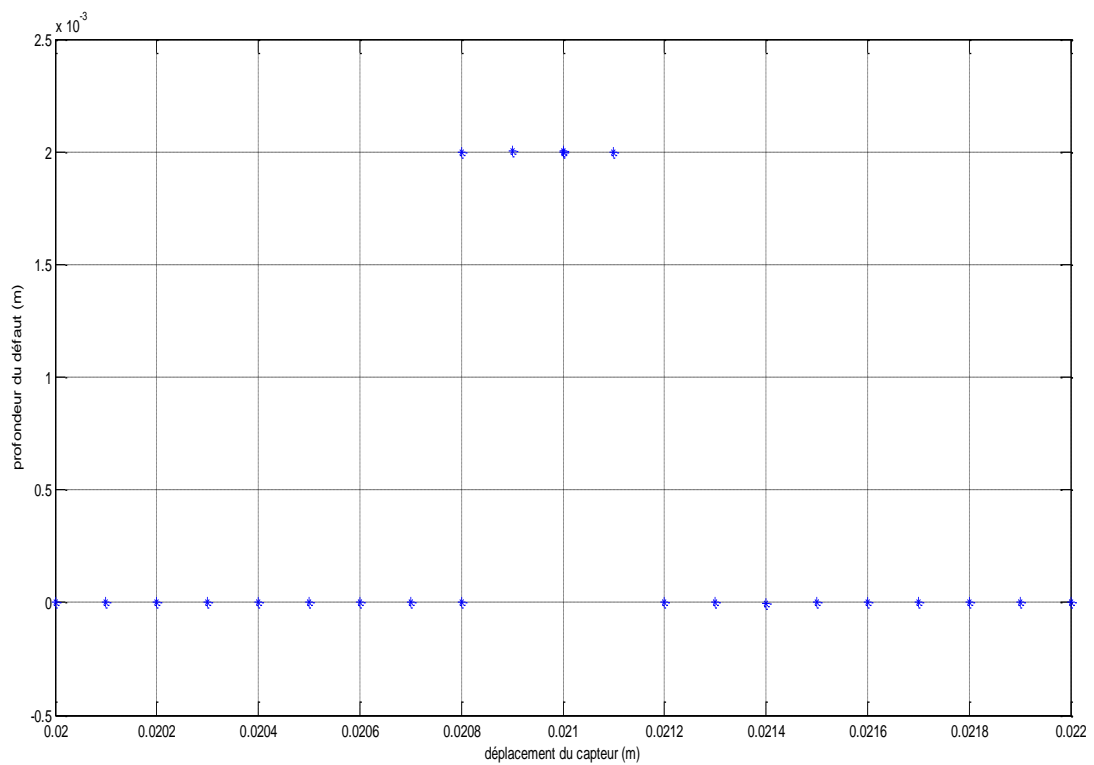
Les résultats obtenus en utilisant l'algorithme des réseaux de neurones pour une profondeur de 30%, 50 % et 70 % sont donnés comme suit :



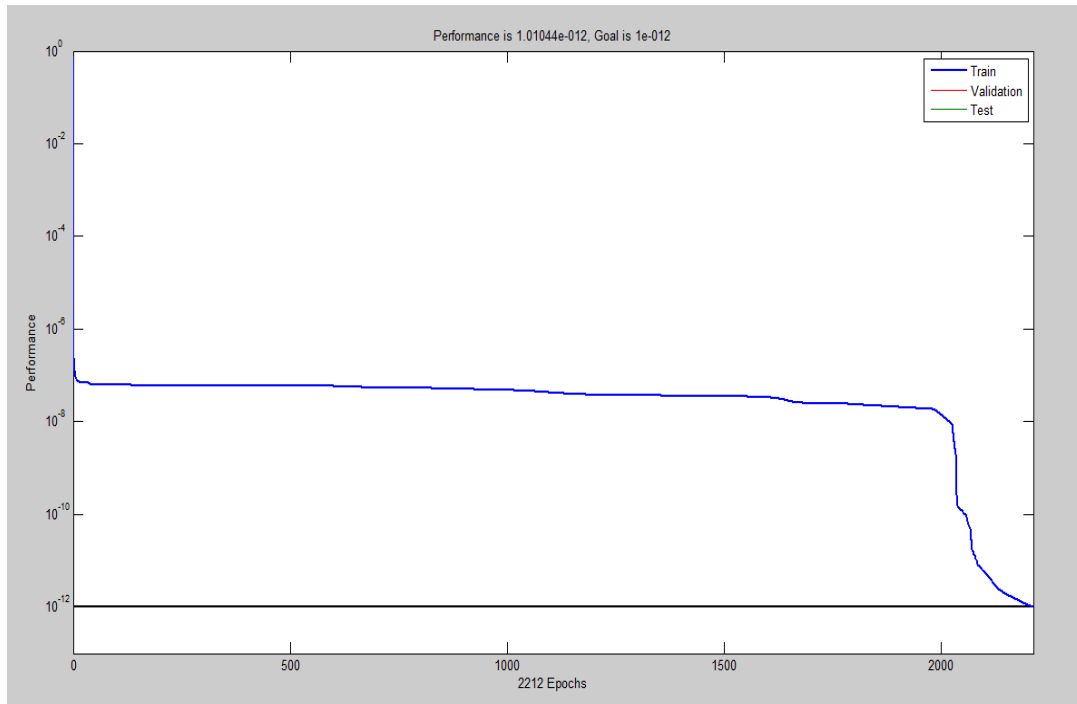
(Fig IV.19) : Reconstitution d'une profondeur de 30%



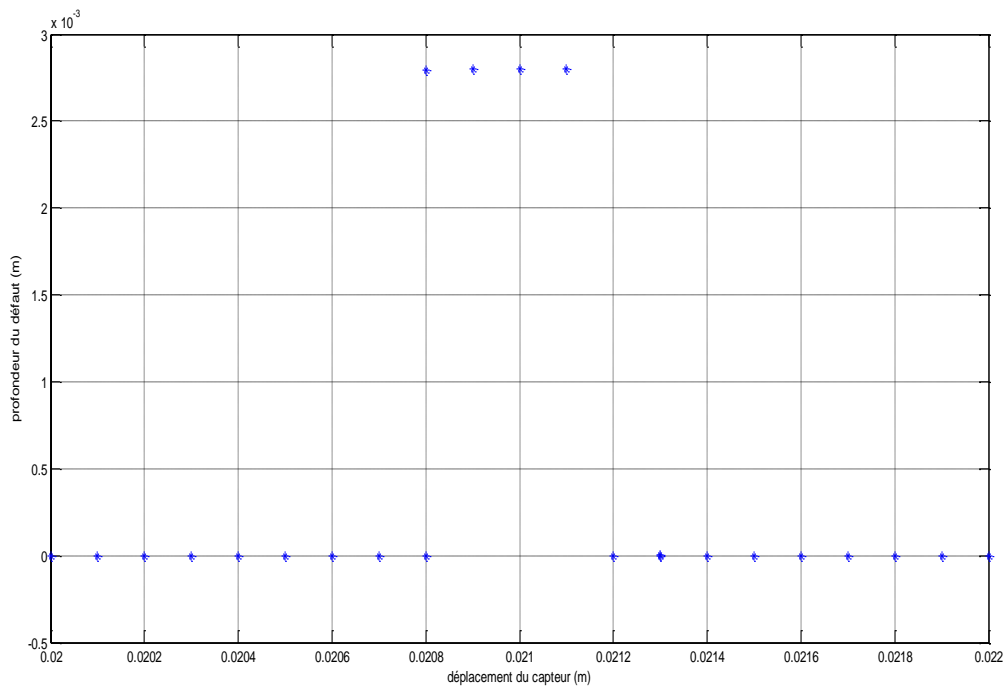
(Fig IV.20) : l'évolution de l'erreur quadratique moyenne pour une profondeur de 30%



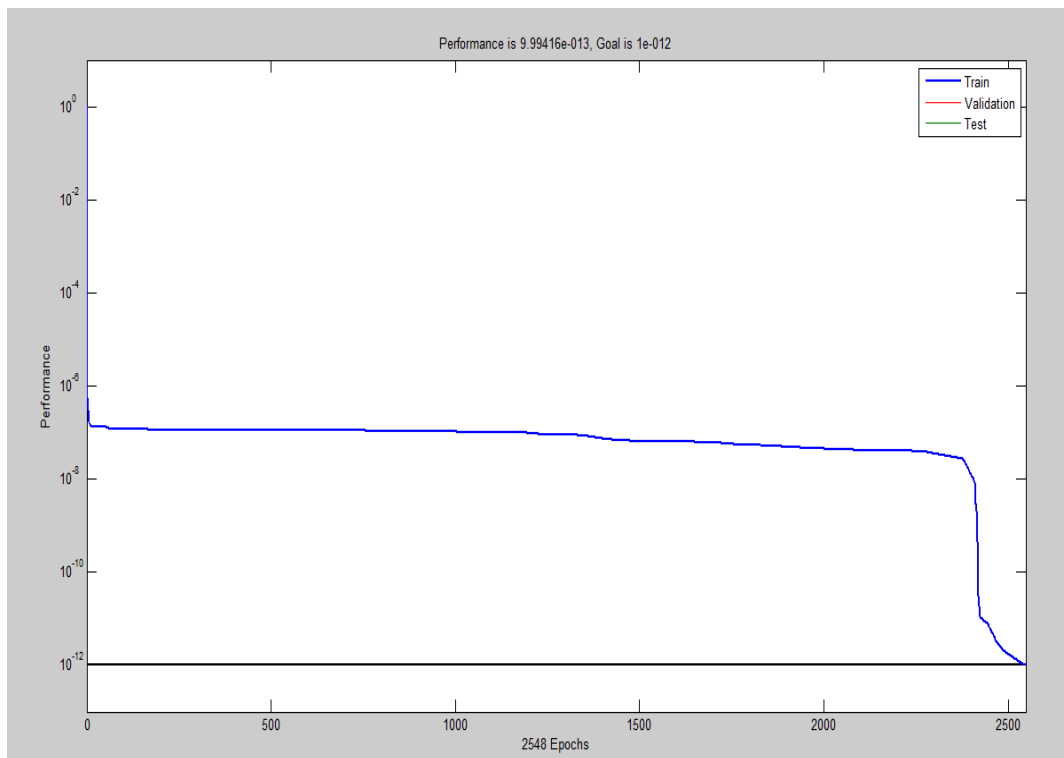
(Fig IV.21) : Reconstitution d'une profondeur de 50%



(Fig IV.22) : l'évolution de l'erreur quadratique moyenne pour une profondeur de 50%



(Fig IV.23) : Reconstitution d'une profondeur de 70%



(Fig IV.24) : l'évolution de l'erreur quadratique moyenne pour une profondeur de 70%

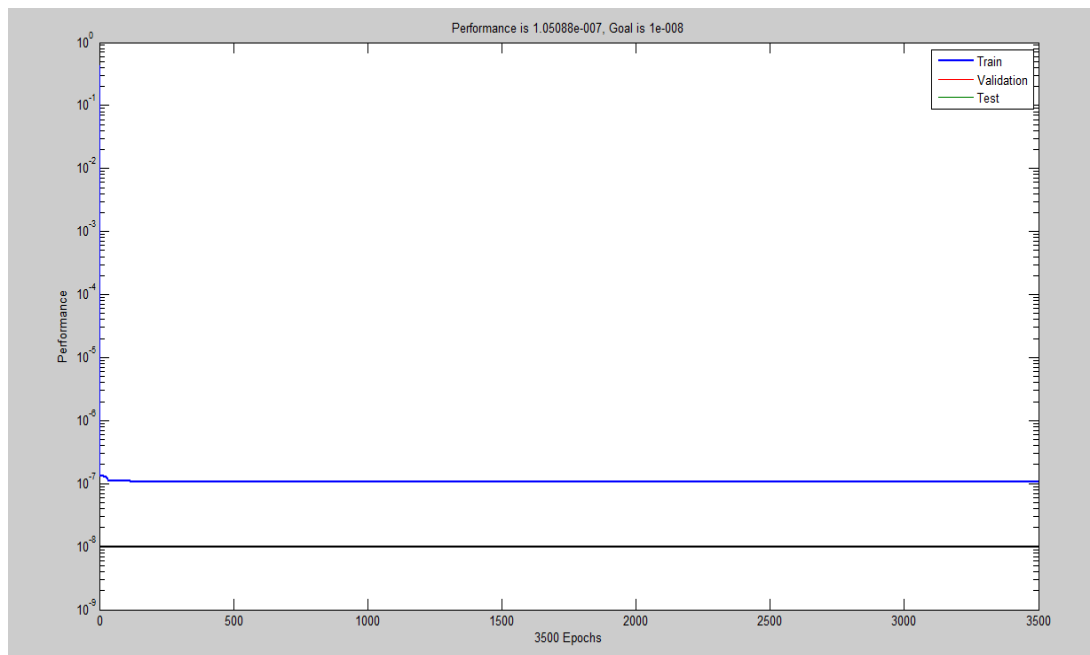
IV.3.1.2. Application (2) :

Le traitement du problème de reconstitution de défauts $2D$ a été traité en considérant 8 neurones dans la couche cachée et 1 neurone en sortie ; pour cela le défaut circulaire est assimilé à une succession de défauts plans.

On prend la valeur maximale pour chaque défaut (c'est-à-dire pour différentes profondeurs),

Pour le premier défaut la valeur maximale de la profondeur se situe sur la position $x=0,06$ m et qui correspond à 2 mm de profondeur.

Pour le deuxième défaut la valeur maximale de la profondeur se situe sur la position $x=0,059$ m et qui correspond à 0,5 mm de profondeur.



(Fig IV.25) : l'évolution de l'erreur quadratique moyenne pour le deuxième défaut

IV.4. Conclusion :

Nous avons mis en œuvre dans cette partie la méthode des réseaux de neurones pour l'inversion des données obtenues par un calcul éléments finis afin de revenir aux dimensions du défaut.

*C*onclusion
Générale.

La reconnaissance des formes est à la fois une discipline historique de l'intelligence artificielle et un domaine de recherches extrêmement dynamique qui a subi de multiples influences de domaines scientifiques variés depuis une trentaine d'années. Elle est aujourd'hui partie intégrante de l'apprentissage automatique, domaine auquel elle a apporté de nombreuses idées et méthodes, en outre elle couvre un spectre large d'applications [27].

Les réseaux de neurones sont depuis quelque temps un point de focalisation des médias, du public et des scientifiques. Les travaux menés dans le domaine des sciences de la cognition artificielle ont été marquées par quelques apports non négligeables mais surtout par beaucoup d'optimisme.

Le travail réalisé concerne l'application de la méthode des réseaux de neurones à la reconstitution de défauts dans les structures bidimensionnelles. Un travail préliminaire a été réalisé pour la résolution du problème direct dont les résultats seront constitueront la base de données, entrées du réseau de neurones, la base de données de la méthode stochastique.

Le problème direct a été traité en utilisant la méthode des éléments finis dont un programme de calcul a été développé sous environnement Matlab et deux structures 2D ont été traitées. L'une comporte un défaut géométrique rectangulaire et l'autre comporte un défaut cylindrique.

L'algorithme des réseaux de neurones a été appliqué pour reconstituer les deux types de défauts, défaut rectangulaire et défaut cylindrique. Le réseau de neurone utilisé comporte une seule couche d'entrée et 8 couches cachées.

Les premiers résultats obtenues sont jugés satisfaisants et nous permettent d'envisager le traitement de la reconstitution de la forme géométrique complexe.

En perspective, on envisage de construire un *RN* utilisant 2 couches ou plus cachées avec un minimum de cinq neurones en sortie pour le traitement des problèmes 2D.

Nous souhaitons que ce modeste travail puisse servir aux promotions futures.

Bibliographie.

- [1]: A.Maricani « Electromagnétisme 1 », Edition Masson, 1996.
- [2]: M.Cyrot, M.Decorps, B.Diery « Magnétisme : Fondement », EDP science 2000.
- [3]: Electromagnétisme ; « Magnétostatique », OPU.
- [4]: M.Hulin, J-P.Maury : « les bases de l'électromagnétisme », Edition Dunod.
- [5]: A.V.Vost « Electromagnétisme, champs, forces et circuits », Université technique de Louvain.
- [6]: H.Dordier, D.Obert : « Phénomènes d'induction, Equations de Maxwell, Milieux diélectriques et aimantés », Edition Vuibert supérieure.1992
- [7]: F.HOCINI : « Association de la commande pour l'étude par EF des phénomènes magnéto-élastiques et vibratoires dans les systèmes Electrotechnique », thèse de doctorat, Tizi-Ouzou, 2013.
- [8]: B.Maouche « Elaboration de modèles couplés basés sur la modélisation de structures électromagnétiques- Application à l'étude du contrôle non destructif par induction », thèse de doctorat, Sétif.2008.
- [9]: M.FELIACHI « Electroaimants pour systèmes Electromécaniques », Technique de l'ingénieur, d5350, 10/02/2003.
- [10]: O.Faugerou, S.Grieu, A.Traore « Outils de l'intelligence artificielle appliquée » Technique de l'ingénieur, r1403, 2013.
- [11]: J.Dumont, Fillon « Contrôle Non destructif (CND) » Technique de l'ingénieur, R1400, 10/01/1996.
- [12]: C.Ravat « concepteur de multiplicateurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif », thèse de doctorat, paris, 2008.
- [13]: M.Cherfaoui, « Essais Non Destructifs », Technique de l'ingénieur, bm 6450, 10/07/2006.
- [14]: M.Wanin « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux (partie 2) », Technique de l'ingénieur, m4131, 10/03/2002.
- [15]: N.Oukacine « Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution des défauts en évaluation non destructive », thèse de magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [16]: P.Spiter, « Approche variationnelles pour la méthode des éléments finis » Technique de l'ingénieur, af 503, 10/0702002.

- [17]: D.Euvrard « Résolution numérique des équations aux dérivées partielles de la physique, de la mécanique et des sciences de l'ingénieur : différences finies, éléments finis, méthode de singularités », 2^{ème} Edition, Masson, Paris, 1990.
- [18]: V.Vladilirov, « recueil de problèmes d'équations de physique mathématique », OPU, Alger, 1987.
- [19]: H.Mohellebi « cours de cinquième année Master II : Modélisation Numérique des Systèmes d'EE (M_{EE 36} ; 2013/2014).
- [20]: H.Oudin « Méthode des Eléments Finis », Ecole centrale de Nantes 28/09/2008.
- [21]: O.C.Zienkiewich and R-L-Taylor « The Finite Element Method », 4th ed, VI, MC Graw Hill Company 1993.
- [22]: G.Dreyfus, J-M-Martinez, M-Samuelides, M-B-Gordon, F-Badran, S-Thiria, L-Hérault. « Réseaux de Neurones: Méthodologie et applications », Edition EYROLLES; 2004.
- [23]: F.Sorin, L.Broussard, P.Robelin « Régulations d'un processus industriel par réseaux de neurones » Technique de l'ingénieur, S7582, 2014.
- [24]: M.Y.AMMAR « Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition BATCH/CONTINU » Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [25]: C-Bishop, « Neural Networks for Pattern Recognition », Oxford University press, 1995.
- [26]: M-Boumahrat, A.Gourdin, « méthode Numériques appliquées » OPU, Alger, 1983.
- [27] : Th.Artieres, « Reconnaissance de forme », Technique de l'ingénieur, af 1510, 10/10/2011.
- [28] : G.DREYFUS, « Les réseaux de Neurones », ESPCI de la ville de paris, Septembre 1998.
- [29] : H.HAMEL, « Etude d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétique », Thèse de Magister, Tizi-Ouzou.2009