

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE**

**N° : .....**



**DOMAINE : SCIENCE TECHNIQUE**

**FILIERE : ELECTROMECHANIQUE**

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

1. KHEBAL Merwane
2. DALI Abderrahmane

**Intitulé**

**Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite**  
**Magnétique Appliqué aux Pièces**  
**Ferromagnétiques**

**Soutenu devant le jury composé de:**

MESALTI Sabir	Université Mohamde Boudiaf M'sila	Président
ABDOU Abdelhak	Université Mohamde Boudiaf M'sila	Rapporteur
SAFER Omar Adib	Université Mohamde Boudiaf M'sila	Co-Rapporteur
BELKHIRI Salah	Université Mohamde Boudiaf M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**

# Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*- A nos parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de nous combler.*

*Que DIEU leurs procure bonne santé et longue vie.*

*- A nos frères et nos sœurs*

# Remerciements

*Louange à Dieu le Tout-Puissant pour tout ce qui nous a donné pour que nous puissions terminer ce travail.*

*Que ce soit d'un point de vue scientifique ou humain, la réalisation de ce projet de fin d'études fut pour nous une expérience d'une valeur immense. Notre première pensée va tout naturellement aux encadreurs **Mr. ABDOU ABDELHAK** & **Mr. SAFER OMAR ADIBD** pour leurs encadrements ainsi que la confiance qui nous ont témoignée en nous confiant ce travail attrayant. Nous avons apprécié leur grande chaleur humaine et leur disponibilité. Merci pour leurs encouragements, et disponibilités.*

*Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Nous n'oublions pas de remercier toute notre promotion du Master 2019, avec qui on a passé des moments difficiles et d'autre agréable grâce à leur sympathie et esprit d'équipe.*

*Nous voudrions également remercier vivement les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>iv</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif</b> .....	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Principe du contrôle.....	4
I.3 Défauts et leurs origines .....	5
I.3.1 Défauts internes.....	5
I.3.2 Défauts de surface .....	5
I.3.3 Origines des défauts .....	6
I.4 Principe de détection d'un défaut.....	6
I.5 Méthodologie de développement des systèmes de CND.....	7
I.6 Différentes techniques du C N D.....	8
I.6.1 Examen visuel .....	9
I.6.2 Courants des Foucault .....	10
I.6.3 Ressuage.....	11
I.6.4 Radiographie .....	13
I.6.5 CND par flux de fuite magnétique .....	14
I.6.6 Ultrasons.....	15
I.6.7 La magnétoscopie.....	17
I.6.8 Thermographie .....	18
I.6.9 Méthode surfacique .....	19
I.6.10 Contrôle par laser .....	20
I.7 Conclusion .....	21
<b>Chapitre II. Capteurs à Flux de fuite magnétique</b> .....	<b>23</b>
II.1 Introduction .....	23
II.2 Présentation de contrôle par flux de fuite magnétique .....	23
II.2.1 Principe de fonctionnement de Flux de fuite magnétique .....	23
II.2.2 Différents types de capteurs de champ.....	24
II.2.3 Les Avantages et les inconvénients des MFL .....	27
II.2.4 Phénomènes physiques et formulation générale .....	27
II.2.5 Méthode des éléments finis(MEF) .....	30
II.2.6 Formulation résidus pondérés .....	30
II.2.7 Calcule de l'impédance .....	31
II.3 Conclusion .....	33
<b>Chapitre III. Simulations de contrôle par flux de fuite magnétique (MFL)</b> .....	<b>34</b>
III.1 Introduction .....	34
III.2 Déroulement de simulation sous COMSOL Multiphysics .....	36
III.3 Caractéristique du système MFL à étudier .....	36
III.4 Dessin de la géométrie tridimensionnelle.....	37
III.5 Vue 3D du modèle proposé .....	38
III.6 Maillage du modèle proposé.....	38
III.7 Cartographie de la densité de flux magnétique dans la plaque.....	40

---

III.8	Effet de variation des paramètres du défaut sur les composantes du champ magnétique.....	41
III.8.1	Effet de la largeur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique.....	41
III.8.2	Effet de la longueur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique.....	41
III.8.3	Effet de la profondeur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique.....	42
III.8.4	Effet du Lift-off sur les composantes de l'induction magnétique.....	43
III.9	Vue 3D du modèle proposé à défaut sous cutané.....	44
III.10	Maillage du modèle à défaut sous cutané.....	45
III.11	Effet de variation des positions du défaut sous cutané sur les composantes du champ magnétique.....	45
III.12	Conclusion.....	46
<b>Chapitre IV.</b>	<b>Application des réseaux de neurones au système de CND-MFL.....</b>	<b>48</b>
IV.1	Introduction.....	48
IV.2	Neurone biologique.....	48
IV.3	Neurone artificiel.....	49
IV.4	Différents types de réseaux.....	50
IV.4.1	Réseaux à une seule couche.....	50
IV.4.2	Réseaux Multicouches.....	51
IV.5	Fonctions d'activation.....	52
IV.6	Composition d'un réseau de neurones.....	53
IV.7	Choix de la configuration du réseau de neurones.....	54
IV.7.1	Le choix du type de réseau de neurones.....	54
IV.7.2	Le choix de la stratégie d'apprentissage.....	54
IV.7.3	Elaboration de la base de données pour l'apprentissage.....	55
IV.8	Application et exploitation des réseaux de neurones.....	55
IV.8.1	Construction de la base de données.....	55
IV.8.2	La programmation du réseau de neurones sous Matlab (M_file).....	56
IV.8.3	Apprentissage.....	58
IV.8.4	Test du réseau de neurones.....	59
IV.9	Conclusion.....	61
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>64</b>	
<b>Références bibliographiquee.....</b>	<b>66</b>	

## Table des figures

### Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif

Figure I. 1.Principe du contrôle .....	4
Figure I. 2.Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND. ....	8
Figure I. 3.Principe Examen visuel. ....	9
Figure I. 4.Principe du CND par courants de Foucault. ....	10
Figure I. 5.Principe de la méthode de ressuage. ....	12
Figure I. 6.Principe de la méthode de radiographie. ....	13
Figure I. 7.Principe du CND par flux de fuite magnétique. ....	14
Figure I. 8.Principe de la méthode des ultrasons. ....	16
Figure I. 9.Principe de la méthode de magnétoscopie. ....	17
Figure I. 10.Principe de la méthode de thermographie. ....	19
Figure I. 11.Principe de contrôle par laser. ....	20

### Chapitre II. Capteurs à Flux de fuite magnétique

Figure II. 1.Principe de contrôle par flux de fuite magnétique. ....	23
Figure II. 3.Diminution de la résistance à l'application d'un champ . ....	25
Figure II. 4.Structure de base d'un capteur de type fluxgate. ....	25
Figure II. 5.Schéma de principe de mesure. ....	26
Figure II.6.Variation de la résistance en fonction $B$ . ....	27
Figure II. 7 Exemple illustratif du phénomène physique. ....	28

### Chapitre III. Simulations de contrôle par flux de fuite magnétique (MFL)

Figure III.1. Inspection d'une tôle de fond du bac par MFL. ....	34
Figure III.2. Système de détection de défaut dans une plaque ferromagnétique en 3D. ....	37
Figure III.3. Dessin de la géométrie tridimensionnelle. ....	37
Figure III.4. Système de détection de défaut dans les bacs en 3D. ....	38
Figure III.5. Vue globale sans le domaine d'air. ....	39
Figure III.6. Zoom sur la zone du défaut. ....	39
Figure III.7. Cartographie densité de flux magnétique sur la plaque au début de contrôle. ....	40
Figure III.8. Cartographie densité de flux magnétique sur la plaque à fin de contrôle. ....	40
Figure III.9. Effet de la variation de la largeur du défaut sur l'induction magnétique. ....	41
Figure III.10. Effet de la variation de la longueur du défaut sur l'induction magnétique. ....	42
Figure III.11. Effet de la variation de la profondeur du défaut sur l'induction magnétique. ....	43
Figure III.12. Effet de la variation du lift-off sur l'induction magnétique. ....	43
Figure III.13. Système de détection de défaut sous cutané en 3D. ....	44
Figure III.14. Zoom sur la zone du défaut sous cutané. ....	44
Figure III.15. Vue globale avec le maillage sans le domaine d'air à défaut sous cutané. ....	45
Figure III.16. Zoom sur la zone du défaut sous cutané. ....	45
Figure III.17. Effet de la variation des positions du défaut sous cutané. ....	46

### Chapitre IV. Application des réseaux de neurones au système de CND-MFL

Figure IV.1. Représentation d'un neurone biologique et ses composants. ....	49
Figure IV.2. Géométrie du neurone artificiel. ....	50

---

Figure IV.3. Réseau à une seule couche .....	51
Figure IV.4. Architecture du perceptron multicouche.....	52
Figure IV.5. Différents types des fonctions d'activation.....	53
Figure IV.6. Architecture d'un réseau de neurones.....	54
Figure IV.7. Architecture du réseau de neurones utilisé .....	58
Figure IV.8. Evolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction des itérations (Epoch) .	59
Figure IV.9. Evaluation de la densité en fonction du pas pour différentes profondeurs, largeurs, longueurs et Lift-off.....	61

## **Table des tableaux**

Tableau IV.1. Base de données .....	56
Tableau IV.2 Échantillon pour le test.....	60

# ABREVIATION

<b>CND :</b>	Contrôle Non Destructif.
<b>MFL :</b>	Magnetic Flux Leakage.
<b>CND-MFL :</b>	Contrôle Non Destructif par flux de Fuite Magnétique.
<b>CF :</b>	Courants de Foucault.
<b>CND-CF :</b>	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.
<b>MPI :</b>	Magnetic Particle Inspection .
<b>MEF :</b>	Méthode des Eléments finis.
<b>3D:</b>	Tridimensionnel.
<b>Wc :</b>	Energie cinétique.
<b>Wp :</b>	Energie potentielle.
<b>Ld :</b>	Longueur du défaut.
<b>Wd :</b>	Largeur du défaut.
<b>Dd :</b>	Profondeur du défaut.
<b>Pd :</b>	Position de défaut sur la pièce.
<b><math>\Delta Z</math>:</b>	Variation de l'impédance.

# Notations et symboles

<b><math>\mu</math> :</b>	Perméabilité magnétique [H/m].
<b><math>\mu_0</math> :</b>	Perméabilité magnétique du vide.
<b><math>\mu_r</math> :</b>	Perméabilité magnétique du relative.
<b><math>\sigma</math>:</b>	Conductivité électrique.
<b>I :</b>	Intensité de courant électrique.
<b>I<sub>s</sub> :</b>	Courant électrique dans la source [A].
<b>E:</b>	Champ électrique [V/m].
<b>H :</b>	Champ magnétique [A/m].

<b>B :</b>	Induction magnétique [T].
<b>D :</b>	Induction électrique [C/m2].
<b>Js :</b>	Densité de courant des bobines source [A/m2].
<b>Ji :</b>	Densité du courant induit [A/m2].
<b><math>\rho</math> :</b>	Densité volumique des charges électriques [C/m3].
<b><math>\phi</math> :</b>	Potentiel scalaire magnétique [A].
<b><math>\Omega</math> :</b>	Domaine d'étude.
<b>n :</b>	Nombre de nœud dans le domaine d'étude.
<b>A :</b>	Inconnue au nœud n du domaine.
<b>R :</b>	Résidu de l'approximation.
<b>L(A):</b>	Opérateur différentiel.
<b><math>\phi_i</math>:</b>	Fonction de pondération ou de projection.
<b>L :</b>	Inductance d'un bobinage en présence d'un matériau.
<b>N :</b>	Nombre de spires.
<b>S :</b>	Section transversale des bobines.
<b>Z :</b>	Impédance électrique.
<b>R :</b>	Résistance électrique.
<b><math>\chi</math> :</b>	Susceptibilité magnétique.
<b><math>V_i</math> :</b>	Potentiel des neurones j.
<b><math>W_j</math>:</b>	Poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée.
<b><math>O_j</math> :</b>	État interne du neurone j.

# Introduction générale

## Introduction générale

*Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut). Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont : les ultrasons, les rayons ionisants (X ou gamma), le ressuage, la thermographie et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault, flux de fuite magnétique), [1].*

*La méthode de contrôle par flux de fuite magnétique (en anglais Magnetic Flux Leakage MFL) est une technique de détection de corrosion et éventuellement de fissures pour pièces ferromagnétiques, utilisée principalement dans les canalisations et réservoirs métalliques. Elle repose sur l'utilisation d'un aimant puissant pour magnétiser la paroi de l'équipement. Aux endroits de corrosion ou d'absence de matière, le champ magnétique « s'échappe » de la paroi. Un détecteur de flux magnétique placé entre les pôles de l'aimant mesure alors la fuite de champ magnétique, [2].*

*- La méthode de contrôle par flux de fuite magnétique : utilise également un capteur de champ magnétique pour obtenir une signature de défaut. En revanche, la bobine d'excitation est parcourue par un courant continu, ce qui permet de magnétiser la pièce ferromagnétique à contrôler. Le principe du contrôle par flux de fuite magnétique consiste à aimanter la pièce à contrôler par un champ magnétique et à détecter à l'aide d'un capteur magnétique les fuites des lignes du champ qui résultent de la présence d'un défaut dans la pièce, [2].*

*Le contrôle par flux de fuite magnétique (Magnetic Flux Leakage) tire son origine dans l'utilisation d'une boussole pour détecter des défauts en surface sur des canons. Au 19<sup>ème</sup> siècle, l'institut d'architecture navale en Angleterre avait remarqué que l'aiguille d'une boussole changeait de comportement au voisinage d'un défaut sur un tube de canon. Vers la fin de la première guerre mondiale, il a été ensuite découvert que les résidus métalliques avaient tendance à s'agglutiner autour d'une zone comportant un défaut lorsque la pièce en question se trouvait à proximité d'un champ magnétique ; cette découverte a abouti en 1934 sur une commercialisation par l'entreprise MAGNAFLUX qu'on appelait inspection par particules magnétiques ou contrôle non destructif par magnétoscopie. Le système MFL arrivera un peu plus tard et reposera exactement sur le même principe que le contrôle par particules métalliques, sauf que les particules seront remplacées par un capteur qui permettra lui de faire une mesure quantitative.*

*Le contrôle par flux de fuite magnétique (Magnetic Flux Leakage) est une technique non destructive rapide adaptée au contrôle de tube, de pipe-lines et de réservoir de stockage qui sont fabriqués à partir de matériaux ferromagnétiques. Cette technique permet la détection de défauts*

internes et les pertes d'épaisseur en analysant les composantes des champs de fuite interceptée par le capteur de champ, [3].

Dans la suite, la méthode de contrôle par flux de fuite sera présentée sous forme schématique et nous nous intéresserons aux différentes approches de la modélisation de ce système de contrôle.

Notre mémoire comportera quatre chapitres dont nous présenterons brièvement les lignes principales ci-après :

Dans le premier chapitre, on présentera les méthodes de CND les plus utilisées tout en expliquant leurs principes, leurs mise en œuvre et domaines d'applications ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des différents détecteurs de champ magnétique existants ainsi que les caractéristiques de chaque type de capteurs.

Dans le troisième chapitre, on procèdera à la simulation d'un système CND-MFL en 3D constitué d'un circuit magnétique alimenté en champ magnétique par des aimants permanents et un capteur de champ à effet Hall inspectant la surface d'une tôle d'acier à faible carbone présentant plusieurs type de défauts. Le modèle ainsi élaboré sera implanté sous COMSOL multiphysics nous considéreront un défaut surfacique et sub-surfacique et nous étudierons l'effet de la variation des caractéristiques géométriques du défaut à savoir la longueur, la largeur et la profondeur de sur l'induction magnétique lors d'un déplacement linéaire.

Dans le quatrième chapitre, nous implanterons les réseaux de neurones(RN) sur MATLAB, pour la reconstitution d'un défaut parallélépipède à partir des valeurs de la variation d'impédance du capteur. Cette étape est précédée par la construction d'une base de données issue du CN-MEF-3D. Enfin, après l'étape de l'apprentissage, nous testerons la robustesse des RN sur échantillon.

---

# Chapitre I

## Généralités sur le contrôle non destructif

# Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif

## I.1 Introduction

*Les contrôles non destructifs sont nés de la nécessité devant laquelle se sont trouvés les ingénieurs de devoir garantir la sécurité des personnes et des matériels. Ainsi, les industries de pointes telles l'industrie aéronautique et l'industrie nucléaire sont implantées des techniques sophistiquées pour « débusquer » dans le stade final de l'élaboration des produits, les dernières imperfections de la matière, [5].*

*Aujourd'hui on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels. La « qualité » est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante. Devant cette réalité, les CND étant un moyen d'évaluer un aspect de cette qualité, sont donc plus largement utilisés aujourd'hui, et voient ainsi leur performance mise à l'épreuve.*

*D'une manière générale, l'objectif du contrôle non-destructif (CND) est de caractériser l'intégrité de structures industrielles sans les dégrader. Le développement de capteurs et de systèmes de CND performants permet de caractériser au mieux les structures inspectées et de détecter au plus tôt les éventuels défauts (fissures, corrosion...) consécutifs la fatigue des structures.*

*En règle générale, on peut considérer que les quatre principaux critères de performance de ces systèmes sont :*

- la simplicité de leur mise en œuvre (besoin éventuel d'un couplant, pollution éventuelle, besoin de protection de l'opérateur...)*
- leurs possibilités de caractérisation (capacité délivrer des informations significatives sur la présence et/ou sur la nature des défauts qui soient directement exploitables par l'opérateur...)*
- la rapidité de leur mise en œuvre.*
- le cout total des opérations.*

*Ces quatre critères sont étroitement liés : le cout des opérations de contrôle est tributaire du cout de la main-d'œuvre puisqu'un système de CND est d'autant plus économique qu'il est capable de fournir rapidement une information fiable et directement exploitable par un personnel peu qualifié.*

*Diverses techniques ont été développées pour rechercher des défauts dans différents types de structures et de matériaux. Leurs performances respectives peuvent éventuellement*

être évaluées voire comparées à l'aide des critères précités. Toutes les techniques ne sont cependant pas comparables, chacune étant appropriée à l'inspection d'une certaine catégorie de matériau.

Dans ce qui suit, nous allons traiter de quelques techniques de CND classiques et rappeler leurs principales caractéristiques, [4].

## I.2 Principe du contrôle

Le but principal d'un contrôle non destructif est de déterminer la qualité ou l'état de la soudure, avec l'intention de l'accepter ou de la rejeter en fonction de normes ou cahiers des charges. Les principaux défauts que les contrôles non destructifs doivent déceler appartiennent à l'une des classes suivantes :

- ✚ Défauts d'étanchéité.
- ✚ Défauts de continuité.
- ✚ Défauts de résistance mécanique.

Dans tout contrôle non destructif, on peut détecter les cinq étapes suivantes :

- ✚ La mise en œuvre d'un processus physique.
- ✚ L'altération de ce processus par le défaut.
- ✚ La révélation de cette variation par un détecteur approprié.
- ✚ Un émetteur de flux.
- ✚ Un récepteur ou détecteur, [6].

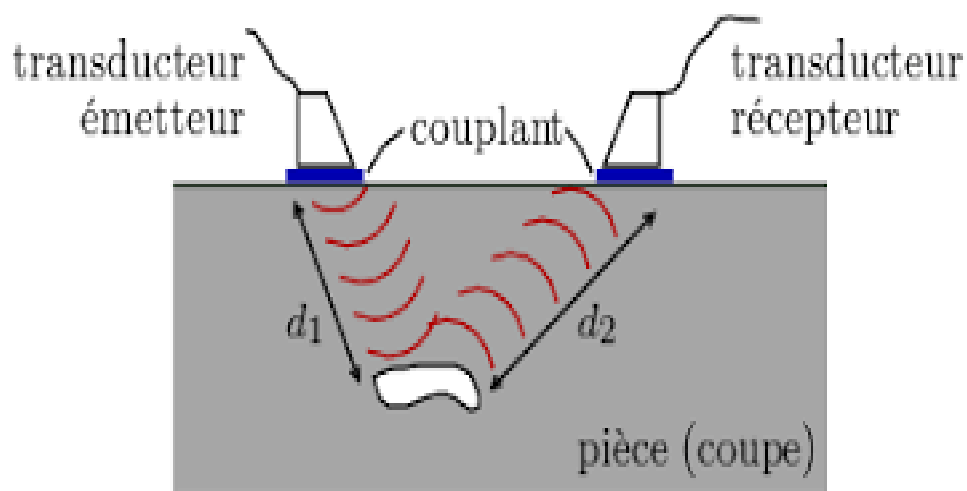


Figure I. 1.Principe du contrôle

### **I.3 Défauts et leurs origines**

Détecter un défaut dans une pièce c'est mettre en évidence physiquement une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci.

Cela peut être des porosités, fissures, défauts liés à des soudures, délaminages, Vu la complexité et la variété des défauts liées à une variété de conditions de service et les modes de défaillance dans de nombreuses circonstances différentes, de nombreux travaux ont étudié l'importance et l'évaluation des défauts des systèmes. Ils passent en revue l'état de l'industrie et des renseignements disponibles pour déterminer la présence, l'identification, la taille, l'emplacement des défauts dans ces systèmes.

La plupart de ces directives industrielles sont disponibles. Il s'agit notamment des informations résumées par le Comité européen de normalisation CEN, de l'American Society for Mechanical Engineers ASME, l'organisation internationale de normalisation ISO et de diverses autres sources INorb, Noral

Dans la littérature, différentes catégories de défauts ont été établies et détaillées (IDF, Tee03). En effet, la classification des défauts peut se faire suivant un ou plusieurs critères choisis (emplacement, nature, taille,... A titre d'exemple, une classification liée à l'emplacement des défauts dans les pièces inspectées est souvent adoptée, on trouve alors deux grandes catégories : défauts internes et défauts de surface.

#### **I.3.1 Défauts internes**

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièce moulée, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions.

Dans tous les autres cas, il peut s'agir de la présence control l'une pièce ou d'un produit. Pour ce type de défauts le c visuel est exclu d'office.

#### **I.3.2 Défauts de surface**

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes Défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis- qu'il s'agit des criques, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).

Défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètre géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

### I.3.3 Origines des défauts

Les origines des défauts sont multiples selon les domaines étudiés. Plusieurs critères peuvent être pris en compte lors de leur classification. Dans la suite, nous allons citer deux classifications qui sont généralement adoptées et englobent toutes les origines possibles des défauts. Il s'agit des origines des défauts suivant leur phase d'apparition et selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté Phase d'apparition Dans la littérature, les causes des défauts peuvent être répertoriées suivant leur phase d'apparition en : Défauts de fabrication : Ce sont des défauts générés par les différents procédés de construction ou d'assemblage. On trouve des défauts de forme, d'inclusions, de porosités, de fissurations, de moulage, de soudage ou de brasage des pièces mécaniques. On trouve également des hétérogénéités dans les matériaux et des défauts de collage. Défauts de service : Ce sont des défauts qui apparaissent dans des structures au cours d'utilisation, comme des fissures dues à la fatigue (mécanique ou thermique), défauts de collage et de fixation, corrosion et délaminage pour les composites, Selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté Il est possible également de faire une classification selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté, corrosion.

défauts de Matériau solides : porosités, microfissures, fissures, délaminages, corrosion, défauts de collage, cohésion fibre-matrice, - Assemblages : défauts de soudure, de collages, de serrage de boulon, d'ajustement.. Structures et constructions : corrosion sur les rails de chemins de fer, dans les armatures de bétons armés, dans les canalisations de transports de fluides. Fissuration des ponts et des bâtiments

Nourriture : géométrie, pépins, pour les fruits ou légumes Trous, géométrie pour les bonbons, sucettes, Corps humain : fêlure, fissures ou rupture d'un os, malformation d'un fœtus Sol terrestre : Cavités cachées, fissures, nappes d'eau asséchées, composition des couches terrestres....

### I.4 Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôles non destructifs sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un matériau (à l'exception des procédés visuels directs qui échappent à cette règle).

Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou  $\gamma$ , perturbation des courants de Foucault ...sont à la base des essais non destructifs, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...).

Cependant, par END, on sous-entend presque toujours qu'il s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques de CND diffèrent par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...), mais ils sont caractérisés par les étapes suivantes :

- 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.

Les techniques de CND sont nombreuses et peuvent être classées en plusieurs procédés

Citons :

- Les procédés optiques : l'examen visuel, le ressuage et les procédés à flux de fuite magnétique.
- Les procédés électromagnétiques : les courants de Foucault, les bruits de Barkhausen et de perméabilité incrémentale.
- Les procédés à ultrasons.
- Les procédés radiographiques.

Certains auteurs classent également la thermographie infrarouge, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND, [1].

## **I.5 Méthodologie de développement des systèmes de CND**

Indépendamment de la technique de CND utilisée, l'élaboration d'un système peut être décomposée en cinq phases fortement couplées ( la figure I.2). Tout d'abord, on se fixe l'objectif du contrôle qui est souvent [8] :

- ✚ Caractérisation (électrique, magnétique et géométrique) des matériaux.
- ✚ Recherche des défauts dans la structure des matériaux.
- ✚ Caractérisation des défauts.

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut).

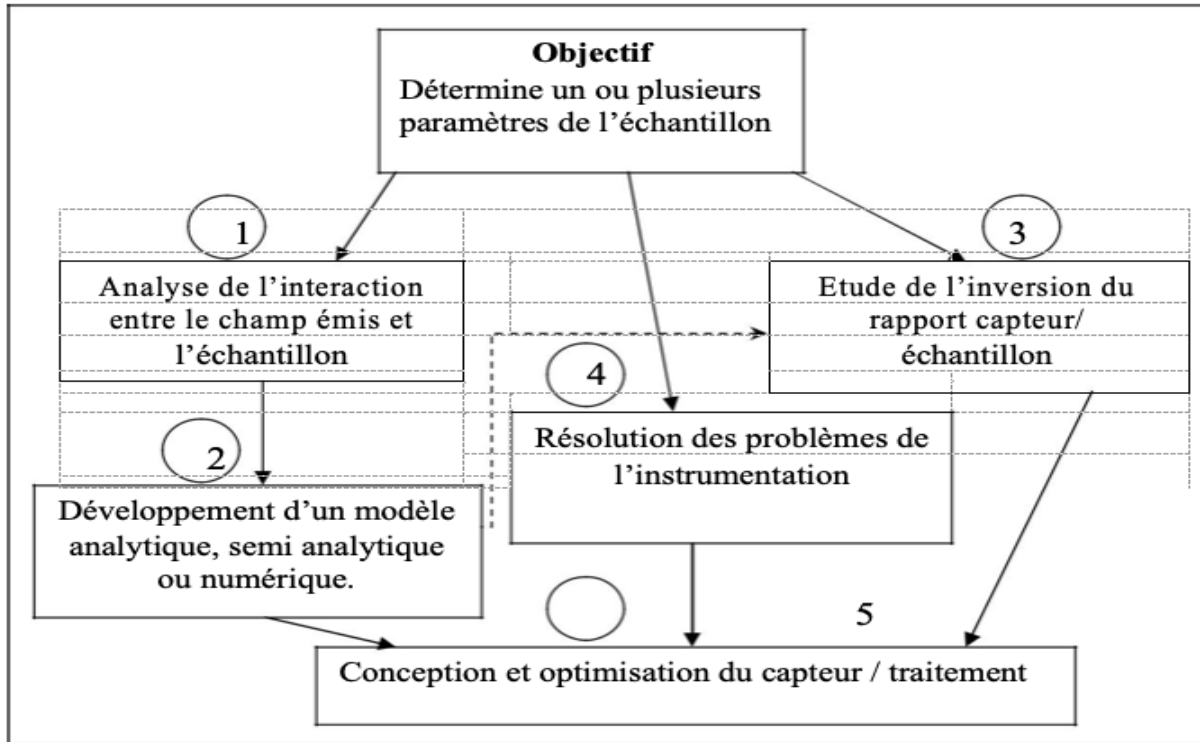


Figure I. 2.Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND.

Cependant, d'autres problèmes d'instrumentation interviennent. Ils dépendent des paramètres à déterminer (objectif). Par exemple, dans le cas des capteurs inductifs, la détermination des paramètres électriques nécessite un choix de la gamme de fréquences de l'alimentation.

## I.6 Différentes techniques du C N D

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler.

Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur.

Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière. Nous allons décrire le principe de chacun de ces moyens et faire une analyse succincte donnant une idée sur les possibilités d'emploi de chacune de ces techniques. Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettant de réaliser le contrôle non destructif dans toutes les conditions au meilleur rendement [1].

## I.6.1 Examen visuel

### I.6.1.1 Principe

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.



Figure I. 3.Principe Examen visuel.

### I.6.1.2 Domaine d'application

- Applicable pour tous les matériaux et pour defaults débouchant.

### I.6.1.3 Les Avantages et Inconvénients de l'examen visuel

Les Avantages et Inconvénients de l'examen visuel sont :

#### a) Avantages

- + Examen simple, rapide et peu coûteux.
- + Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

#### b) Inconvénients

- + Détection limité aux défauts visibles.
- + La surface doit être propre.

## I.6.2 Courants des Foucault

### I.6.2.1 Principe

Ce mode d'examen consiste à créer des courants induits par l'intermédiaire d'un champ magnétique alternatif (généré par un solénoïde) et variable dans le temps (basse ou haute fréquence). Ces courants induits et créés localement sont appelés courants de Foucault, leurs distributions et leurs répartitions dépendent du champ magnétique d'excitation ( la figure I.4), de la géométrie et des caractéristiques de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique et de structure examinée, [20].

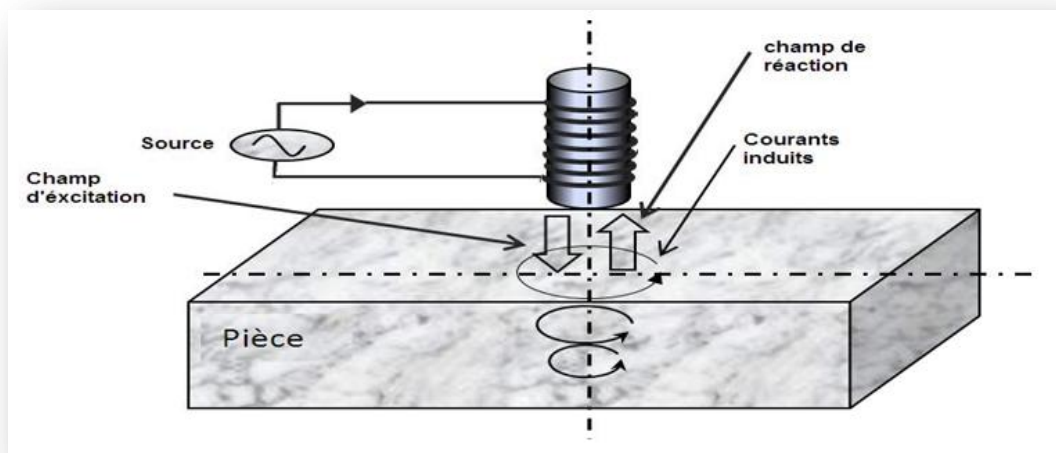


Figure I. 4.Principe du CND par courants de Foucault.

### I.6.2.2 Domaine d'application

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes:

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques.
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...).  
Suivi d'installations et de matériels en service.
- Mesure d'épaisseur, [20].

### I.6.2.3 Avantages et Inconvénient de courants de Foucault

Les Avantages et Inconvénients des courants de Foucault sont :

**a) Avantage :**

- ✚ 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 engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.

- ✚ Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles.

**b) Inconvénients :**

- ✚ La profondeur d'inspection est dépend de la fréquence d'excitation.
- ✚ La détection des défauts se fait d'une manière locale.
- ✚ Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs.
- ✚ La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts.
- ✚ à compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection ;[10].

**I.6.3 Ressuage****I.6.3.1 Principe**

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.

Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux trois phases illustrées sur (la figure I.5) : application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. À la suite de quoi, l'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance, [15].

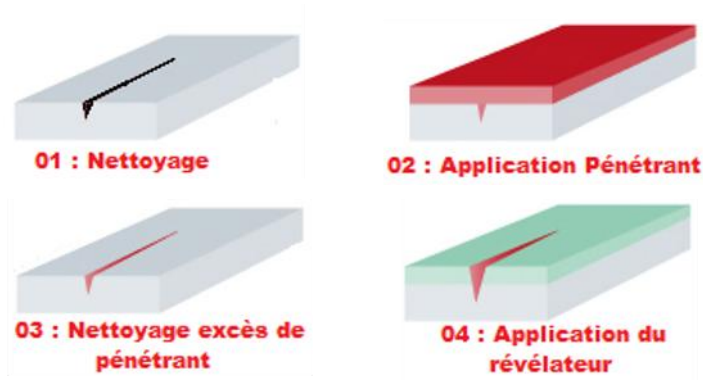


Figure I. 5. Principe de la méthode de ressuage.

### I.6.3.2 Domaine d'application

Le domaine 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 avec le pénétrant.

A titre indicatif, sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer et obtenir une détection fiable de défauts de 80  $\mu\text{m}$  de largeur pour 200  $\mu\text{m}$  de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  en largeur pour 20 à 30  $\mu\text{m}$  en profondeur, [16].

### I.6.3.3 Avantages et inconvénients de ressuage

Les Avantages et Inconvénients de ressuage sont :

#### a) Avantages

Peut être effectué sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement (adsorption) avec le pénétrant, Méthode globalement autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce, l'orientation des défauts est sans influence, [1].

#### b) Inconvénients

Nécessite un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection, L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.

## I.6.4 Radiographie

### I.6.4.1 Principe

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons  $\gamma$ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de densité optique ( Figure I.6).

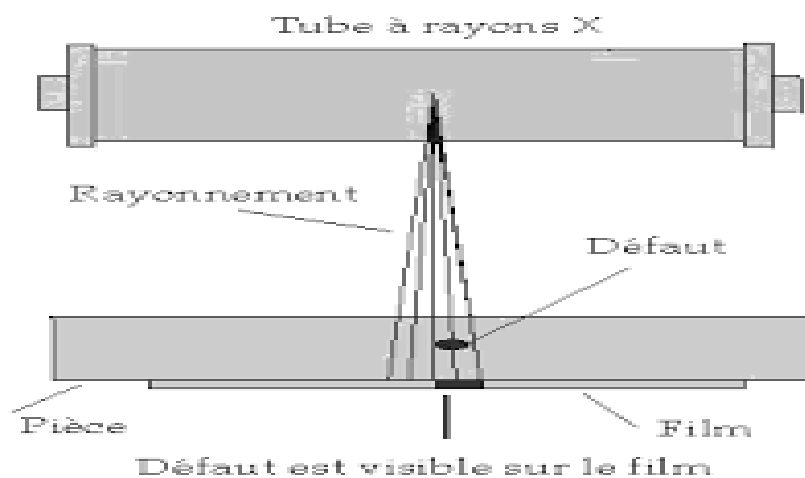


Figure I. 6.Principe de la méthode de radiographie.

### I.6.4.2 Domaine d'application

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries Métallurgiques, [16].

### I.6.4.3 Avantages et Inconvénients de radiographie

Les Avantages et Inconvénients de radiographie sont :

#### a) Avantages

Fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille.

Garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

### b) Inconvénients

Toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur.

De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée.

## I.6.5 CND par flux de fuite magnétique

### I.6.5.1 Principe

Le contrôle par flux de fuite est basé sur la circulation d'un champ magnétique à travers l'épaisseur du tube. Étant donné que le tube est ferromagnétique, le champ magnétique est canalisé par le tube. En cas de défaut, les lignes de force du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un "champ de fuite", appelé également "fuite de flux magnétique", [9]. Le champ magnétique en surface du tube est modifié. Ce changement de champ magnétique peut être mesuré à l'aide de bobines ou de capteurs à effet Hall. Le principe général du contrôle par flux de fuite est très proche de celui de la magnétoscopie (magnetic particle inspection en anglais (MPI)), (Figure I.7)

les lignes de force du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un "champ de fuite", appelé également "fuite de flux magnétique".

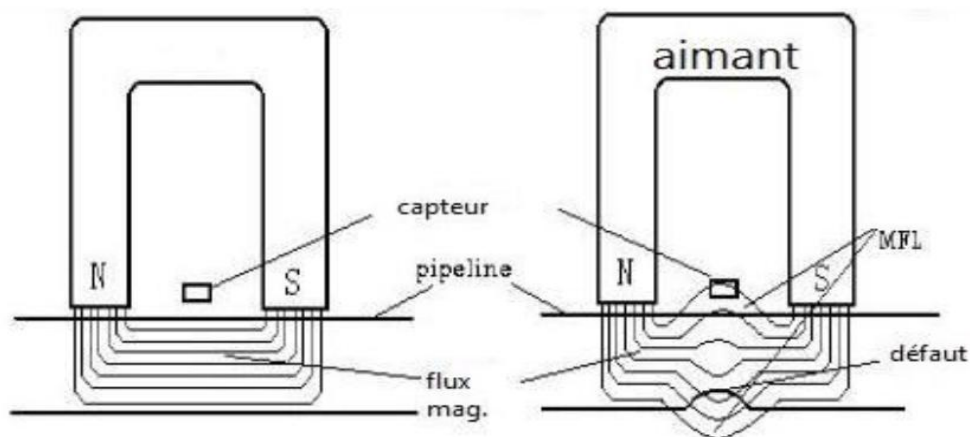


Figure I. 7.Principe du CND par flux de fuite magnétique.

### I.6.5.2 Domaine d'application

La magnétoscopie est utilisée pour détecter des discontinuités de surface, débouchant en surface ou sous-cutanées, exclusivement sur matériaux ferromagnétiques.

### I.6.5.3 Avantages et Inconvénients du CND par MFL

Les avantages et inconvénients sont :

- **Avantages:**

- ✚ Permet une analyse rapide de la perte d'épaisseur de la paroi contrôlée
- ✚ Rapport de contrôle numérisé et stocké
- ✚ Permet de détecter des pertes d'épaisseurs internes et externes
- ✚ Peut être utilisé en présence d'un revêtement anti corrosion interne au réservoir

- **Inconvénients:**

- ✚ Impossibilité de distinguer la face de la paroi affectée par la perte d'épaisseur
- ✚ Les zones suspectes peuvent nécessiter une confirmation par une mesure d'épaisseur par Ultrasons
- ✚ Encombrement de l'outillage nécessaire au contrôle qui interdit d'accès certaines zones (robe du réservoir, puisard, serpent interne, pied de charpente,...)
- ✚ La surface doit être exempte de particules aux propriétés électromagnétiques, sèche, balayée et non grasse.

## I.6.6 Ultrasons

### I.6.6.1 Principe

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface, (Figure I.8). L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce.

Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

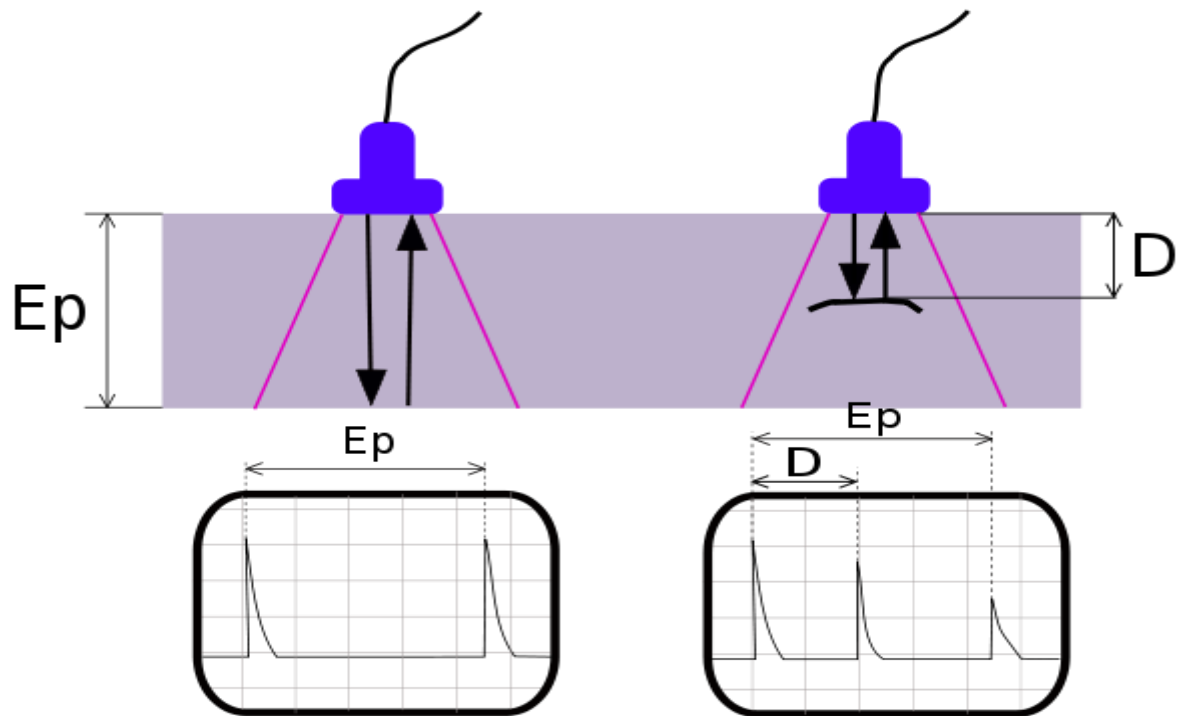


Figure I. 8.Principe de la méthode des ultrasons.

### I.6.6.2 Domaine d'application

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope. Les ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers,...etc.

### I.6.6.3 Avantages et Inconvénients d'ultrasons

Les avantages et inconvénients sont :

#### a) Avantages

- ✚ Équipements portatifs.
- ✚ Appareil très sensible aux fissures.
- ✚ Résultats immédiats.
- ✚ Absence totale d'inconvénients liés à l'hygiène et à la sécurité.

## b) Inconvénients

- ✚ Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- ✚ Assujetti à un couplage pièce traducteur.
- ✚ Huile de couplage est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'opération.

## I.6.7 La magnétoscopie

### I.6.7.1 Principe

Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts (Figure I.9).

L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV.

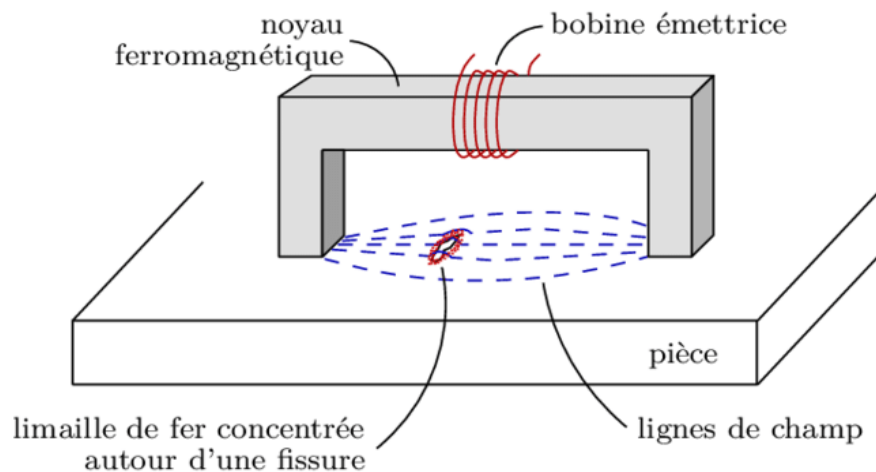


Figure I. 7.Principe de la méthode de magnétoscopie.

### I.6.7.2 Domaine d'application

Magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers ferriques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques.

On considère qu'un matériau est ferromagnétique lorsque soumis à un champ continu de 2400 A/m, il présente une induction d'au moins 1 tesla. La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle :

- Dépièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles.

- Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées.
- Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures, [16].

### **I.6.7.3 Avantages et inconvénients magnétoscopie**

Les Avantages et Inconvénients de magnétoscopie sont :

#### **a) Avantages**

Les défauts sous-jacents peuvent être détectés (de 1 à 2 mm à partir de la surface), Ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure : longueur minimale 0,5 mm, largeur 1 mm.

#### **b) Inconvénients**

Méthode de contrôle ne s'appliquant qu'à des alliages susceptible d'être démagnétisés (aciers magnétisables), Problèmes liés à l'hygiène et la sécurité (Utilisation de lumière ultraviolette, utilisation, stockage et élimination de produits chimiques dont certains sont inflammables), [1].

## **I.6.8 Thermographie**

### **I.6.8.1 Principe**

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermo grammes) des surfaces observées ( la figure I.10).

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographie [15].

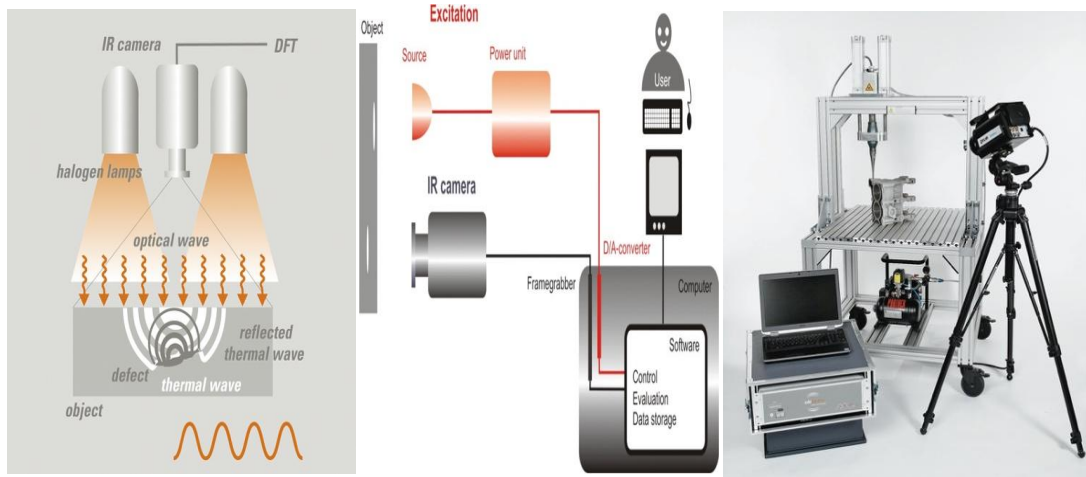


Figure I. 8.Principe de la méthode de thermographie.

### I.6.8.2 Thermographie pulsionnelle

Elle consiste à déposer à un instant  $T_0$ , une impulsion spatialement uniforme de chaleur sur la surface de la pièce à contrôler et à observer l'évolution de la température de surface au cours du transfert de chaleur par conduction dans l'épaisseur. La présence d'une discontinuité dans le matériau perturbe le flux thermique ce qui se traduit par un écart de température appelé contraste thermique.

La mesure de ce contraste et de l'instant  $T$  pour lequel il est maximum renseigne sur la nature et la profondeur du défaut.

### I.6.8.3 Thermographie modulée

Dans ce cas l'apport de chaleur est périodique et la présence d'une discontinuité se traduit par un déphasage entre l'évolution de la température de surface du matériau sain et celle du matériau défectueux.

## I.6.9 Méthode surfacique

### I.6.9.1 Principe

L'apport de chaleur et l'observation se font sur un élément de surface de la pièce à contrôler. On enregistre une séquence d'images qui décrit l'évolution de la température de surface au cours du temps en chaque point de la zone contrôlée.

### I.6.9.2 Avantages et inconvénient de surfacique

Les Avantages et Inconvénients de surfacique sont :

#### a) Avantages

- ✚ Rapidité de paléage et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie).
- ✚ Détection possible à travers un revêtement surfacique.

- ✚ Aucune préparation particulière de la surface à contrôler.
- ✚ Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.
- ✚ Contrôle non polluant.

#### b) Inconvénients

- ✚ Investissement important.
- ✚ Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites.
- ✚ Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique.
- ✚ Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant.

### I.6.10 Contrôle par laser

#### I.6.10.1 Principe

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable ( la figure I.11). Les méthodes de contrôle non destructif par laser sans populaires dans les industries aéronautique et automobiles,[21].

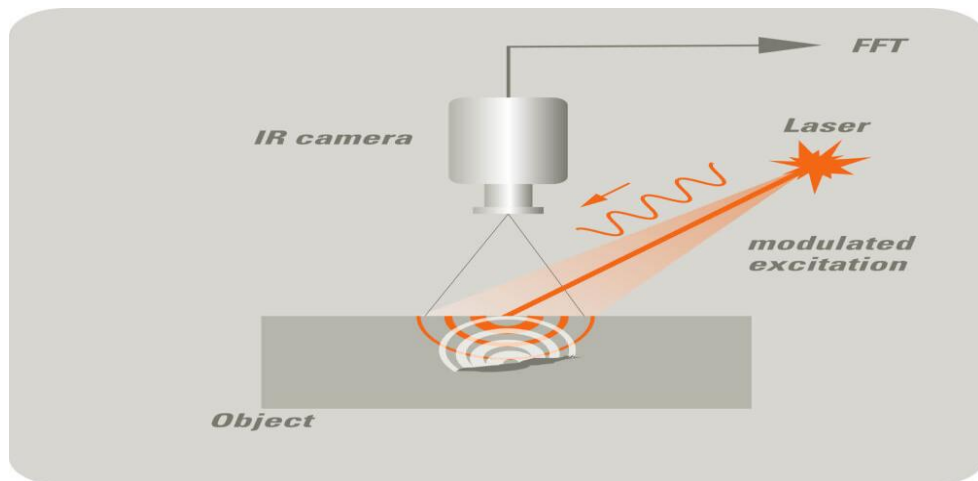


Figure I. 9.Principe de contrôle par laser.

#### I.6.10.2 Avantages et Inconvénients de contrôle par laser

Les Avantages et Inconvénients de contrôle par laser sont :

**a) Avantages**

- ✚ Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler.
- ✚ Pas de constables : liquide de pénétration, martiaux de marquage...etc.
- ✚ Avec les capteurs électro-optiques comme les cameras CCD, des mesures temps réel sont possibles.

**b) Inconvénients**

- ✚ Considération de sécurité particulières doivent être prises en compte.
- ✚ Une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultants.
- ✚ Les résultats dépendent de la composante de cisaillement.
- ✚ L'interprétation des résultats est subjective, [22].

## I.7 Conclusion

*Dans ce chapitre, les techniques du CND les plus répandues ont été présentées d'une manière succincte.*

*Un aperçu global des différents défauts et structures à inspecter rencontrés dans l'industrie montre la complexité et la difficulté de mettre en œuvre une technique universelle. En effet, les méthodes de CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une technique dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux inspectés, des phénomènes utilisés (thermique, électromagnétique,..) et de la nature de réponse recherchée.*

*Une des techniques les plus utilisés pour les matériaux ferromagnétiques est le contrôle par flux de fuite magnétique, elle adaptée au contrôle de tube, de pipe-lines et de réservoir de stockage. Cette technique sera l'objet principale de notre mémoire, et avant d'entamé la partie simulation de cette dernière, on doit tout d'abord aborder, au chapitre suivant, les capteurs utilisés lors de ce contrôle.*

## **Chapitre II**

# **Capteurs à Flux de fuite magnétique**

## Chapitre II. Capteurs à Flux de fuite magnétique

### II.1 Introduction

La méthode de contrôle par flux de fuite magnétique utilise un capteur de champ magnétique pour obtenir une signature de défaut. En revanche, la bobine d'excitation est parcourue par un courant continu, ce qui permet de magnétiser la pièce ferromagnétique à contrôler. Le principe de ce procédé sera décrit plus en détails par la suite, [11].

Dans ce chapitre nous décrirons d'une manière détaillée Les capteurs magnétiques en ce qui concerne les critères de classification (type, fonction, mode de fonctionnement) et leurs exploitations, et aussi la modélisation des systèmes de flux de fuite magnétiques.

### II.2 Présentation de contrôle par flux de fuite magnétique

#### II.2.1 Principe de fonctionnement de Flux de fuite magnétique

Les dispositifs MFL sont généralement constitués d'un circuit magnétique magnétisé par un ensemble de bobines d'excitation alimentées par un courant continu ou aimant permanent. Le circuit magnétique forme avec la pièce à étudier un circuit magnétique fermé. La présence d'un capteur lors du balayage de la pièce permet de relever les champs qui fuient dans l'air. Au voisinage d'un défaut, le parcours des lignes de champ est modifié. Les lignes de champ magnétiques contournent les zones d'air et quelques lignes de champ viennent à fuir dans l'air à proximité du défaut. Ces variations locales de champ magnétique sont détectées par un capteur de champ magnétique, [2].

Les variations locales du champ magnétique sont facilement détectables lorsque le défaut débouche à la surface de la pièce à contrôler.

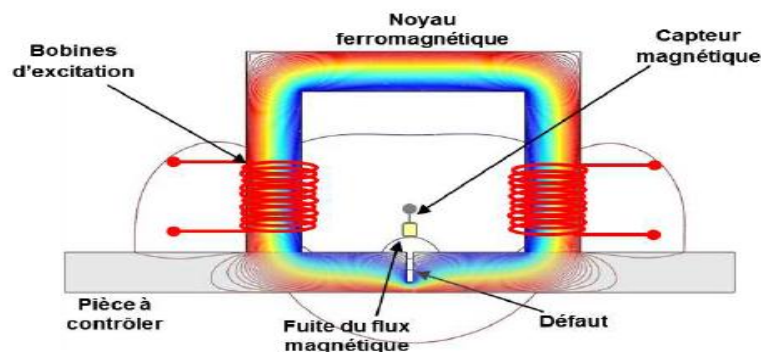


Figure II. 1.Principe de contrôle par flux de fuite magnétique.

## II.2.2 Différents types de capteurs de champ

Les capteurs magnétiques sont utilisés dans une grande variété d'applications, de la mesure de distances ou de vitesses, à la détection de pièces métalliques, en passant par la mesure de courant.

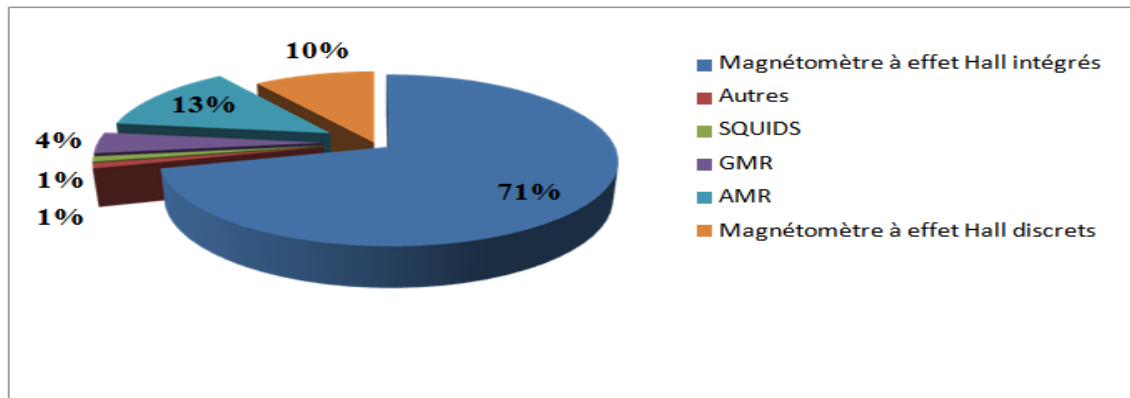


Figure II. 2. le marché d'utilisation des capteurs magnétiques en 2007, un volume d'affaire total de 940 M\$, [14].

### II.2.2.1 Les capteurs à effet Hall

Lorsque la direction du mouvement du courant est perpendiculaire à la direction de l'intensité de l'induction magnétique, les composants Hall des deux côtés produisent une électro-Obliger, [17]. Il peut être exprimé par la formule suivante :

$$V_H = K_H \times I \times B \times \cos\alpha \quad (\text{II.1})$$

-**V<sub>H</sub>** : la force électromotrice de Hall .

-**K<sub>H</sub>** : Coefficient de Hall .

-**B** : Intensité d'induction magnétique .

-**Cos $\alpha$**  : l'angle normal entre l'intensité d'induction magnétique et les composants de Hall.

### II.2.2.2 Les bobines

Les bobines magnétiques exploitent la loi de Maxwell-Faraday qui dit que toute variation de flux magnétique dans une spire génère une force électromotrice dont la valeur est donnée par :

$$V = N \frac{d\varphi}{dt} = N \frac{d(B.S)}{dt} \quad (\text{II.2})$$

-**N** : nombre de spires.

- **$\varphi$** : le flux d'induction magnétique.

-**B** : intensité d'induction magnétique.

-S : section transversale des bobines, [7].

### II.2.2.3 Magnétorésistance géante (GMR)

Son principe de fonctionnement est basé sur la diminution de la résistance électrique d'un matériau lors d'application d'un champ magnétique ( la figure II.3).

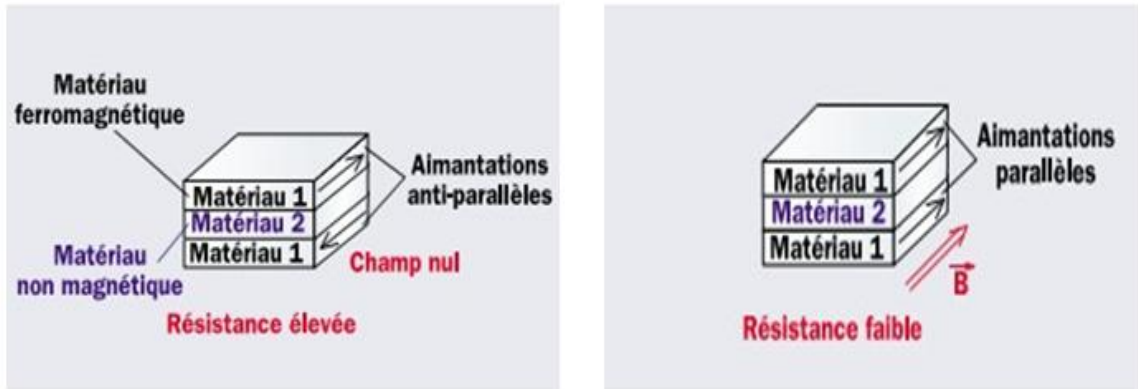


Figure II. 3. Diminution de la résistance à l'application d'un champ .

Les variations de résistance dans de telles structures (appelées magnétorésistances géantes ou GMR) s'expliquent par les phénomènes de diffusion des électrons dépendants du spin. En effet, dans les éléments ferromagnétiques les électrons de spin down (c'est-à-dire ceux dont le spin est antiparallèle au vecteur aimantation) sont plus fortement diffusés que les électrons de spin up (spin parallèle au vecteur aimantation), [18].

### II.2.2.4 Les fluxgates

Le capteur fluxgate le plus simple se compose d'un noyau fait un matériau magnétique doux, le plus souvent un alliage ferromagnétique, et d'au moins deux bobines : une pour l'excitation et l'autre pour la détection (Figure II.4).

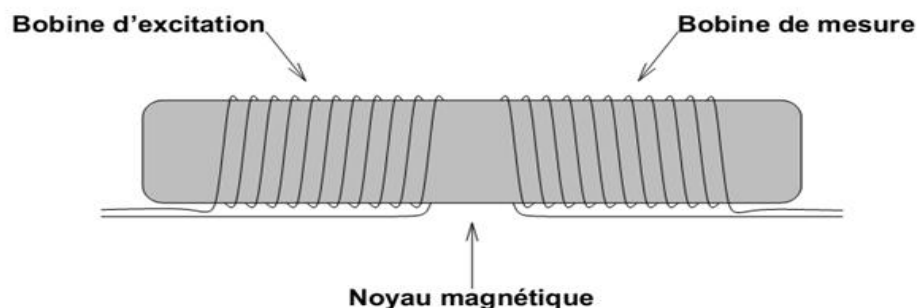


Figure II. 4. Structure de base d'un capteur de type fluxgate.

### II.2.2.5 Les SQUIDS

Le SQUID (Super conducting Quantum Interference Device) ne permet pas de mesurer le champ mais plutôt sa variation (Figure II.5). En effet, le flux piégé dans le supraconducteur est quantifié et ne peut être modifié que d'une valeur multiple « du quantum » le flux  $\varphi_0 = h/2e$

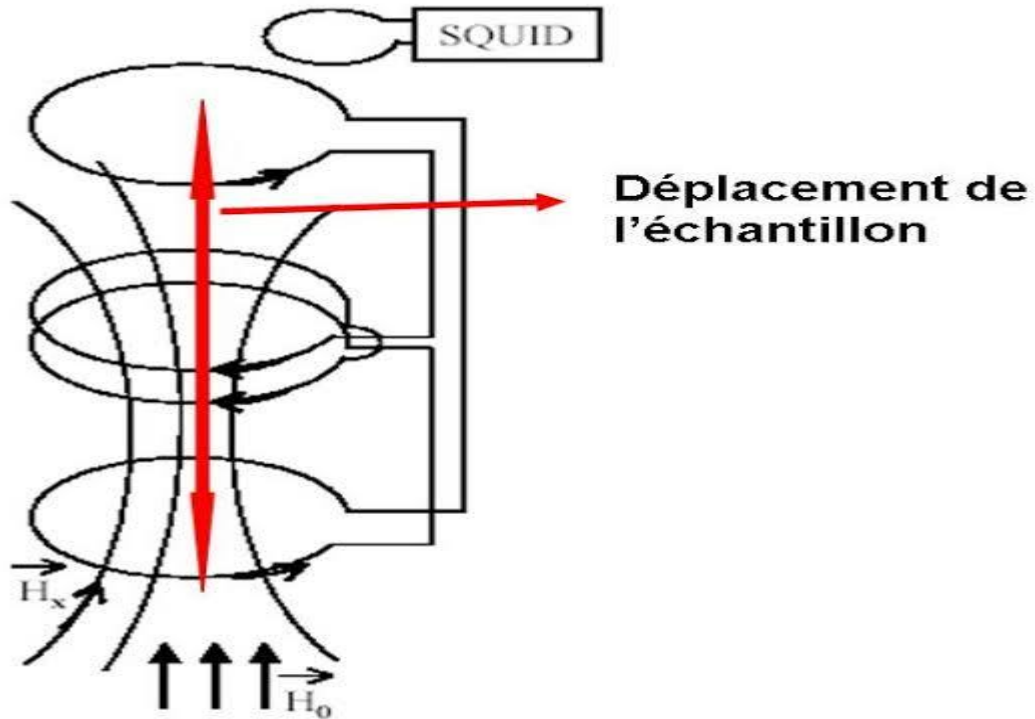


Figure II. 5.Schéma de principe de mesure.

Dans le SQUID, la tension mesurée oscille avec les changements de la phase aux deux jonctions, qui dépend du changement du flux magnétique. Le comptage des oscillations permet d'évaluer le changement de flux qui s'est produit, [12].

### II.2.2.6 Capteurs magnéto-résistifs

On désigne par magnéto-résistance la variation de la résistance d'un matériau sous l'action d'un champ magnétique. Celui-ci peut agir directement sur les électrons de conduction ou indirectement en affectant l'aimantation, la résistance dépendant alors de l'état magnétique du système.

La figure II.6 montre le principe de fonctionnement est basé sur la variation de la résistance d'un matériau en fonction de la direction de l'aimantation qui lui est appliquée, [19].

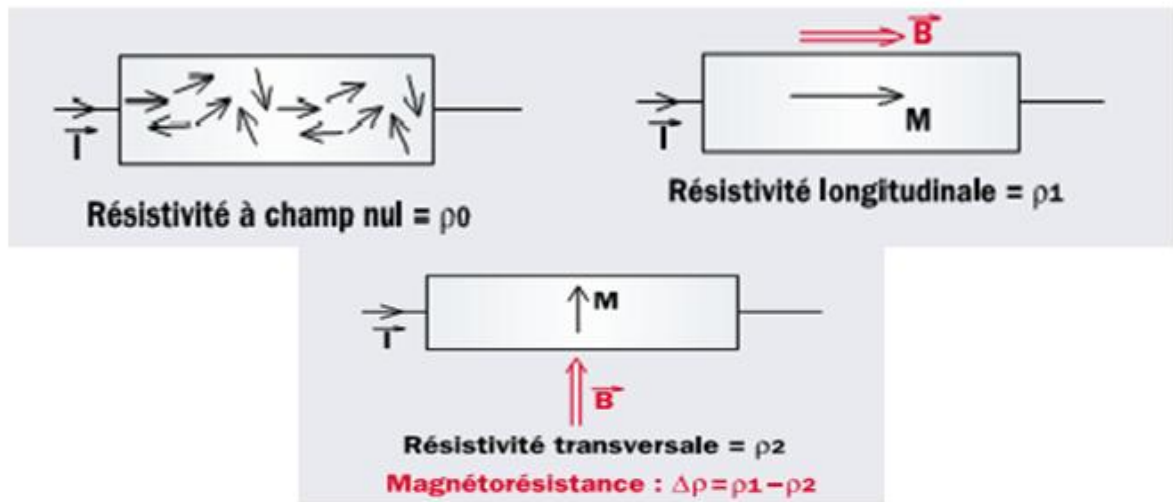


Figure II.6. Variation de la résistance en fonction  $\vec{B}$ .

### II.2.3 Les Avantages et les inconvénients des MFL

Les Avantages et Inconvénients des MFL sont :

#### a) **Avantage :**

- ✚ Simple, peu coûteux et rapide.
- ✚ Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

#### b) **Inconvénient :**

- ✚ Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques.
- ✚ Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée.
- ✚ La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce, [17].

### II.2.4 Phénomènes physiques et formulation générale

#### II.2.4.1 Phénomène physique

Pour illustrer le problème physique, on considère le cas général d'un corps ferromagnétique de perméabilité magnétique  $\mu(\mathbf{r})$  occupant un volume dans l'espace libre avec  $\mathbf{r}$  un point de cet espace de coordonnées  $(x, y)$ . Le volume est contenu à l'intérieur d'une surface fermée  $\mathbf{S}$ . On considère une source de courant  $\mathbf{J}_s$  qui crée un champ magnétique d'excitation  $H_s(\mathbf{r})$ . Le champ engendre la magnétisation du milieu ferromagnétique et le vecteur aimantation  $\mathbf{M}$  définit l'état de la magnétisation.

On définit  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$  comme étant l'induction magnétique et  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$  comme étant l'intensité du champ magnétique telles que :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu(\mathbf{r})\mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (\text{II.3})$$

Où  $\mu(\mathbf{r})$  est la perméabilité magnétique du matériau dépendant non linéairement de l'intensité du champ magnétique  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ . La courbe B-H illustrant la relation non-linéaire est supposée connue.

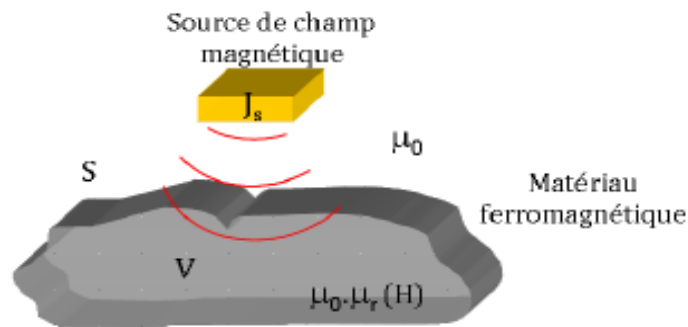


Figure II. 7 Exemple illustratif du phénomène physique.

#### II.2.4.2 Equations de Maxwell

En régime magnétostatique, les équations de Maxwell à résoudre sont l'équation de conservation du flux (équation de Maxwell-Thomson) et l'équation de Maxwell-Ampère.

En effet, l'équation de conservation du flux impose un flux du champ magnétique nul à travers une surface fermée telle que :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

L'équation de Maxwell-Ampère dérive du théorème d'Ampère. Sous sa forme locale, elle s'écrit en termes du vecteur densité de courant telle que :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s \quad (\text{II.5})$$

avec  $\mathbf{J}_s$  vecteur densité de courant des bobines source.

#### II.2.4.3 Conditions de continuité entre deux milieux

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités et ne sont par conséquent pas différentiables. Cependant, il est possible de déduire des conditions dites de transmission des champs. Considérons une surface  $S$  entre deux milieux représentés par les sous domaines 1 et 2. La normale  $\mathbf{n}$  à la surface est orientée du sous-domaine 1 vers le sous-domaine 2. En absence d'un courant circulant sur la surface séparant les deux milieux, l'application du théorème de la divergence implique alors les conditions de transmission, ou conditions de continuité, suivantes :

$$n \times (H_2 - H_1) = 0 \quad (\text{II.6})$$

$$n \cdot (B_2 - B_1) = 0 \quad (\text{II.7})$$

Les conditions de transmission sont relatives soit à la composante tangentielle, soit à la composante normale des champs. Elles entraînent que la composante normale de  $B$  et la composante tangentielle de  $H$  soient continues à travers la surface  $S$ .

#### II.2.4.4 Formulation générale d'un problème de magnétostatique

Le champ magnétique total  $H$  est la somme du champ source que nous notons  $H_s$  et du champ magnétique induit par la pièce ferromagnétique que nous notons  $H_i$  et qui représente l'inconnue du problème :

$$H(r) = H_s(r) + H_i(r) \quad (\text{II.8})$$

Le champ induit  $H_i$  dérive d'un potentiel scalaire tel que :

$$H_i(r) = -\nabla \phi_i(r) \quad (\text{II.8})$$

Où  $\phi_i(r)$  est le potentiel scalaire du au corps ferromagnétique et est défini par :

$$\phi_i(r) = \int_V M(r') \nabla' G(r, r') dv \quad (\text{II.9})$$

Les points  $r, r'$  sont respectivement le point d'observation et le point source séparés par une distance  $R$  définie par :

$$R = |r - r'| \quad (\text{II.10})$$

$G(r, r')$  est la fonction de Green dans l'espace libre en régime statique définie en 3D par :

$$G(r, r') = \frac{1}{4\pi R} \quad (\text{II.11})$$

et  $M$  est le vecteur magnétisation lié au vecteur intensité du champ par :

$$M(r) = \chi(r) H(r) \quad (\text{II.12})$$

avec  $\chi(r)$  la susceptibilité magnétique dépendant de la perméabilité relative telle que :

$$\chi(r) = \mu_r(r) - 1. \quad (\text{II.13})$$

En utilisant l'expression du champ induit (II.7, II.8) dans l'expression du champ total (II.6), on obtient l'équation à résoudre telle que :

$$H(r) = H_s(r) - \nabla \int_V M(r') \nabla' G(r, r') dv \quad (\text{II.14})$$

## II.2.5 Méthode des éléments finis(MEF)

### II.2.5.1 Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule

L'existence d'un fonctionnel type intégral défini par :

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega. \quad (\text{II.15})$$

- ✓ L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

$$L = W_c - W_p \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- ✓  $\Omega$  : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Où :

- ✓ n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.
- ✓ A : inconnue au nœud n du domaine.

### II.2.6 Formulation résidus pondérés

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par la approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus R, solution ;

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II.18})$$

Tel que :

- R : est le résidu de l'approximation.
- L(A) : opérateur différentiel.
- f : fonction définie sur le domaine d'étude  $\Omega$ .
- A : l'inconnue à chercher.

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine  $\Omega$ .

$$\int_{\Omega} R_i \phi_i \cdot \partial\Omega \quad (\text{II.19})$$

Où :

$\phi_i$  : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

1-La méthode de collocation par points, ou la fonction de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque pont ou on veut approcher la solution.

2-Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.

3-La méthode de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre.

Contrairement à la méthode variationnelle, la méthode des résidus pondérés, ne nécessite pas la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système, [13].

### II.2.7 Calcul de l'impédance

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

L'énergie stockée W dans le système peut être donnée par :

$$W = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H \cdot dv \quad (\text{II.20})$$

En supposant la relativité constante dans chaque sens, l'énergie stockée dans un élément fini de volume  $V_i$  peut être écrite, en termes des composantes de B seule sous la forme:

$$W_i = \frac{1}{2} ( B_{ri}^2 + B_{zi}^2 ) \cdot V_i \quad (\text{II.21})$$

En additionnant sur tous les éléments (N) de la région du maillage, l'énergie stockée total est donnée par :

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} v ( ( B_{ri}^2 + B_{zi}^2 ) \cdot V_i \quad (\text{II.22})$$

L'inductance de la bobine peut alors être calculée par :

$$L = 2 \frac{W}{I_s^2} \quad (\text{II.23})$$

Où  $I_s$  est le courant dans la bobine de la source.

La résistance de la bobine est associée à l'énergie dissipée dans le système. L'énergie dissipée dans un élément fini de volume  $V_i$  est donnée par :

$$P_i = \frac{j_i^2 \cdot v_i}{\sigma} \quad (\text{II.24})$$

Où  $J_i$  est la densité du courant induit définie par :

$$j_i = -j \cdot \omega \cdot \sigma A_{ci} \quad (\text{II.25})$$

Où  $c_i$  est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément (i).

En Remplaçons l'équation (II.23) dans (II.21) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par :

$$P = \sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N V_i \cdot \omega^2 \cdot \sigma \cdot A_{ci}^2 \quad (\text{II.26})$$

La résistance de la bobine est donnée par :

$$R = \frac{p}{I_s^2} \quad (\text{II.27})$$

L'impédance de la bobine est définie par [10]:

$$Z = R + j \cdot \omega \cdot L \quad (\text{II.28})$$

---

## II.3 Conclusion

*Dans ce chapitre un aperçu sur le contrôle non destructif par flux de fuite magnétique CND-MFL ainsi que les capteurs utilisés lors de ce contrôle a été abordé .Le CND- se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface très fins sur les pièces en acier au carbone et autre alliage ferromagnétiques.et aussi au regard à ce qui précède, on peut dire qu'il existe diverses façons pour détecter le champ magnétique grâce aux différents types de capteurs magnétiques, cela dit, les capteurs magnétiques n'ont pas la même aptitude et de fait pas les mêmes fonctions.*

*Après une présentation du problème physique lié au système de CND par flux de fuite, nous avons établi un bilan des différentes formulations existantes dans la littérature.*

*Le chapitre suivant sera consacré aux simulations CND-MFL et interprétations des résultats obtenus.*

# Chapitre III.

## Simulations de contrôle par MFL

## Chapitre III. Simulations du contrôle Flux de fuite magnétique (MFL)

### III.1 Introduction

Le contrôle par flux de fuite magnétique est rendu possible grâce à l'utilisation d'un puissant aimant permanent permettant la magnétisation du matériau à contrôler, généralement de matériau ferromagnétique (à base de fer ou acier). En présence de défauts dans le matériau (fissure, corrosion ou variation d'épaisseur), le champ magnétique « fuit » de l'acier.

Les sondes MFL sont composées d'un détecteur placé entre les pôles de l'aimant, d'où il peut détecter les pertes de flux. Durant l'inspection, un circuit magnétique se forme entre la pièce contrôlée et la sonde. Le champ magnétique induit dans la pièce permet une saturation localisée du matériau jusqu'à ce qu'il ne puisse plus absorber de flux. Le champ déborde donc et fuit du tube. Des capteurs astucieusement disposés peuvent alors mesurer précisément le vecteur tridimensionnel du champ de flux de fuite.

La technologie MFL est utilisée dans l'inspection des tôles ferromagnétiques pour la mesure de l'état de corrosion des tôles de fond de bacs, réservoirs ou cuves de stockage est une méthode préventive efficace dans le cadre de la protection de l'environnement et du matériel.

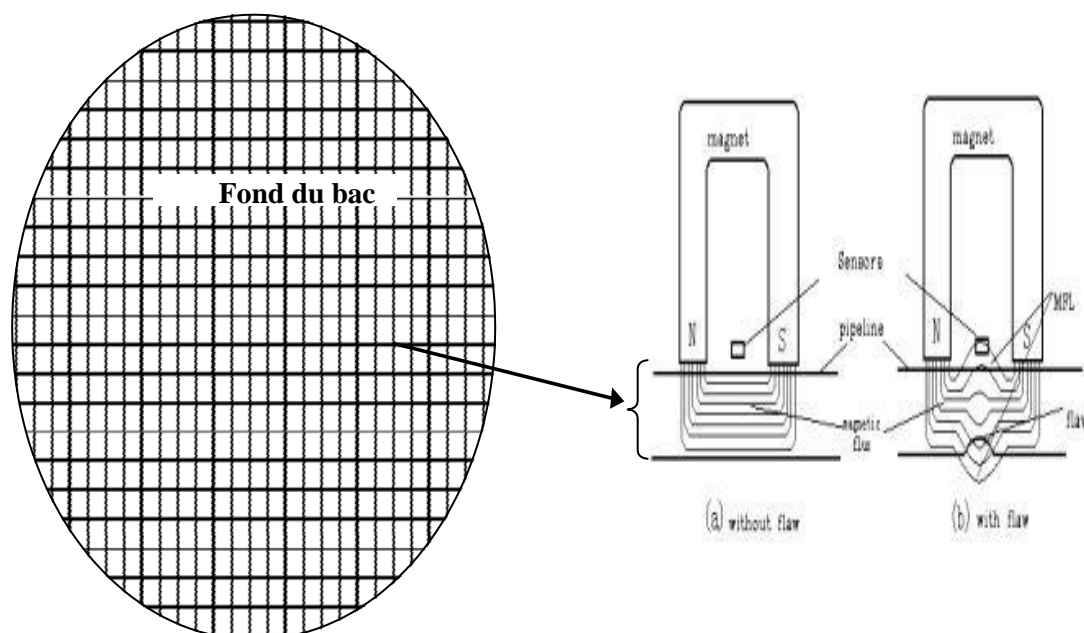


Figure III.1. Inspection d'une tôle de fond du bac par MFL.

La magnétostatique est la branche de l'électromagnétisme qui étudie les champs magnétiques produits par des courants invariants à temps constant. Un courant de magnétisation comme dans les aimants permanents est produit par des charges mobiles qui subissent un mouvement de translation si les dipôles magnétiques ne sont pas uniformément distribués. Lorsqu'un grand nombre de charges existe en flux continu, les courants sont considérés comme stables (courant continu, courant continu). Par conséquent, dans ce cas de charges se déplaçant avec une vitesse constante, un champ magnétique statique (ou magnétostatique) est produit, [23].

Du point de vue mathématique, l'équation de Maxwell, qui sont des équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites données, délimitent des phénomènes physiques de nature magnétique. En l'absence de courant libre, le problème magnétostatique est régi par les équations de Maxwell.

La loi de flux magnétique révélant l'inexistence de monopôles magnétiques et la conservation du flux magnétique est donnée par:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \text{ or } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{III.1})$$

où  $\mathbf{B}$  est le vecteur de densité de flux magnétique. En plus des équations précédentes, nous présentons la relation constitutive à l'intérieur des matériaux ferromagnétiques (y compris les aimants permanents):

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (\text{III.2})$$

Ici,  $\mu_0$  dénote la perméabilité magnétique de l'espace libre (qui est égal à  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ) et  $\mathbf{M}$ , qui dépend de  $\mathbf{B}$ , est le vecteur d'aimantation du matériau ferromagnétique. Dans l'espace libre,  $\mathbf{M} = 0$  et la relation simplifier pour :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (\text{III.3})$$

Nous présentons maintenant la notion de potentiel de vecteur magnétique. Ce qui est un champ vectoriel qui ne peut pas vraiment être interprété physiquement néanmoins, le vecteur de densité de flux magnétique  $\mathbf{B}$  est exprimé en termes du vecteur auxiliaire  $\mathbf{A}$  appelé vecteur de potentiel magnétique, tel que:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{III.4})$$

### III.2 Déroulement de simulation sous COMSOL Multiphysics

Une simulation électromagnétique sous COMSOL Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales: le prétraitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de prétraitement inclut l'implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physique de composants domaine de travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement (Excel, Matlab...).

### III.3 Caractéristique du système MFL à étudier

Le système d'inspection par flux de fuite magnétique d'une tôle du fond du bac est composé de deux aimants permanents reliés par un circuit magnétique. L'ensemble permet de magnétiser la tôle jusqu'à la saturation. En parallèle, un capteur à effet Hall est placé au milieu afin de mesurer un éventuel champ de fuite. Les dimensions des différentes parties sont données ci-dessous :

- **Aimants permanents** : Longueur de 90 mm, section de 55x50 mm<sup>2</sup> et un espace entre les deux aimants de 70mm. Une aimantation  $M = 100000A/m$ .
- **Tôle d'acier à faible carbone** : Longueur de 50 mm, largeur de 10 mm et une épaisseur de 12 mm.
- **Défaut** : Longueur de 15mm, largeur de 4mm et une profondeur de 4mm.
- **Capteur à effet Hall** : une zone sensible de longueur de 8mm, largeur de 8 mm et une profondeur de 4mm.

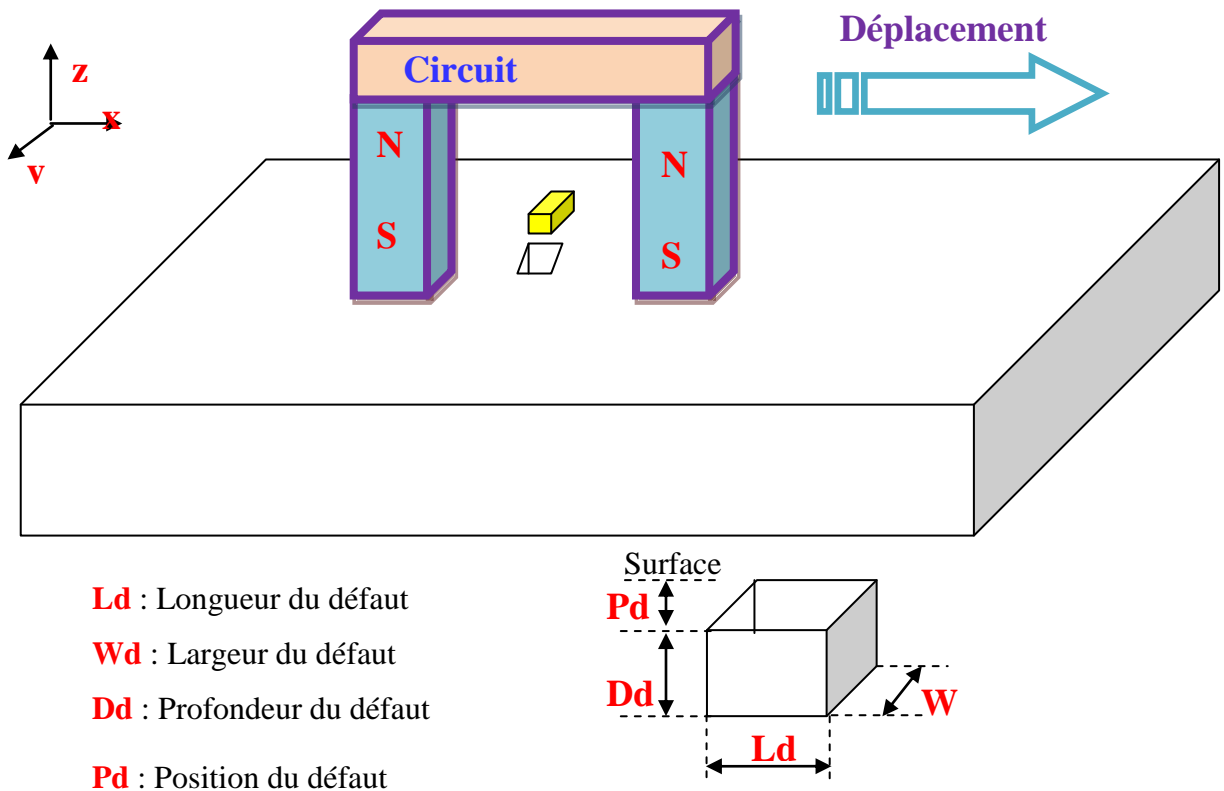


Figure III.2. Système de détection de défaut dans une plaque ferromagnétique en 3D

### III.4 Dessin de la géométrie tridimensionnelle

Le domaine d'étude est donné par la figure III.3.

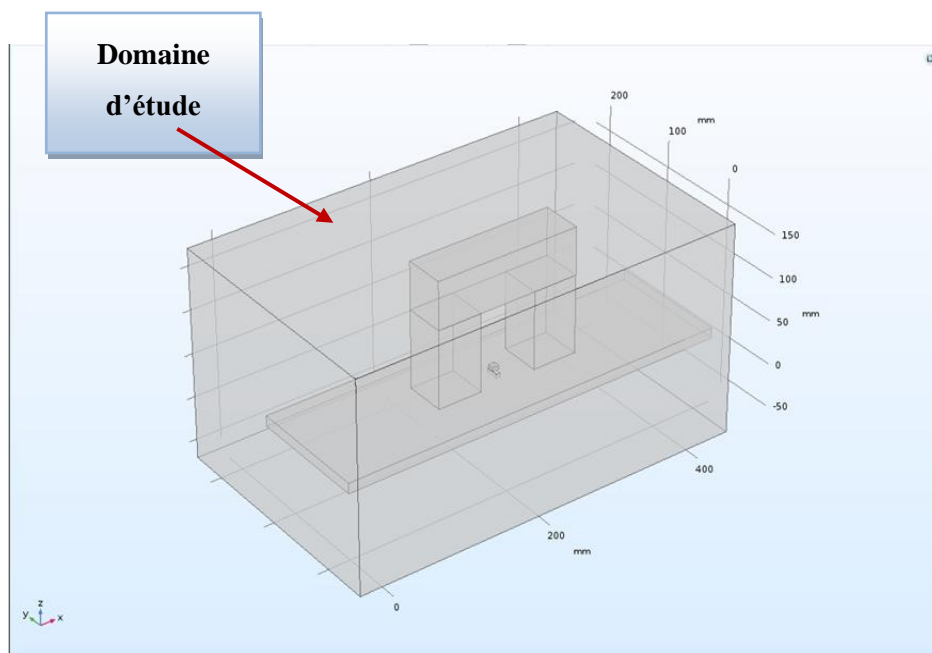


Figure III.3. Dessin de la géométrie tridimensionnelle.

### III.5 Vue 3D du modèle proposé

La représentation du système de contrôle par MFL sous COMSOL Multiphysics est proposée la figure suivante :

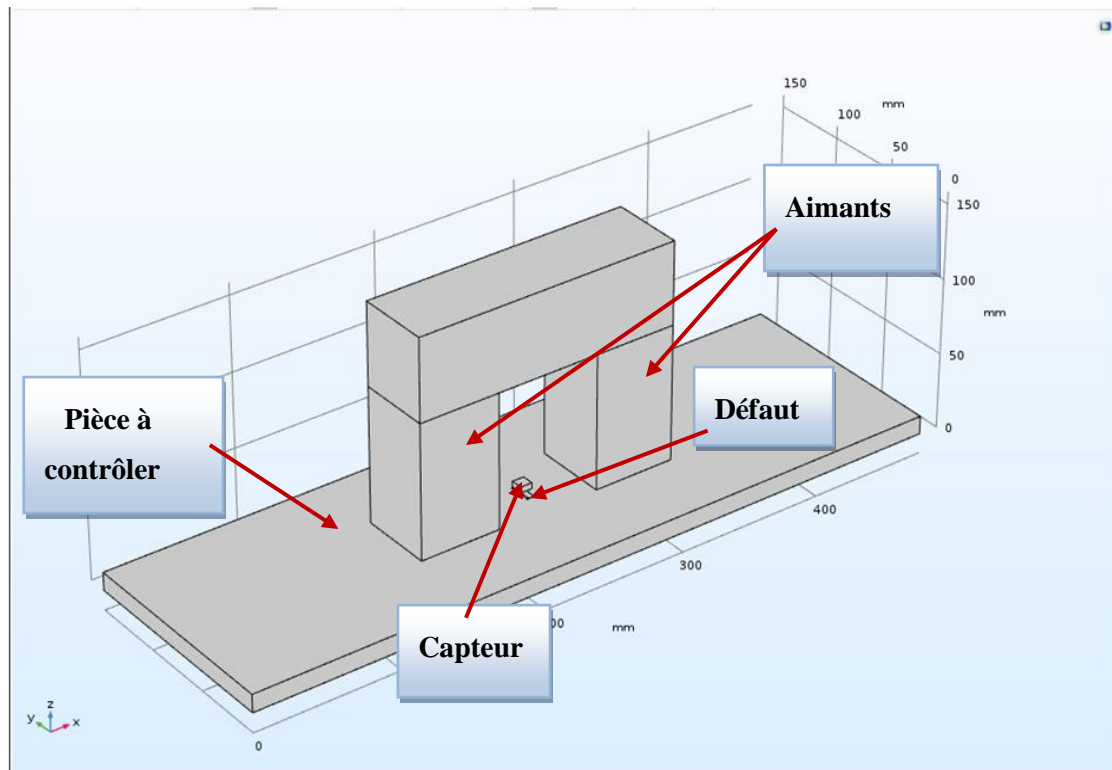


Figure III.4. Système de détection de défaut dans les bacs en 3D.

### III.6 Maillage du modèle proposé

Chaque volume constituant le domaine d'étude doit être discrétisé avec des éléments géométriques qui forment un maillage sur les nœuds desquels les grandeurs physiques vont être déterminées numériquement. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL Multiphysics. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Afin de décrire correctement les évolutions des grandeurs d'intérêt, il est nécessaire d'adapter la taille des mailles au problème que nous avons à résoudre. La difficulté de cette étape consiste à harmoniser les maillages entre les différents domaines afin d'optimiser le temps de calcul et la précision de la résolution. Comme le montre (Figure III.5), le maillage est très affiné au niveau de la plaque (Figure III.6), tandis qu'il est grossier dans le reste du domaine d'étude.

Le maillage complet est constitué de 93282 éléments de domaine, de 9196 éléments de frontière et de 674 éléments d'arête.

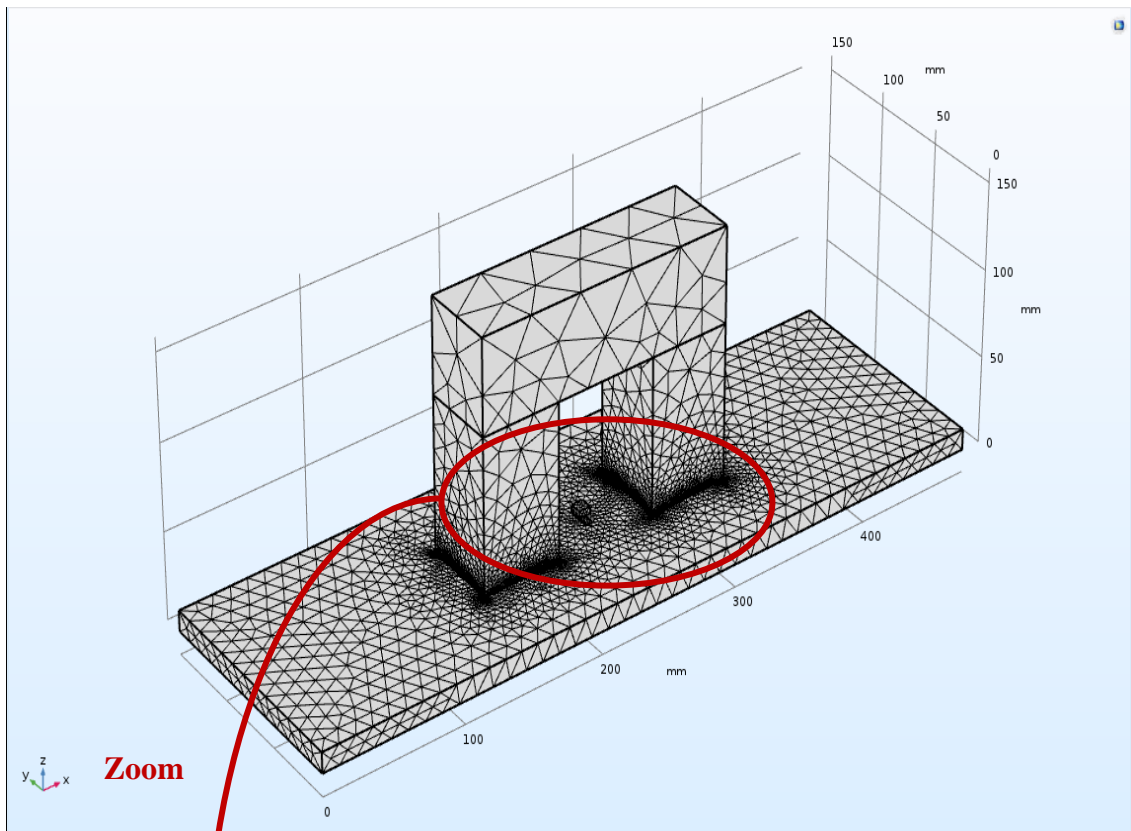


Figure III.5. Vue globale sans le domaine d'air.

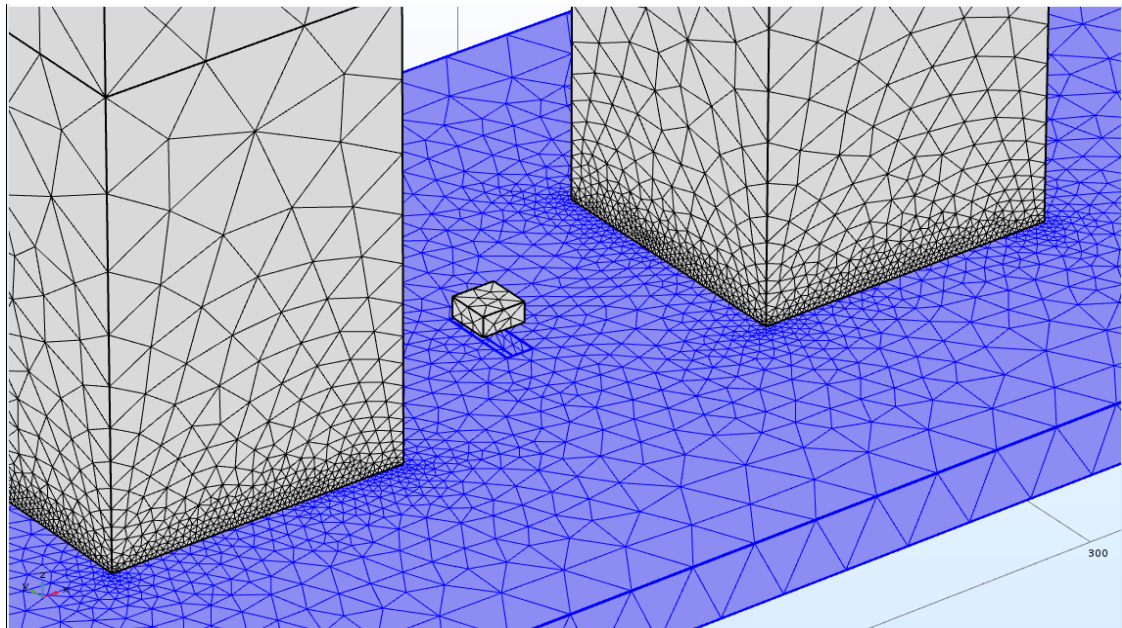


Figure III.6. Zoom sur la zone du défaut.

### III.7 Cartographie de la densité de flux magnétique dans la plaque

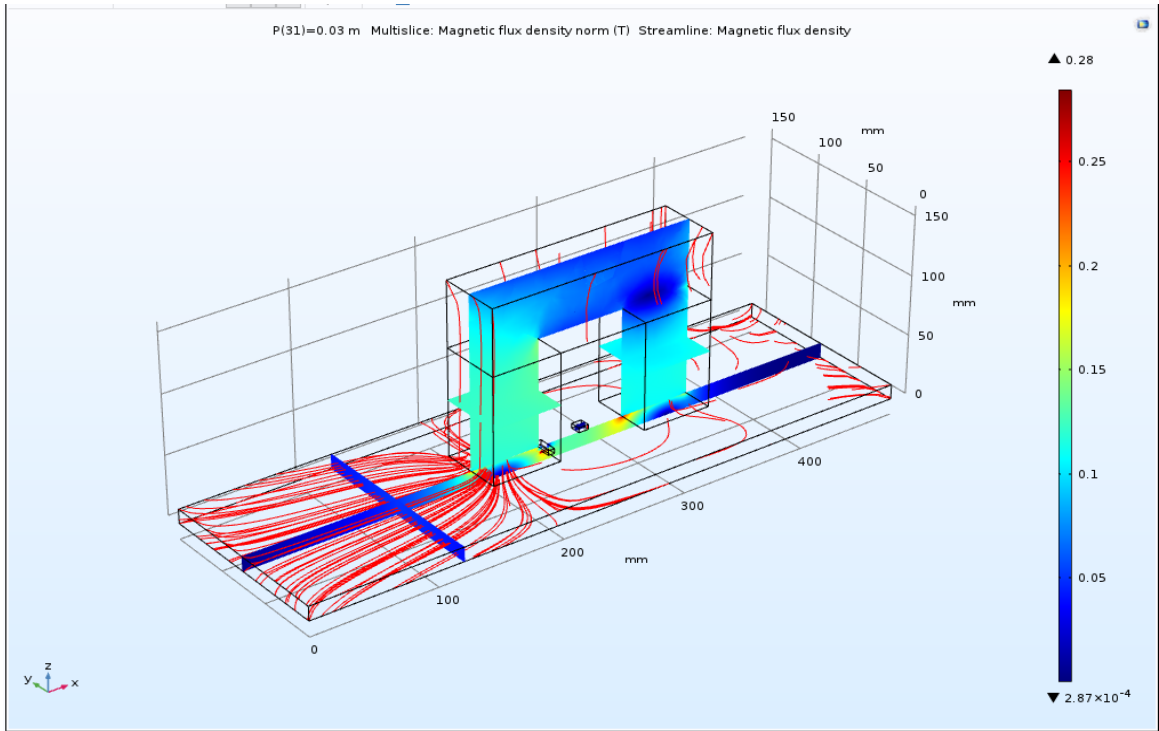


Figure III.7. Cartographie densité de flux magnétique sur la plaque au début de contrôle

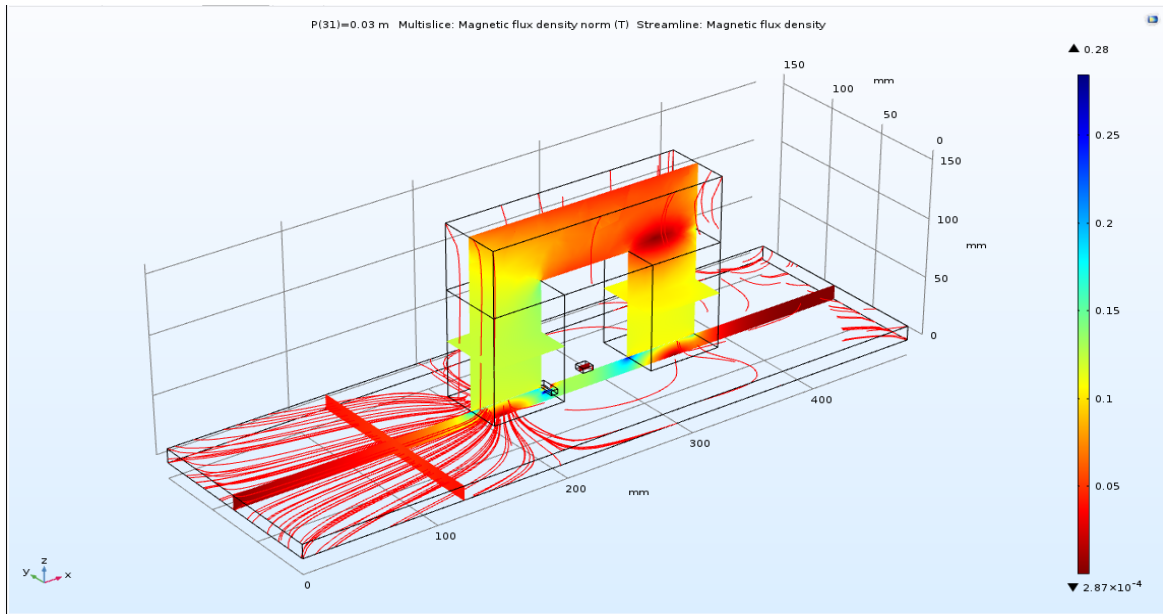


Figure III.8. Cartographie densité de flux magnétique sur la plaque à fin de contrôle.

### III.8 Effet de variation des paramètres du défaut sur les composantes du champ magnétique

Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous COMSOL-Multiphysics, nous procédons à l'étude de l'effet de la variation des paramètres d'un défaut parallélépipède sur la réponse du capteur à effet Hall.

#### III.8.1 Effet de la largeur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique

En étudiant l'effet de la longueur de défaut sur l'induction magnétique de fuite, nous fixons la Longueur de défaut à 15 mm et la profondeur à 4mm puis nous faisons varier la largeur de 4 mm à 7 mm.

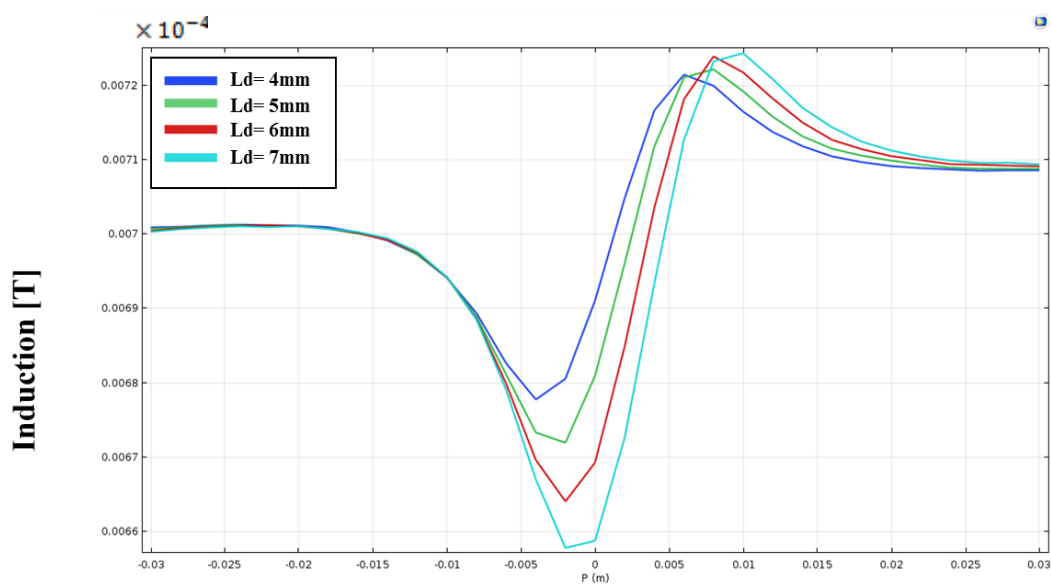


Figure III.9. Effet de la variation de la largeur du défaut sur l'induction magnétique.

A travers les résultats obtenus, nous remarquons que quand la largeur de défaut augmente, on aperçoit un écartement du signal tout en gardant l'amplitude constante. Cela peut être justifié par le fait que le flux de fuite est aperçu dans la zone affectée. Donc, plus cette zone est longue plus le signal du capteur des champs écarte.

#### III.8.2 Effet de la longueur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique

Pour étudier l'effet de la longueur du défaut sur la composante de l'induction magnétique de fuite, nous fixons la profondeur du défaut à 4 mm et de largeur de défaut à 15 mm puis nous faisons varier la longueur de 9 mm à 15 mm.

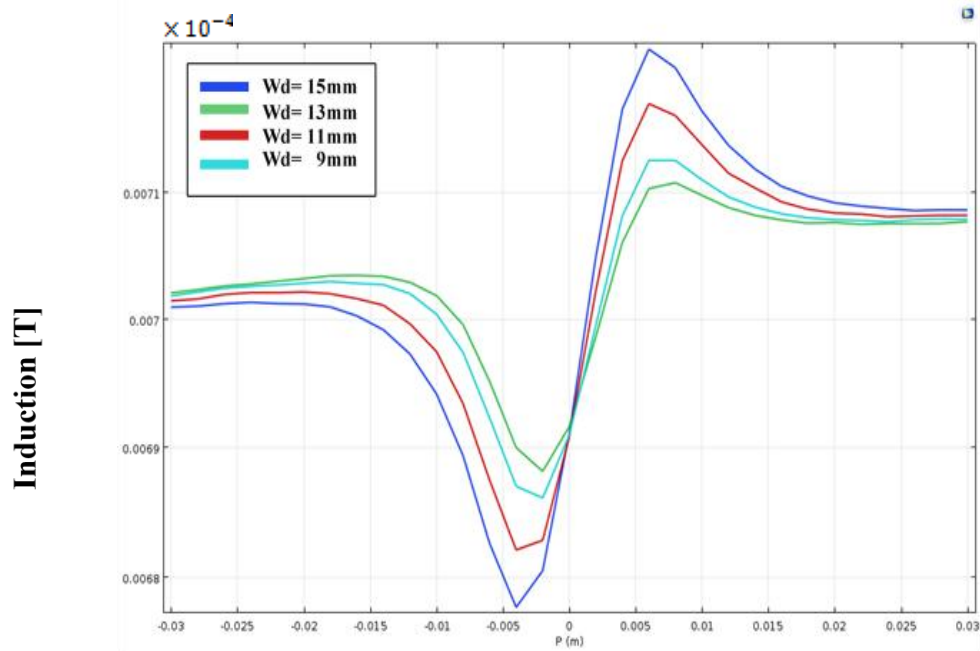


Figure III.10. Effet de la variation de la longueur du défaut sur l'induction magnétique.

### III.8.3 Effet de la profondeur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique

Après avoir étudié l'effet de la largeur du défaut sur le signal du capteur, nous procédons à l'étude de l'effet de la profondeur  $D_d$ . Pour ce faire, nous fixons la largeur  $W_d = 4$  mm et nous faisons varier la profondeur  $D_d$  de 1 mm à 4 mm. Les résultats sont représentés sur la figure III.11.

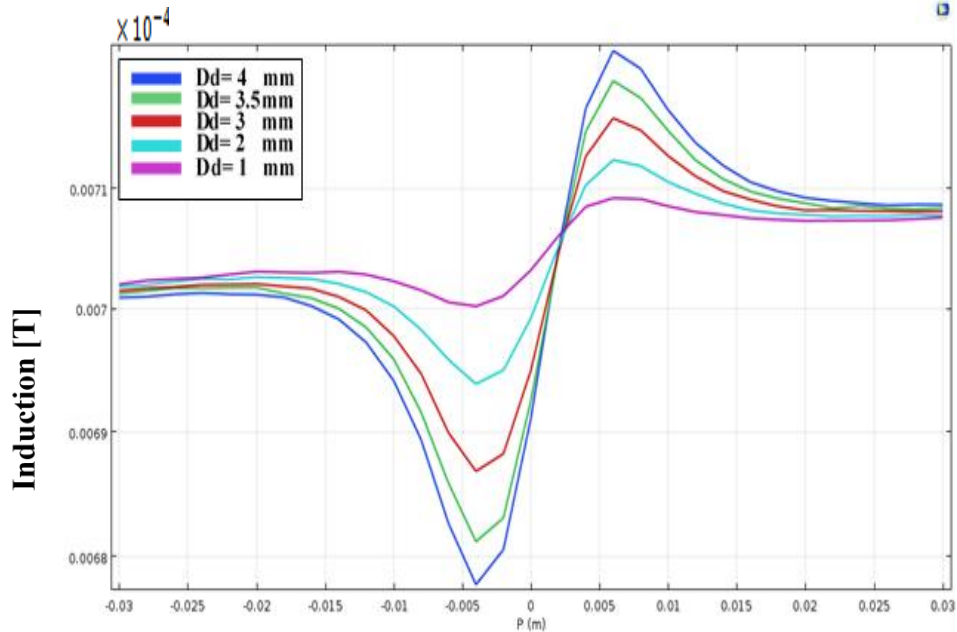


Figure III.11. Effet de la variation de la profondeur du défaut sur l'induction magnétique.

A travers les résultats obtenus, on remarque que l'amplitude du signal diminue lorsque la profondeur varie de 4mm à 1mm. En effet, le champ magnétique de fuite généré par la présence du défaut déminée lorsque la profondeur de ce dernier diminue.

#### III.8.4 Effet du Lift-off sur les composantes de l'induction magnétique

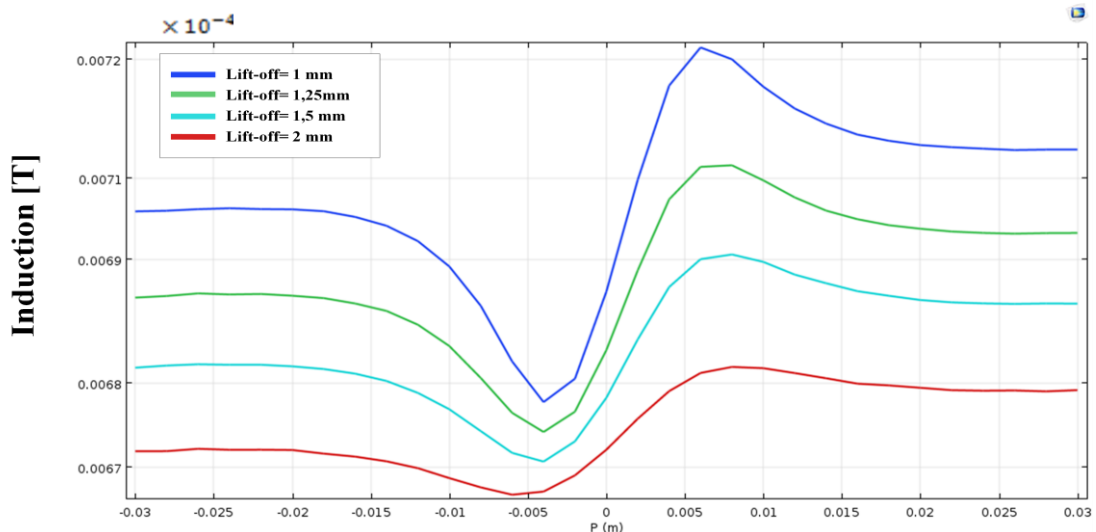


Figure III.12. Effet de la variation du lift-off sur l'induction magnétique.

Comme c'est un fait évident, plus le lift-off augmente le capteur devient moins sensible et l'amplitude du signal diminue lorsque le lift-off passe de 1 mm à 2 mm.

### III.9 Vue 3D du modèle proposé à défaut sous cutané

La vue 3D du système à modéliser sous COMSOL Multiphysics est illustrée sur la figure III.13.

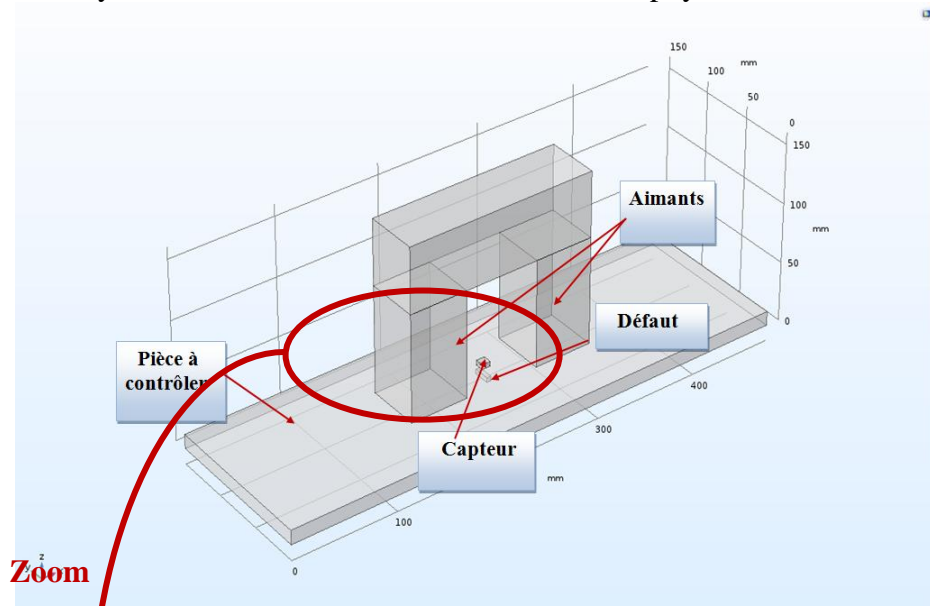


Figure III.13. Système de détection de défaut sous cutané en 3D.

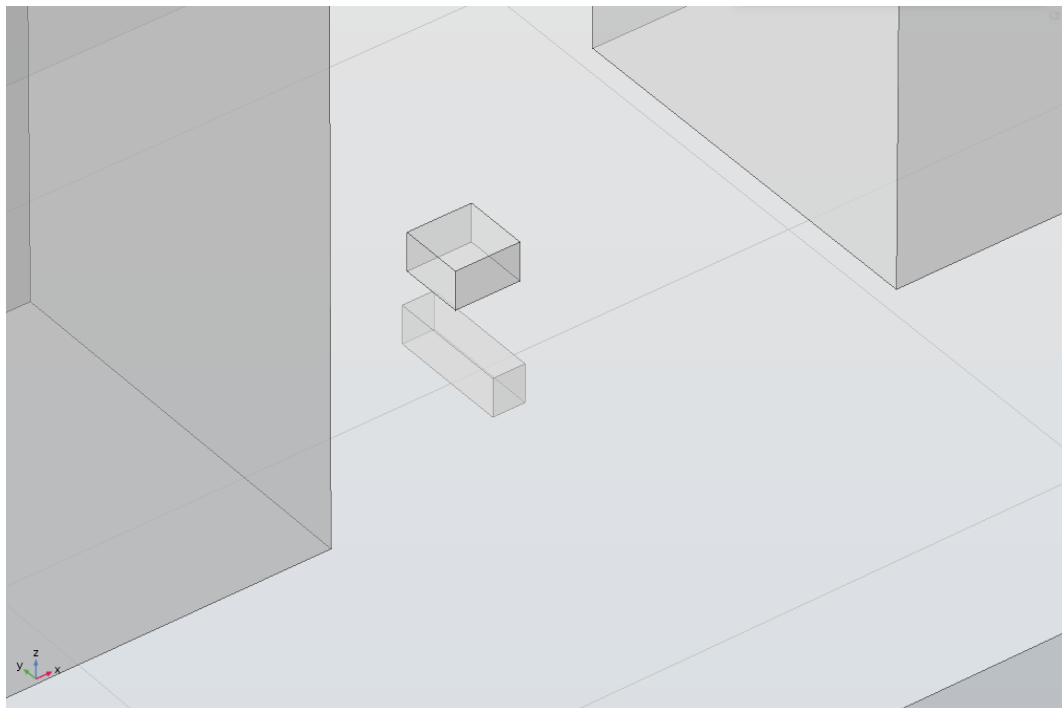


Figure III.14. Zoom sur la zone du défaut sous cutané.

### III.10 Maillage du modèle à défaut sous cutané

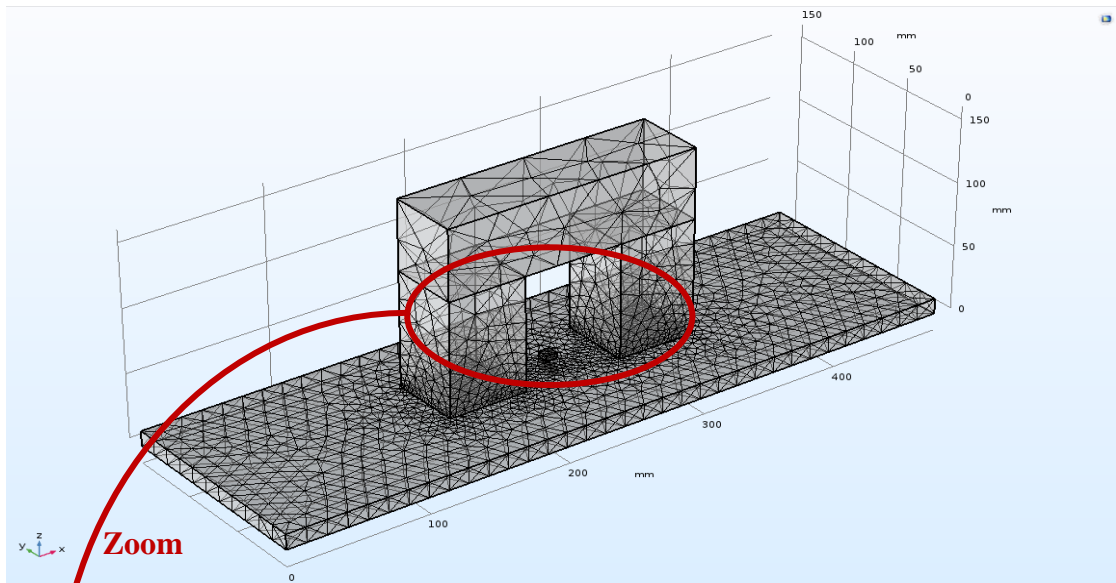


Figure III.15. Vue globale avec le maillage sans le domaine d'air à défaut sous cutané.

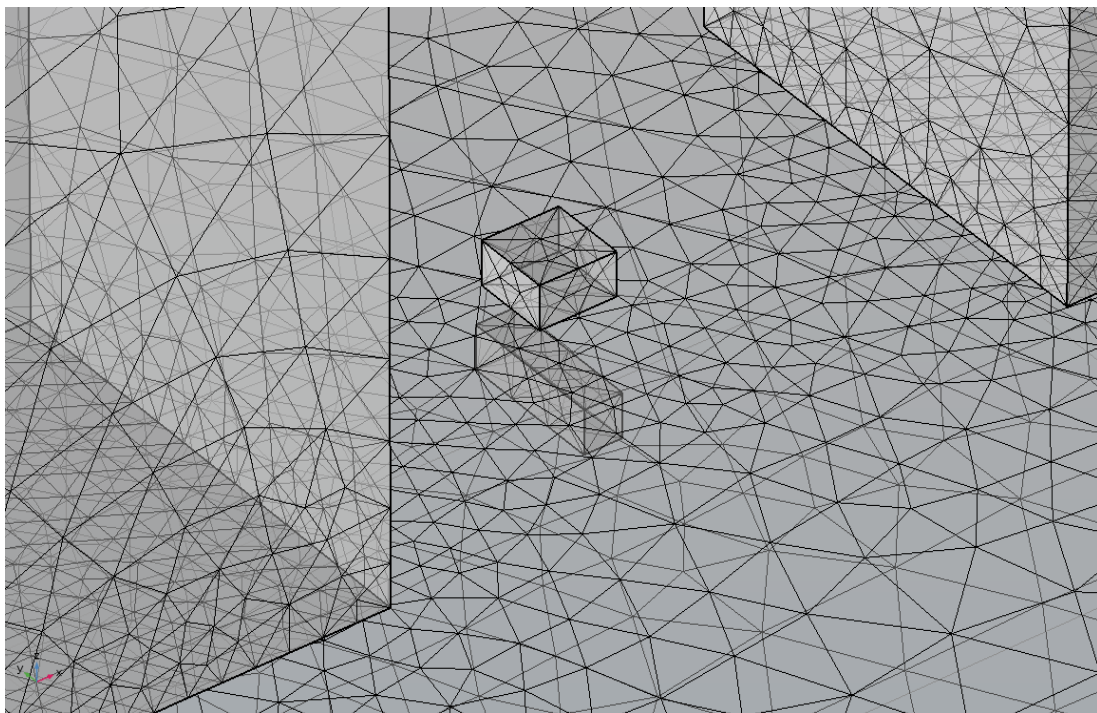


Figure III.16. Zoom sur la zone du défaut sous cutané.

### III.11 Effet de variation des positions du défaut sous cutané sur les composantes du champ magnétique

Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous COMSOL-Multiphysics, nous procédons à l'étude de l'effet de la variation des positions du défaut sous cutané parallélépipède sur la réponse du capteur à effet Hall

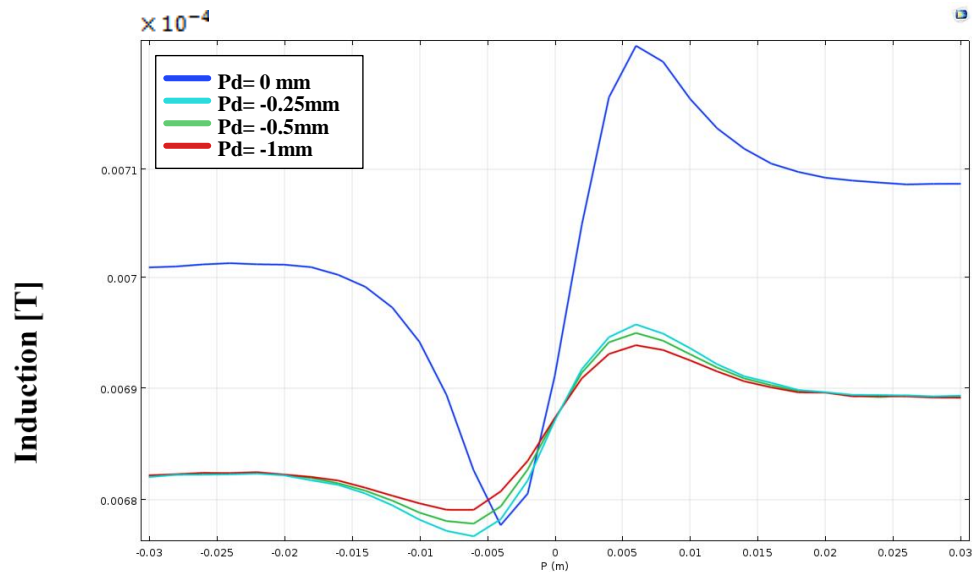


Figure III.17.Effet de la variation des positions du défaut sous cutané sur l'induction

on constat que malgré la position du défaut est sous jacent à la surface de la pièce , la signature du signal du défaut est lisible , plus en descend plus le signal devient faible d'amplitude , chose qui très logique car les ligne de champs en tendance à circulé dans la région la plus proche de la surface de pièce.

### III.12 Conclusion

*Dans ce chapitre nous avons réussi à simuler le comportement d'un système de détection de défaut par MFL dont la configuration est tridimensionnelle. Les résultats ont montré le lien entre le signal détecté et la forme et la position du défaut. En résumé :*

*Quand la profondeur et la largeur de défaut augmente l'amplitude du champ de fuite augmente*

*Quand la longueur du défaut augmente le signal s'écarte tout en gardant la même amplitude maximale*

*Quand le Lift-off augmente le capteur devient moins sensible*

*Enfin, le défaut est détecté avec moins de précision lorsqu'il s'éloigne de la surface.*

# Chapitre IV

## **Application des réseaux de neurones au système de CND-MFL**

# Chapitre IV. Application des réseaux de neurones au système de CND-MFL

## IV.1 Introduction

*Les réseaux de neurones artificiels, nés il y a environ une cinquantaine d'années, sont toujours en cours de développement. Cet axe de recherche a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs de différentes disciplines. Ces réseaux de neurones artificiels sont issus de la combinaison entre la neurobiologie comme idée de base, la physique comme champs d'application et les mathématiques et l'informatique autant que moyens de réalisation.*

*Les réseaux de neurones artificiels sont des ensembles de neurones formels associés en couches et fonctionnant en parallèle. Chaque neurone (processeur) élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches intermédiaires (dites couches cachées). Les réseaux de neurones ont la capacité de stocker l'information dans les poids synaptiques, obtenus par des processus d'adaptation ou d'apprentissage et de la rendre disponible à l'usage, [24].*

## IV.2 Neurone biologique

Le neurone biologique est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. 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. Ces axones 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 (Figure IV.1).

La structure d'un neurone se compose de trois parties:

- La soma (corps cellulaire): ou cellule d'activité nerveuse, au centre du neurone.
- L'axone : attaché au soma qui est électriquement actif, ce dernier conduit l'impulsion conduite par le neurone.
- Dendrites: électriquement passives, elles reçoivent les impulsions d'autres neurones. [25].

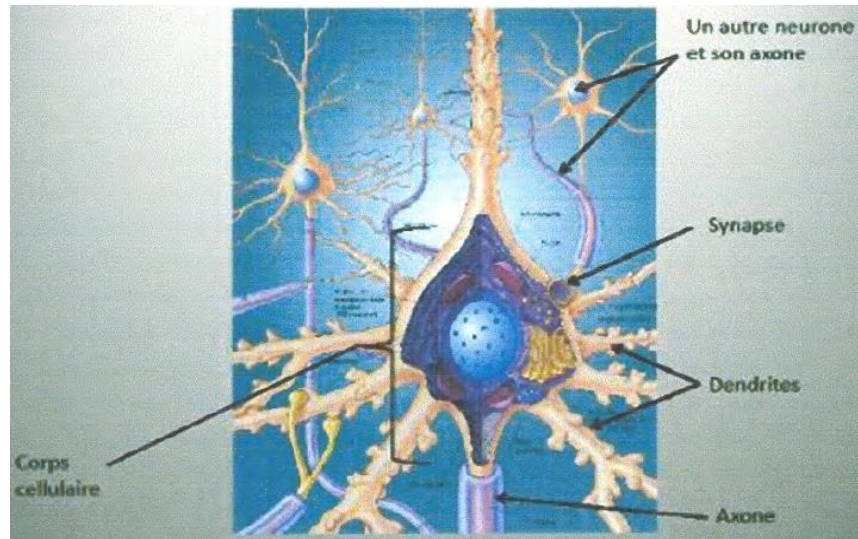


Figure IV.1. Représentation d'un neurone biologique et ses composants

### IV.3 Neurone artificiel

Un neurone artificiel est un modèle simplifié de neurone biologique, ce modèle imite quelques fonctions du neurone biologique, comme la mémorisation associative, l'apprentissage et le travail en parallèle [24].

Par analogie avec la biologie, un neurone artificiel (Figure IV.2), reçoit l'information provenant des entrées  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) par l'intermédiaire des connexions dont on affecte à chacune d'elles un poids  $w$  abréviations de weight (poids en anglais) pondérant l'information, et aussi représentatif de la force de la connexion.

Le neurone artificiel fonctionne en deux étapes :

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

$$V_j = b_j + \sum_{i=0}^n W_{j,i} X_i \quad (\text{IV.1})$$

Où

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

$b_i$  : terme constant appelé biais, il est considéré comme le poids d'une entrée  $x_0$  égal à 1. Ainsi la relation (IV.1) s'écrit plus simplement :

$$V_j = \sum_{i=0}^n W_{j,i} X_i \quad (\text{IV.2})$$

Dans la deuxième phase, une fonction de transfert  $g$  appelée également fonction d'activation, calcule la valeur de l'état interne  $O_j$  du neurone  $j$  à partir de la valeur du potentiel  $V$ . Cette valeur désignera la sortie du neurone :

$$O_j = (V_j) = g(\sum_{i=0}^n W_{ij} X_i + b_i) \quad (\text{IV.3})$$

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

$$O_j = (X_i, W_{j,i} + b) = gW_{j,i}(X_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (\text{IV.4})$$

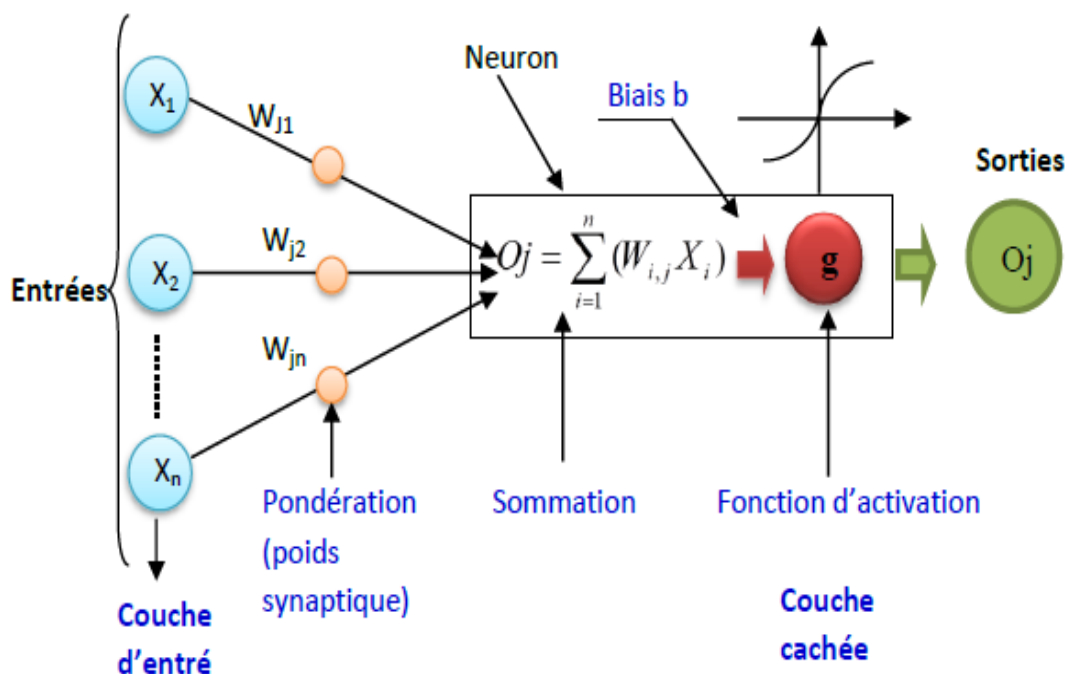


Figure IV.2. Géométrie du neurone artificiel.

## IV.4 Différents types de réseaux

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, nous citons principalement, [27].

### IV.4.1 Réseaux à une seule couche

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par des poids modifiables (Figure IV.3).

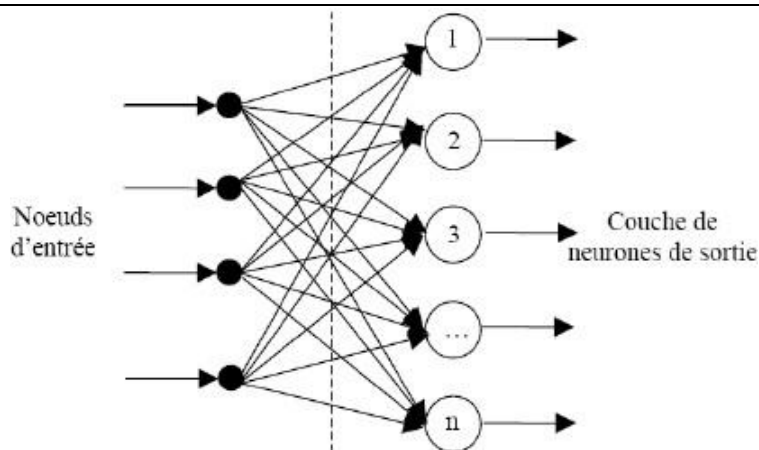


Figure IV.3. Réseau à une seule couche.

#### IV.4.2 Réseaux Multicouches

Les problèmes rencontrés avec les réseaux à couche unique, ont poussé les chercheurs à développer d'autres réseaux, à savoir le réseau de Kohonen en 1981, le réseau d'Hopfield 1982 et le perceptron multicouches. Ce dernier avait un problème majeur qui été l'impossibilité de faire l'apprentissage des couches cachées jusqu'à 1985 avec l'introduction de l'algorithme de rétro-propagation, [26].

##### a- Réseau de Kohonen

Les réseaux de type auto organisateur (auto adaptative) de Kohonen, appelé aussi SOM « Self Organised Maps » sont des réseaux compétitifs et dynamiques, dans le sens où ils ont tendance à élire un neurone vainqueur et à le favoriser, d'une part, et à créer ou détruire des neurones, d'autre part. Le processus, l'apprentissage n'est donc plus supervisé on parle d'apprentissage non supervisé ou bien compétitif.

##### b- Réseau d'Hopfield

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

L'application principale des réseaux de Hopfield est l'entrepôt de connaissances mais aussi la résolution de problèmes d'optimisation. Le mode d'apprentissage utilisé ici est le mode non supervisé [24].

##### c- Perceptron Multi Couches

Le perceptron Multi Couches PMC ou MLP (Multi Layer Perceptron) en anglais est une extension du perceptron monocouche, avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie. L'idée principale est de grouper des neurones dans une couche. En place ensuite bout à bout plusieurs couches et on connecte complètement les neurones de deux couches adjacentes (Figure IV.4). Les entrées des neurones de la deuxième couche sont donc en fait les sorties des neurones de la première couche. Les neurones de la première couche sont reliés

au monde extérieur et reçoivent tous le même vecteur d'entrée. Ils calculent alors leur sorties qui sont transmises aux neurones de la deuxième couche, etc. Les sorties des neurones de la dernière couche forment la sortie du réseau.

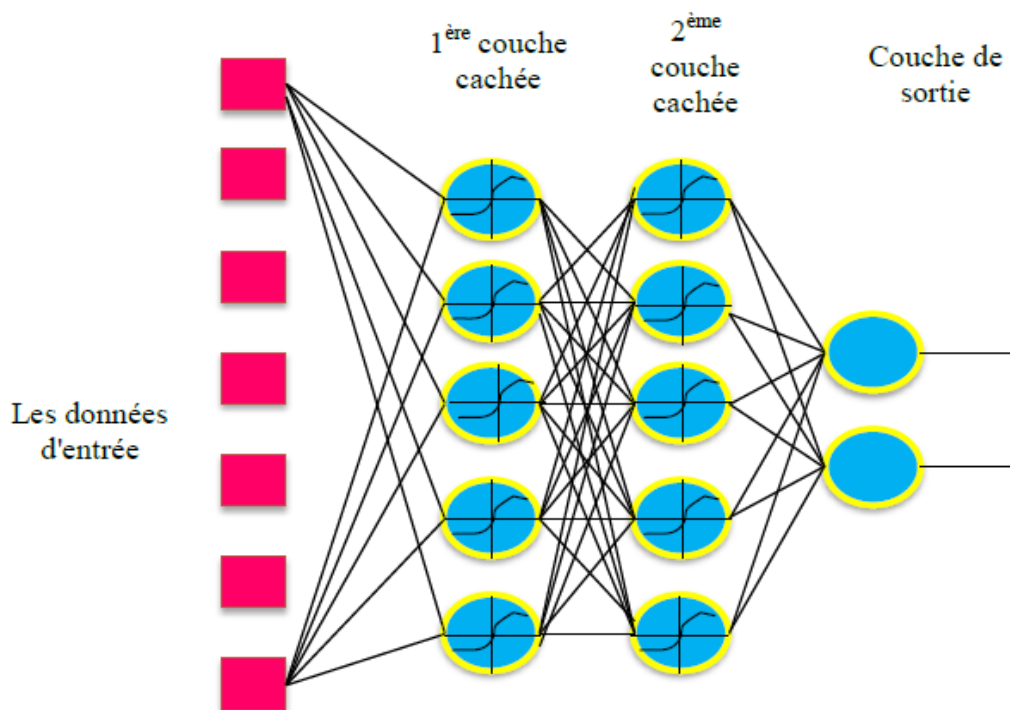


Figure IV.4. Architecture du perceptron multicouche

Une fois l'architecture du réseau est définie (nombre de couches, de neurones par couche, leur inter connectivité), le réseau passe par une phase d'apprentissage. Pour cela, il utilise un nombre suffisamment conséquent de paires entrée/cible, appelée base d'apprentissage.

Son fonctionnement, est basé sur un apprentissage supervisé, c'est-à-dire qu'à chaque nouvelle entrée, le réseau modifie les poids et les biais de façon à ajuster toutes les sorties (valeurs calculées) aux cibles (valeurs des données) et à minimiser les écarts quadratiques entre ces valeurs de sortie simulées et ces valeurs cibles.

L'efficacité de l'apprentissage dépend, en effet, d'un grand nombre de paramètres que doit fixer l'utilisateur: le pas du gradient, l'architecture du réseau, le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, l'initialisation des poids...etc , [27].

## IV.5 Fonctions d'activation

La fonction d'activation définit le potentiel de sortie d'un neurone en termes de niveaux d'activité de ses entrées. Il existe plusieurs fonctions d'activations (Figure IV.5), les plus utilisées sont :

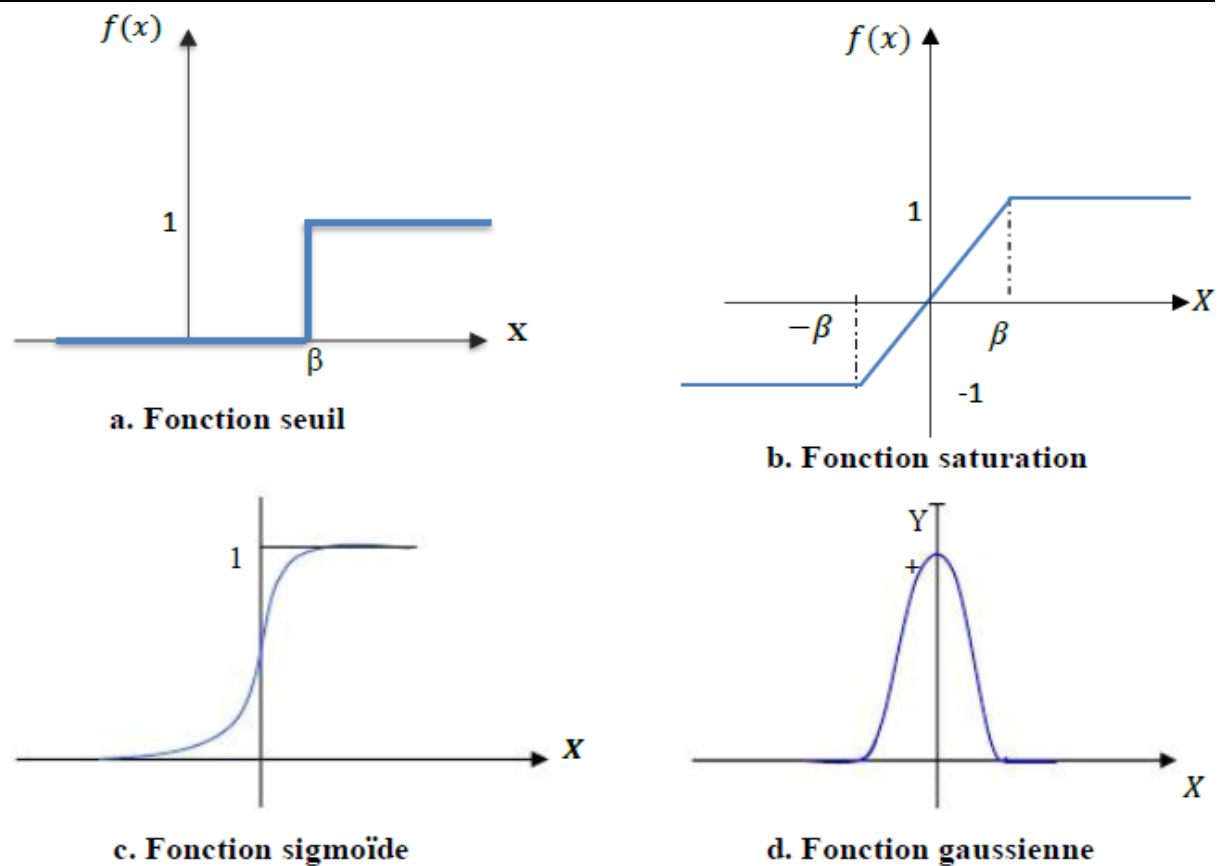


Figure IV.5. Différents types des fonctions d'activation.

## IV.6 Composition d'un réseau de neurones

Un RNA 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 donc déterminée directement par le nombre de variables d'entrée.

♦ **Une couche de sortie** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche-là qui fournit les résultats du problème.

♦ **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau.

En général, les fonctions d'activations sont non linéaires sur ces couches.

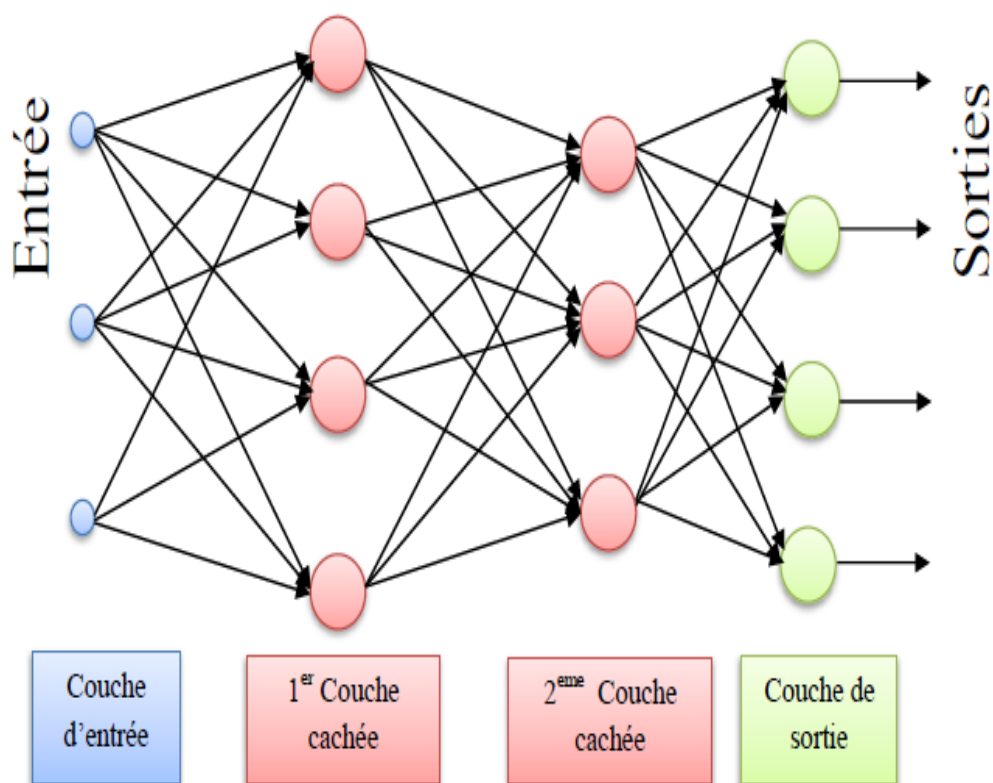


Figure IV.6. Architecture d'un réseau de neurones

## IV.7 Choix de la configuration du réseau de neurones

### IV.7.1 Le choix du type de réseau de neurones

Comme nous l'avons mentionné dans la partie descriptive, on distingue plusieurs types de RNA. Pour notre étude nous avons opté pour le Perceptron Multicouche (PMC). En effet les techniques à base de PMC ont démontré ces dernières années leur efficacité en termes d'erreurs de corrélation.

Au cours de notre étude, nous nous servons d'un PMC contenant seulement une seule couche cachée ayant des neurones à fonction d'activation type tangente sigmoïde et une couche de sortie contenant un seul neurone à fonction d'activation linéaire.

### IV.7.2 Le choix de la stratégie d'apprentissage

L'apprentissage est un aspect très important des RN, ainsi l'apprentissage supervisé a été choisi dans notre cas. Notons que dans l'apprentissage, les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (variation des pas et largeur, longueur et le profondeur du défaut). À partir de ce principe, le réseau doit alors s'accommoder en calculant ses poids dans le but que sa sortie (densité  $D_{\text{estimée}}$ ) corresponde bien à la consigne (densité  $D_d$  de la base de données). Nous avons choisi également le mode 'batch training' qui veut dire par paquets.

De cette manière, les poids synaptiques ne seront ajustés qu'après présentation de tous les exemples de la base d'apprentissage.

Actuellement plusieurs algorithmes d'apprentissage sont développés. En ce qui concerne notre méthode, l'algorithme de Levenberg-Marquardt a été choisi qui une méthode du second ordre, car cet algorithme converge plus rapidement en comparaison aux méthodes du premier ordre dans le cas des RN à apprentissage par paquets.

### **IV.7.3 Elaboration de la base de données pour l'apprentissage**

L'élaboration de la base de données est une étape importante qui précède l'étape de la construction et l'optimisation des RN.

La base de données qu'on a utilisée pour l'apprentissage a été construite à partir des résultats de la simulation par EF-3D. En effet, elle est constituée de 300 couples (entrées, sorties), dont les entrées sont les variations de : pas, profondeur et largeur, longueur et Lift-off du capteur obtenues pour ... valeurs de la densité présentant la sortie. Nous tenons à signaler que de plus le nombre d'éléments dans un intervalle de recherche est important, de plus le réseau est plus performant. Cependant, le temps qui sera pris par procédure d'apprentissage devient important.

## **IV.8 Application et exploitation des réseaux de neurones**

### **IV.8.1 Construction de la base de données**

Comme nous l'avons signalé dans les sections précédentes, pour construire la base de données nous reprenons la configuration traitée dans le chapitre III.

Pas [mm]	Profondeur [m]	largeur [m]	langueur [m]	Lift-off [m]	Variation de densité [T]
-0.030	0	0	0	0.001	0.007009391
-0.028	0	0	0	0.001	0.007010209
-0.026	0	0	0	0.001	0.007012120
-0.024	0	0	0	0.001	0.007013229
-0.022	0	0	0	0.001	0.007012242
-0.002	0.004	0.004	0.015	0.001	0.006805499
0	0.004	0.004	0.015	0.001	0.006910901
0.002	0.004	0.004	0.015	0.001	0.007048724
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
0.006	0	0	0	0.001	0.007123386
0.008	0	0	0	0.001	0.007118363
0.010	0	0	0	0.001	0.007105090
0.012	0	0	0	0.001	0.007095255

Tableau IV.1. Base de données

Après avoir construit la base de données, nous procédons à la programmation du réseau de neurones décrit précédemment sous Matlab. Car ce dernier possède des fonctions prédéfinies facile à programmer.

#### IV.8.2 La programmation du réseau de neurones sous Matlab (M\_file)

Elle est déclarée comme suivants :

---

```

net.trainParam.epochs =2000; % Nombre maximum d'itérations
%net.trainParam.goal = 1e-3; % Tolérance d'erreur; critère d'arrêt
%net.trainParam.mu=0.00001; %trainbr
%net.trainParam.mc=0.9 ; % moment
net.trainParam.min_grad=1e-10 ; % Gradient de performance minimum

%%%%%%%%%%%%Réseau de
train%%%%%%%%%%%%
net = train(net,X,Y);% Itère le type de boucle en dégradé
% Simulez la qualité d'un résultat obtenu: L'entrée est le même vecteur d'entrée P..
% La sortie est la sortie du réseau de neurones, qui doit être comparée aux données de sortie.
output = sim(net,X);
fprintf('Execution time: %4.1f seconds\n',cputime - st);
temps=cputime-st
W1=net.IW{1,1}; %poids de la premiere couche
w1=size(W1);
W2=net.LW{2,1}; %poids de la deuxi?me couche
w2=size(W2);
B1=net.b{1}; %les bias de la premi?re couche
b1=size(B1);
B2=net.b{2}; %les bias de la premi?re couche
b2=size(B2);
figure (1),
plot(output)
hold on
plot(Y,'r')

output2 = sim(net,Xt');
figure (2),

plot(output2)
hold on
plot(Yt,'r')

```

### IV.8.3 Apprentissage

Dans cette étape, nous exploitons la table de données établie pour construire une configuration optimale du RN. Celle-ci peut être obtenue après un processus itératif qui consiste à modifier les poids et les biais tant que l'EQM n'a pas atteint le minimum imposé et le nombre d'itération (epoch) est inférieur à la consigne.

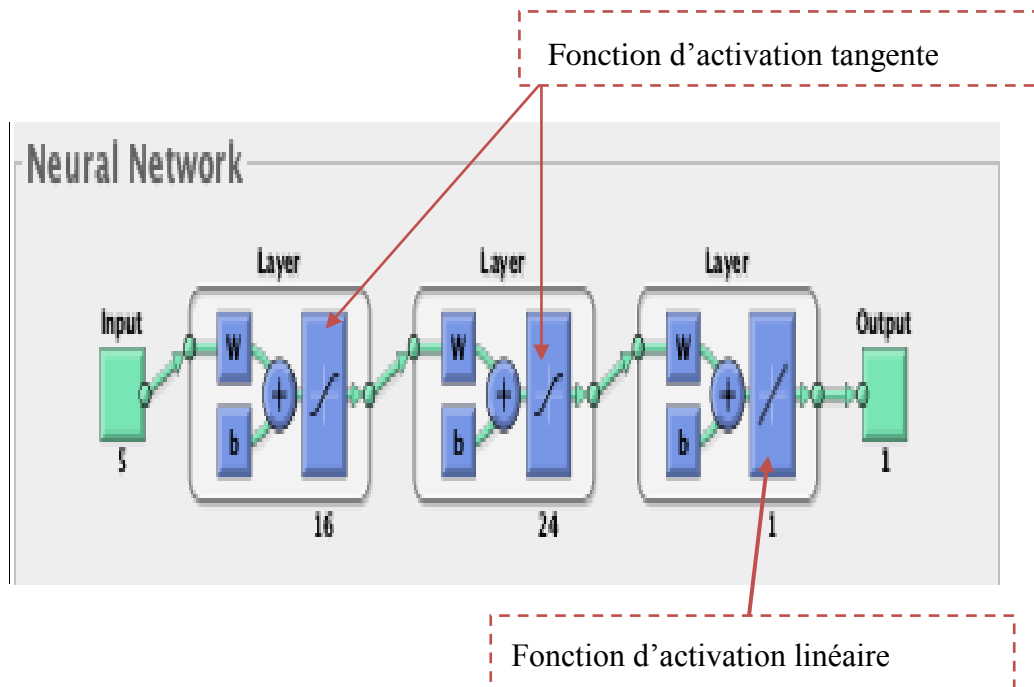


Figure IV.7. Architecture du réseau de neurones utilisé.

Il est à noter qu'à l'heure actuelle, il n'y a pas de règle rigoureuse concernant le choix du nombre de neurones. Mais, la meilleure manière est apparue d'augmenter le nombre de neurones jusqu'à ce que la performance souhaitée est atteinte.

Les critères d'arrêt de l'apprentissage que nous avons imposé sont les suivantes :

- epochs = 2000.
- goal =  $4.81e-10$ .

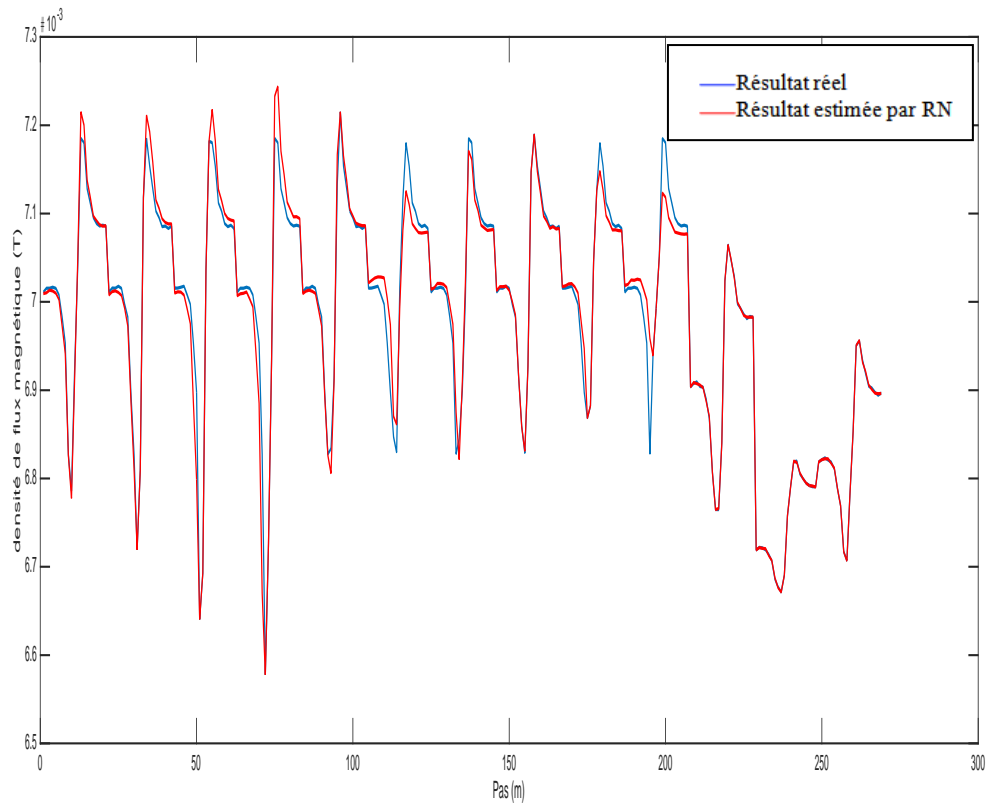


Figure IV.8. Evolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction des itérations (Epoch)

En se référant aux résultats montrés sur cette figure, on peut confirmer qu'il y a une très bonne corrélation entre ces valeurs.

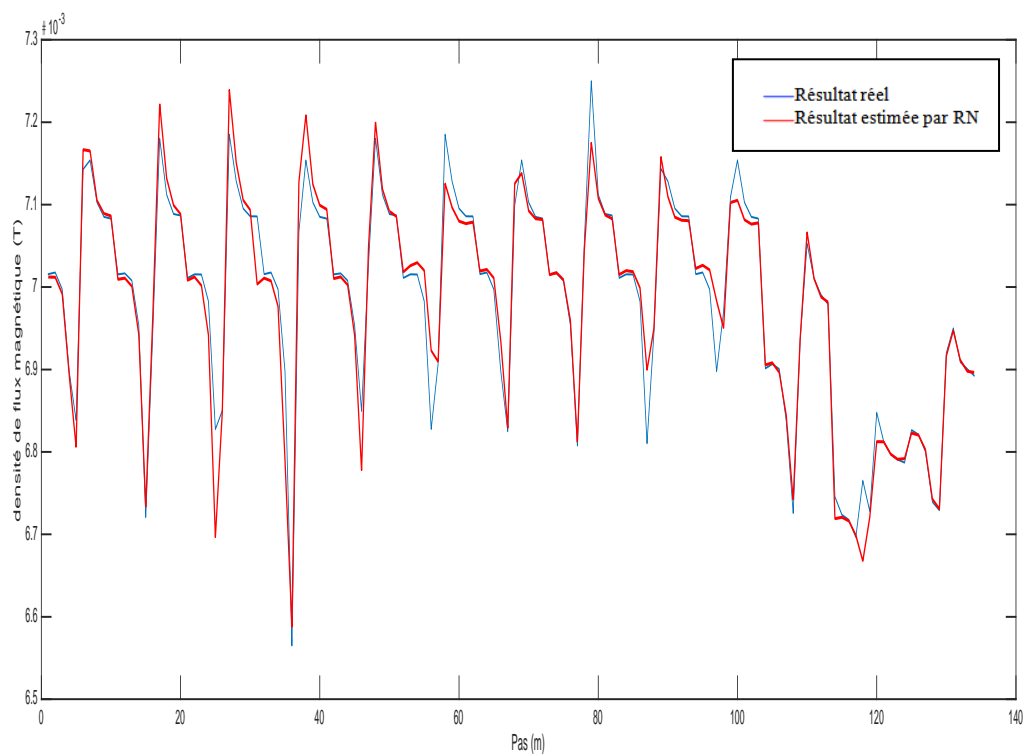
#### IV.8.4 Test du réseau de neurones

Après l'étape de l'apprentissage, nous procédons au test de robustesse du RN optimisé sur un échantillon.

Pas [mm]	Profondeur [m]	largeur [m]	longueur [m]	Lift-off [m]	Variation de densité [T]
0.014	0	0	0	0.001	0.007087179
0.016	0	0	0	0.001	0.007081559
-0.026	0	0	0	0.001	0.007078982
0.028	0	0	0	0.001	0.007077869
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
0.026	0	0	0	0.004	0.006895961
0.028	0	0	0	0.004	0.006896461
0.030	0	0	0	0.004	0.006896284

Tableau IV.2 Échantillon pour le test.

Pour ce faire, nous injectons le vecteur  $[\Delta Z]$  à l'entrée du RNA appreni et nous comparons les valeurs estimées et celles utilisées pour le test (figure IV.9).



**Figure IV.9. Evaluation de la densité en fonction du pas pour différents profonds, largeurs, longueurs et Lift-off.**

A travers cette figure, nous constatons que les valeurs obtenues par le RN optimisé suivent largement les valeurs de références (Test). En effet, cela justifie la fiabilité et la robustesse de la configuration du RNA choisi.

## IV.9 Conclusion

*Dans ce chapitre, l'objectif était de reconstituer la forme géométrique d'un défaut surfacique de forme parallélépipède à partir des signaux mesurés au niveau du capteur, cela a pu être accompli en construisant un réseau de neurones fiable de type PMC.*

*Pour récapituler, l'inversion par réseau de neurones passe par plusieurs étapes à savoir :*

- *La construction d'une base de données bien élaborée.*
- *Faire un choix judicieux des paramètres de configuration des RNA.*
- *Apprentissage et test.*

*Dans ce travail, nous avons suivi soigneusement les étapes précédentes ce qui nous a permis de développer un outil résolution par la méthode directe dont les performances sont démontrées par les tests de robustesse. En effet, pour rendre cette méthode plus générale, d'autres paramètres caractéristiques du défaut doivent être inclus. D'autre part, un signal obtenu par un balayage complet doit substituer celui obtenu pour une position du capteur.*

# Conclusion générale

## Conclusion générale

*Le contrôle par flux de fuite magnétique (Magnetic Flux Leakage) est une technique rapide adaptée au contrôle de pipe-lines et de réservoir de stockage en matériaux ferromagnétiques. Dans ce mémoire après avoir donné, en chapitre I, les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, le contrôle par flux de fuite magnétique, les ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, le contrôle par courants de Foucault.*

*Dans le chapitre II nous avons présenté un aperçu général sur la technique d'inspection par MFL à savoir le principe de fonctionnement, les différents capteurs ainsi que ses avantages et inconvénients nous avons procédé à la modélisation et la simulation de deux type de configuration qui ont fait l'objet du chapitre deux et trois, Par conséquent, à travers les études accomplies, diverses conclusions utiles ont été tirées.*

*Dans le chapitre III nous avons réussi à simuler le comportement d'un système de détection de défaut de plaque ferromagnétique, dont la configuration est tridimensionnelle, par MFL.*

*En effet, les résultats de l'étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut sur la signature du capteur ont montré ce qui suit :*

- ✚ Quand la profondeur et la largeur de défaut augmente l'amplitude de champ de fuite augmente.*
- ✚ Quand la longueur du défaut augmente le signal s'écarte tout en gardant la même amplitude maximale.*
- ✚ Quand le Lift-off augmente le capteur devient moins sensible.*

*Dans le chapitre IV Pour mener à bien la procédure de résolution par RN, nous avons construit une base de données constitué des profondeurs de défauts et les variations de l'impédance qui leurs correspondent à partir du code EF-3D développé. Ensuite, la base de données obtenue est exploitée pour l'apprentissage du RN en modifiant les paramètres tels que le nombre de neurones, poids et biais jusqu'à ce que la sortie est atteinte.*

*Positivement, le test de robustesse sur un échantillon appartenant à l'intervalle de recherche a montrer la performance et l'applicabilité de cette technique pour la méthode directe pour un CND-MFL.*

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographique

- [1] **Abdelhak ABDYOU**, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Etude et Réalisation d'un Capteur Inductif», Mémoire de Magistère en Électrotechnique, Batna 2006.
- [2] **EMNA AMIRA FNAIECH** , « développement d'un outil de simulation du procédé de contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par un capteur à flux de fuite», thèse de doctorat, université paris-sud,2012.
- [3] **Feng Jian, Zhang Jun-Feng, Lu Sen-Xiang, Wang Hong-Yang, and Ma Rui Ze**, « Three-axis magnetic flux leakage in-line inspection simulation based on finiteelementanalysis»,19 July 2012.
- [4] **Yohann le diraison** , « imagerie à courants de foucault pour l'évaluation non destructive de structures rivetées aéronautiques», thèse de doctorat de l'école normale supérieure de cachan,france,2009.
- [5] **P. Duro choux**, « La recherche en contrôle non destructif», traitement du signal.
- [6] **Aggab Mohamed El Amine** , «Étude du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis», Université Labri Ben M'hidi , Oum El Bouaghi.
- [7] **YAN SHI, CHAO ZHANG 1, RUI LI, MAOLIN CAI ,AND GUANWEI JIA**, «Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection»,November 2015.
- [8] **TAREK BOUCHALA**, «Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault– Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite –», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université El hadj Lakhder, Batna,2008.
- [9] **BENSAID, Samir. 2010**. «Cours théorie de champ», Université de de M'sila, 2010.
- [10] **Oussama, BENSALAH**, «Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel », Mémoire de master en génie électrique, Université de M'sila, 2012.
- [11] **STEVE MOSES DJAFA TCHUSPA**, « développement et optimisation d'un modèle numérique 3d pour la simulation d'un système dédié au contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par flux de fuite», thèse de doctorat, université de paris-sud, 2014.
- [12] **Dr Y. KEBBETI**, « Capteurs magnétiques pour applications spatiales»,CNRS.
- [13] **TAREK BOUCHALA**, «développement de méthode rapide pour la résolution des problèmes directe dans les systèmes CND par Courants De Foucault», thèse de doctorat, Université El hadj Lakhder , Batna,2014..

- [14] **Document internet**: Forsl8t and Sulliran, «World magnetic sensor composants and modules/ market report»,  
<http://www.forst.com/prod/serlvet/report-brochure.pag.2006>
- [15] **LABBI YACINE**, «étude de la détection défaut de rail par courants de Foucault Non Destructif », Mémoire master en génie électrique Université ouregla , 2016.
- [16] **Adib, SAFER Omar**, « Etude Et Modélisation De Capteur A Courants De Foucault Pour Le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire master en génie électrique Université de M'sila , 2014.
- [17] **Mazari Mohammed Abdelghafor**,«Etude et Simulation d'un Dispositif d'Inspection Par MFL des Installations de Stockage et de Transport des Hydrocarbures», Mémoire master, Ouargla,2018.
- [18] **MAHDJOUBI SAMIA**, «déecteur de champ magnétique», master en génie biomédical, université de Tlemcen, 2017.
- [19] **G.MALINOWSKI**, «Transport dépendant du spin et couplage d'échange : de la jonction tunnel au capteur magnétique intégré»,thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2004.
- [20] **Ala-Eddine Lakhdari**, « Etude Et Modélisation De Capteurs En Cnd Par Courants De Foucault : Application A La Détection Des Fissures», Mémoire de Magister, Electricité industrielle, Université de Biskra ,2011.
- [21] **MIX, PAUL E. 2005**. «Introduction to nondestructive testing»: a training guide. United States of America, 2005.
- [22] **BENHALIMA Abdenour**, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques) », Mémoire master en génie électrique Université de M'sila , 2018.
- [23] **Document internet** : catalogue fabricant 1- <http://www.silverwingndt.com/>.
- [24] **N. Oukacine** , «Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi- ouzou, Algérie , 2012.
- [25] **M. Chikh**, «Modélisation Hydrologique Par L'approche Connexionniste : Cas Du Bassin De L'oued Sebdou (Tafna- Nord Ouest Algerien) », Mémoire De Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [26] **J-C Prévotet**, «Tutorial on Neural Networks », Présentation power point, Université Paris VI, France, 2002.
- [27] **Aboubekr ryad abdallah**, «Application des Réseaux de Neurones pour la Caractérisation Géométrique d'un Défaut 3D par Courants de Foucault», Mémoire master en

### **Résumé :**

Le contrôle non destructif par flux de fuite magnétique est très important il est utilisé pour des pièces conductrices et basé sur la circulation d'un champ magnétique à travers l'épaisseur du tube.

Dans par ce travail, en premier lieu, nous avons présentés les principales méthodes de CND, ensuite nous avons donné une description des capteurs à flux de fuite magnétique, en second lieu, nous avons énuméré les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par mfl, on donné un bref aperçu du logiciel utilisé, le COMSOL multiphysics ainsi qu'un résultat de simulation de ce contrôle. et dernier c'est de procédé à un modélisation et une simulation 3D sous COMSOL multiphysics pour, tôle d'acier à faible carbone et avec défaut d'une part et d'autre part pour pièce cylindrique avec défauts internes et externe.

En prenant les résultats obtenus, nous avons appliqué ces résultats à la méthode de réseau de neurone.

**Mots clés:** Contrôle non destructif (CND), Magnetic Flux Leakage(MFL) , équations de Maxwell, méthode des éléments finis (MEF),réseau de neurone(RN).

### **Abstract:**

The non-destructive magnetic flux leakage control is very important it is used for conductive parts and based on the circulation of a magnetic field through the thickness of the tube. In this work, in the first place, we presented the main methods from CND, then we gave a description of the magnetic flux flow sensors, second, we enumerate the Maxwell equations that govern the detection phenomenon by mfl, we gave a brief overview of the software used, the COMSOL multiphysics as well than a simulation result of this control. and last is from process to modeling and a 3D simulation under COMSOL multiphysics for low carbon and defective steel sheet on the one hand and on the other hand for cylindrical part with internal and external defects. Taking the results obtained, we applied these results to the neural network method.

**Index Terms:** Non Destructive Testing (NDT), Magnetic Flux Leakage(MFL), Maxwell equations, finite element method, neural network.

### **ملخص**

يعد التحكم في تسرب التدفق المغنطيسي غير المدمر مهمًا للغاية حيث يستخدم في الأجزاء الموصلة ويعتمد على دوران المجال المغنطيسي من خلال سماكة الأنبوب. في هذا العمل ، في المقام الأول ، قدمنا الأساليب الرئيسية من المراقبة غير المهدمة ، ثم قدمنا وصفًا لمستشعرات تدفق الفيض المغنطيسي ، ثانيًا ، نعدد معادلات ماكسويل التي تحكم ظاهرة الكشف عن طريق المراقبة بالتحكم في التسرب المغنطيسي ، وقد قدمنا نظرة عامة مختصرة على البرنامج المستخدم ، فيزياء كامسول المتعددة أيضًا من نتيجة محاكاة لهذا التحكم. والأخير هو من عملية إلى النمذجة ومحاكاة ثلاثية الأبعاد تحت طرق هذا الأخير المتعددة للصفائح الفولاذية المنخفضة الكربون والمعيبة من ناحية ومن ناحية أخرى للجزء الأسطواني ذي العيوب الداخلية والخارجية. بلُخذ النتائج التي تم الحصول عليها في المجال السابق ، قمنا بدراسة هذه النتائج على طريقة الشبكة العصبية.

### **فهرس المصطلحات**

اختبار غير مدمر تيارات الدوامة ، طريقة العناصر المنتهية ، معادلات ماكسويل.