

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Ministère de

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université KASDI MERBAH OUARGLA



—ooOoo—

Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication
Département d'électronique et de communication

Mémoire

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique Des Système Embarqués

Présenté par :

BOUABDALLAH ELHADJ

MATALLAH MAROUANE

Thème:

***Réalisation d'une maquette didactique pour les
mesures CND « courant Foucault »***

Soutenu le: **14/06/2022**

Devant le Jury

M ^r . MAA	Président	Khaled Benathmane	UKM Ouargla
M ^r . MAB	Examineur	Achbi Said	UKM Ouargla
M ^r . MAA	Encadreur	AOUF Anouaressadate	UKM Ouargla

Année Universitaire: 2021/2022

Dédicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie cet humble travail à :

A celui qui a pavé le chemin devant moi, et l'a éclairé pour moi avec la lumière de l'esprit, par laquelle les eaux courantes s'assèchent et les belles fleurs poussent. A mon père, que Dieu ait pitié de lui, mets-lui dans ses vastes jardins

À ceux qui sont restés éveillés la nuit et se sont essuyés les yeux pour mon succès. À ma mère affectueuse, je demande à Dieu de continuer à lui assurer une santé et un bien-être et de lui accorder une longue vie.

À ceux qui ont partagé l'espoir avec moi et partagé les difficultés, mes frères et sœurs, qu'Allah les récompense de tout le meilleur

Et aux femmes de mes frères, je demande à Dieu de leur accorder la stabilité et la tranquillité

À la lumière de mon œil droit se trouvent des rois et des sultans, et dans mon œil gauche se trouve un remède à tous les maux, les enfants de mes frères et sœurs

Que Dieu les bénisse.

Et à mes grands-parents, mes oncles et tantes, et à ma mère et tantes, à chaque famille :

Bouabdallah et ce qui lui convient, A mon cher binôme MAROUANE

et puis à tous ceux qui m'ont appris une lettre devenue vieille, éclairant légèrement le chemin pour moi vers ceux qui ont enseigné moi le succès et la patience.

BOUABDALLAH ELHADJ

Dédicaces

Grace Allah je dédie ce modeste travail

*À mes êtres chers dans le monde, mes parents qui m'a
toujours soutenu et qui m'a toujours été présents et pour
tous leurs sacrifices, leur amour et leurs prières tout au long
de mes études*

A mon frère Ilyes

A ma sœur Sara

*A ma chère famille du petit au grand a tous mes amis
d'enfance et du parcours scolaire et universitaire*

A mes enseignants et professeurs du primaire à l'université

A mon cher binôme Elhadj

MAROUANE

Remerciements

Loué soit Dieu, Seigneur des mondes, qui nous a guidés vers cela, et nous n'aurions pas été guidés s'il ne nous avait pas guidés

*Pour ce qui suit, nous exprimons nos sincères remerciements, notre gratitude et notre appréciation à l'honorable professeur superviseur **AOUF Anouaressadate**, qui nous a supervisés dans ce travail, pour ses efforts considérables, ses instructions précises et ses précieux conseils, et nous exprimons également notre remerciement les plus chaleureux et les plus sincères aux membres du comité de discussion, **Khaled Benathmane***

***Achbi Said**, qui a accepté la supervision de ce travail*

Et à tous les éminents professeurs du département d'électronique, en particulier ceux qui nous ont enseigné tout au long de la formation universitaire

Et aussi à tous les membres de notre famille, parents et amis qui nous ont soutenus, soutenus et tendus un coup de main, et à notre université, Kasdi Merbah Université, Ouargla

Merci

{ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ }، هود "88"

ELHADJ

MAROUANE

Sommaire

Sommaire

Dédicaces	I
Dédicaces	I
Remerciements	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Liste des abreviations.....	V
Résumé	VI
ABSTRACT	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralité sur le contrôle non destructif.....	3
1.1. Introduction.....	4
1.2. Le Contrôle Non Destructif (CND)	4
1.3. Les types de contrôle non destructif (CND)	5
1.3.1. Contrôle visual	5
1.3.2. Ressuage.....	6
1.3.3. Magnétoscopie	7
1.3.4. Les ultrasons.....	9
1.3.5. La radiographie	11
1.3.6. La Tomographie	12
1.3.7. LA THERMOGRAPHIE	13
1.3.8. L'émission acoustique.....	14
1.4. Le Control Non Destructif par Courants de Foucault.....	15
1.4.1. Présentation des CF	17

Sommaire

1.5. Les types de courant de Foucault.....	18
1.5.1. Principe des courants de Foucault classiques	18
1.5.2. Principe des Courants de Foucault pulsés	20
1.6. Les technique des mesures.....	20
1.6.1. Mode absolu	20
1.6.2. Mode différentiel.....	21
1.7. Profondeur de pénétration des courants de Foucault	22
1.8 Signaux d'excitation et d'exploitation.....	22
1.8.1. Excitation mono fréquence.....	22
1.8.2. Excitation multifréquence	23
1.8.3. Excitation pulsé.....	23
1.9. Conclusion	24
Chapitre 2: Conception d'un capteur de courant de Foucault pulsé	25
2.1. Introduction.....	25
2.2. Conception de capteur de Foucault pulsé	26
2.3. Analyse théorique	26
2.4. Conception du système	27
2.5. Etude expérimentale	27
2.6. Validation expérimentale	28
2.7. Plate-forme d'expérimentation	29
2.8. Analyse des résultats expérimentaux	31
2.8.1. L'impact de l'amplitude d'excitation.....	31
2.8.2. L'impact de la fréquence d'excitation et du rapport cyclique :.....	32
2.8.3. L'influence des différentes hauteurs de défauts sur la tension de démarrage	34
2.9. Conclusion	36
Chapitre 3: Réseaux de neurones artificiels	37

Sommaire

3.1. Introduction.....	38
3.2. Définition	38
3.3. Historique.....	39
3.4. Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels	40
3.5. Introduction aux réseaux de neurones biologiques	40
3.5.1. Le corps cellulaire	41
3.5.2. Les dendrites	41
3.5.3. L'axone.....	41
3.5.4. Les synapses.....	41
3.6. Neurone formel	42
3.7. Fonction d'activation	43
3.8. Les différents types de réseaux de neurones Arti- ficiels.....	45
3.8.1. Les réseaux statiques ou réseau à couche (FEED FORWARD)	45
3.8.2. Les réseaux de neurones bouclés.....	45
3.8.3. Les réseaux de neurones convolutifs(CNN).....	45
3.9. L'Apprentissage des Réseaux de Neurones	46
3.9.1. Apprentissage supervisé	46
3.9.2. Apprentissage non supervisé.....	46
3.9.3. Apprentissage par renforcement.....	46
3.9.4. Apprentissage semi- supervisé	47
3.10. Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones.....	47
3.11. Types de perceptron.....	48
3.11.1. Perceptron simple.....	48
3.11.2. Perceptron multicouches (MLP)	48
3.12. Création d'une base de validation.....	49
3.12.1. Choix de la base de données	49
3.12.2. Création d'une base de validation	51

Sommaire

3.13. Résultat et discussion.....	52
3.13.1. Phase d'apprentissage	52
3.13.2. Modèle N° 1 (valeur de crête).....	53
3.13.3. Modèle N° 2 (temps de crête)	54
3.13.4. Modèle N° 3 (temps de passage par zéro).....	56
3.13.5. Mesure de la performance du modèle obtenu	58
3.14. Conclusion	58
Conclusion Générale	59
Conclusion générale.....	60
Références et bibliographie.....	61
Bibliographie	62

Liste des figures

Figure 1. 1.L'examen visual.....	5
Figure 1. 2.Contrôle par ressuage.	7
Figure 1. 3.Appareil portatif de magnétisation.....	8
Figure 1. 4.Le principe de contrôle par magnétisation.	9
Figure 1. 5.Principe de contrôle par ultrason.	10
Figure 1. 6.Appareillage de contrôle par ultrason.....	11
Figure 1. 7.Le contrôle par radiographique.....	12
Figure 1. 8.Inspection par thermographie.....	14
Figure 1. 9.L'émission Acoustique.	15
Figure 1. 10.Principe de la détection par courants de Foucault.....	16
Figure 1. 11.Détection d'un défaut avec une sonde encerclant différentielle.....	16
Figure 1. 12.Inspection par courants de Foucault.	18
Figure 1. 13.Inspection par courants de Foucault.	19
Figure 1. 14.Modification des courants de Foucault par un défaut.....	20
Figure 1. 15. Mode différentiel.	21
Figure 2. 1.Le schéma fonctionnel.....	28
Figure 2. 2.Modèle de capteur courant foucault pulsé.	28
Figure 2. 3. Oscilloscope HANTEK 1008c, Dso5202p..	29
Figure 2. 4.Module générateur XY-LPWM (fournitures de PWM signal).....	30
Figure 2. 5.Unité de visualisation "ordinateur personnel".....	31
Figure 2. 6.Le spécimen inspecté.....	31
Figure 2. 7.Tension d'excitation 5 v.	32
Figure 2. 8. Signal de démarrage en cycle10%.	33
Figure 2. 10.Signal de démarrage en cycle30%.	33
Figure 2. 11. Signal de détection à 6 mm.	33
Figure 2. 12. Signal de détection à 1 mm.	34

Figure 3. 1 .Modèle d'un neurone biologique.....	42
Figure 3. 2 .Modèle d'un neurone formel.....	43
Figure 3. 3 . Structure d'un réseau CNN.....	46
Figure 3. 4 .Perceptron simple.....	48
Figure 3. 5 .Perceptron multicouches.	49
Figure 3. 6 .Variation des caractéristiques du signal (a). [28]	50
Figure 3. 7 .Variation des caractéristiques du signal temps de crête. [28]	50
Figure 3. 8 .Variation des caractéristiques du signal temps de passage par zéro. [28]	51
Figure 3. 9 .Organigramme pour le programme d'apprentissage.....	52
Figure 3. 10 .Interface de l'entraînement du MLP pour le premier modèle.....	53
Figure 3. 11 .EQM en fonction du nombre d'itérations pour le premier modèle.....	54
Figure 3. 12 .La performance du modèle MLP pour le premier modèle.	54
Figure 3. 13. .Interface de l'entraînement du MLP pour le deuxième modèle.	55
Figure 3. 14 .EQM en fonction du nombre d'itérations le deuxième modèle.	55
Figure 3. 15 .La performance du modèle MLP pour le deuxième modèle.	56
Figure 3. 16 .Interface de l'entraînement du MLP pour le troisième modèle.....	56
Figure 3. 17 .EQM en fonction du nombre d'itérations le troisième modèle.....	57
Figure 3. 18 .La performance du modèle MLP pour le troisième modèle.....	57

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 .les paramètres de capteur proposés.....	27
Tableau 3. 1 .correspondance neurone biologique/neurone artificiel.....	42
Tableau 3. 2 .Fonctions d'activation.....	44
Tableau 3. 3 .Variation des erreurs en fonction du nombre des neurones dans la couche cachée.	58

Liste des abreviations

CND : contrôle non destructif.

END : l'évaluation non destructive.

CF : Courants de Foucault.

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.

CFP: Courants de Foucault pulses

PWM: Pulse-width modulation.

CNN (ConvNet): Convolutional Neural Networks

MATLAB: mathwork laboratory.

RNA : réseaux de neurones artificiels.

MLP: multilayer perceptron.

δ : Profondeur de pénétration en mètres.

f : Fréquence du courant par courant la bobine en Hertz.

μ : Perméabilité magnétique relative du matériau.

σ : Conductivité électrique du matériau en Siemens par mètre.

B: densité de flux magnétique.

Résumé

Le CND contient un grand nombre de technologies aux caractéristiques, avantages et limites différents, ce qui fait du CND un terrain fertile pour la recherche scientifique. La technologie des courants de Foucault pulsés a été largement utilisée dans la détection des défauts car elle a montré de bons résultats avec des exigences minimales. Nous avons effectué des expériences de capteur sur des défauts avec différentes profondeurs, rapport cyclique, amplitude d'excitation et fréquence d'excitation avec différentes valeurs. Grâce aux résultats, le capteur a montré une détectabilité. Nous avons introduit un modèle basé sur un réseau neuronal artificiel pour le processus CND à courant pulsé, en utilisant un réseau neuronal multicouche (MLP) pour résoudre le problème inverse dans le domaine CND en comparant trois modèles neuronaux.

Mots clés : contrôle non destructif, courants de Foucault pulsés, les défauts, réseaux de neurones artificiels.

ملخص:

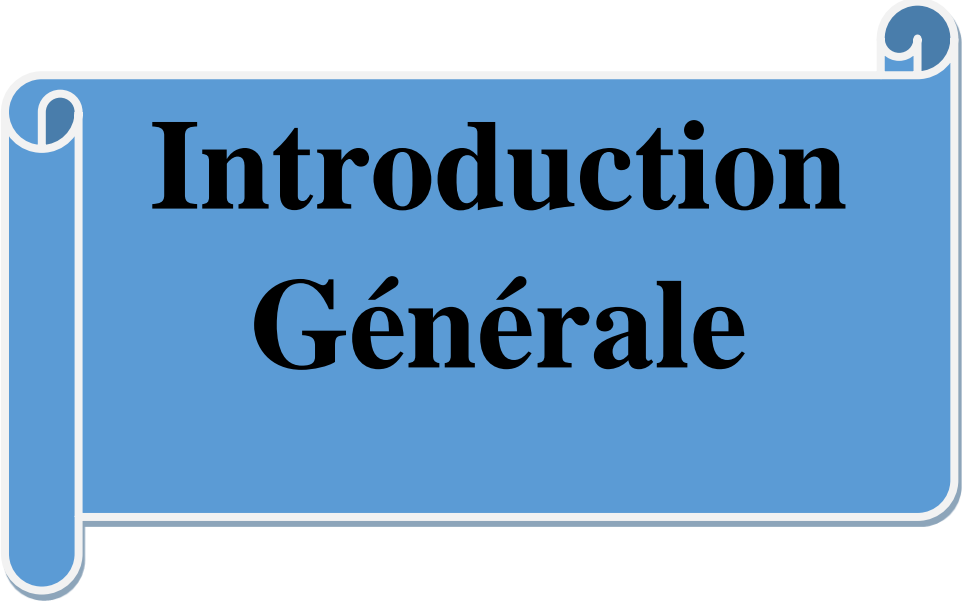
يحتوي الاختبار غير التدميري على عدد كبير من التقنيات ذات الخصائص والمزايا والقيود المختلفة ، مما يجعل الاختبار غير التدميري مجالاً خصباً للبحث العلمي. تم استخدام تقنية التيار الدوامي النبضي على نطاق واسع في اكتشاف الأخطاء حيث أظهرت نتائج جيدة مع الحد الأدنى من المتطلبات. أجرينا تجارب استشعار على العيوب ذات الأعماق المختلفة ودورة العمل وسعة الإثارة وتردد الإثارة بقيم مختلفة. بفضل النتائج ، أظهر المستشعر قابلية الكشف. قدمنا نموذجاً قائماً على الشبكة العصبية الاصطناعية لعملية الاختبار غير التدميري بالتيار النبضي ، باستخدام شبكة عصبية متعددة الطبقات (MLP) لحل المشكلة العكسية في مجال الاختبار غير التدميري من خلال مقارنة ثلاثة نماذج عصبية.

الكلمات الدالة: الاختبار غير التدميري التيار الدوامي النبضي ,العيوب, الشبكات العصبية الاصطناعية..

ABSTRACT

NDT contains a large number of technologies with different characteristics, advantages and limitations, which makes NDT a fertile field for scientific research. Pulsed eddy current technology has been widely used in fault detection as it has shown good results with minimal requirements. We performed sensor experiments on defects with different depths, duty cycle, excitation amplitude and excitation frequency with different values. Thanks to the results, the sensor showed detectability. We introduced an artificial neural network-based model for the pulse-current NDT process, using a multi-layer neural network (MLP) to solve the inverse problem in the NDT domain by comparing three neural models.

Key words: NDT, pulsed eddy current, defaults, artificial neural networks.

A blue scroll graphic with a white border and a white shadow. The scroll is unrolled in the middle, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le secteur industriel, la défaillance de pièces mécaniques peut entraîner des conséquences plutôt désastreuses. Le contrôle non destructif (CND), qui vise à contrôler sans endommager les pièces concernées, est une étape importante dans la maintenance et le contrôle des équipements et installations industriels afin d'éviter les dommages pouvant survenir après une panne. De ce fait, le contrôle non destructif est devenu une nécessité industrielle. Les méthodes CND sont utilisées soit pour évaluer les quantités caractéristiques d'un produit (épaisseur, conductivité, etc.), ou détection et caractérisation de défauts.

Les méthodes CND sont utilisées soit pour évaluer les quantités caractéristiques d'un produit (Épaisseur, conductivité, etc.), ou détecter et caractériser la présence de défauts, ainsi que déterminer quand la pièce approche de la défaillance sans l'endommager dans le processus de test Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons et leurs méthodes d'utilisation Rayonnements ionisants (radioscopie) et méthodes électromagnétiques (endoscopie magnétique, Courants de Foucault). Le choix de la méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que La nature des matériaux constitutifs des pièces à examiner et la nature des informations requises (Erreur d'ouverture ou d'enfouissement), conditions de mise en œuvre, etc.

Le courant de Foucault est la méthode CND qui traverse la plupart de ces limitations, elle permet d'accéder aux deux côtés de l'échantillon sans avoir à le déplacer en raison de sa profondeur de pénétration profonde et du signal pulsé lui donnant une vitesse de test élevée, une sensibilité et plus d'informations sur le nature des défauts.

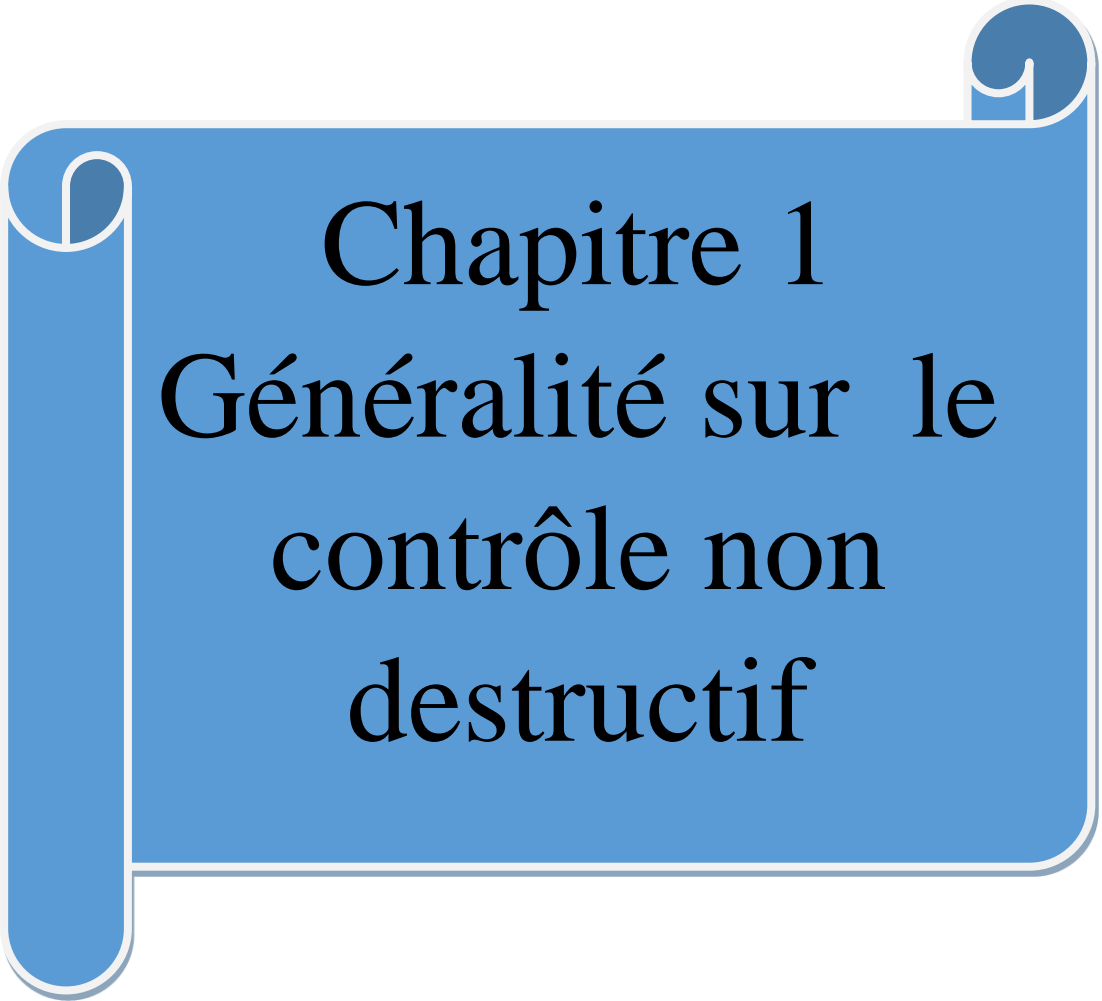
Cette mémoire est composée de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter la définition, les objectifs et les différents techniques du CND, exposent aussi les courants de Foucault, ainsi que les trois modes de contrôle non destructif par courants de Foucault : mono fréquence, multifréquence et pulsé.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons conçu le capteur à courant de Foucault pulsé La conception du capteur telle que décrite dans le chapitre a été testée avec divers paramètres et profondeurs de crevasses pour démontrer son efficacité et sa sensibilité.

Dans le troisième chapitre, nous avons principalement introduit les concepts de base des réseaux de neurones : propriétés mathématiques, structures de neurones, types d'apprentissage, etc... Cette modélisation porte sur la caractérisation de défauts (estimation d'épaisseur) dans des pièces métalliques à partir de signaux issus de courants de Foucault impulsions du capteur. Nous avons fait une comparaison entre trois modèles neuronaux, (la variabilité des caractéristiques du signal de valeur de crête, la variabilité des caractéristiques du temps de crête et le changement des caractéristiques du temps de transit nul).

Nous terminerons notre travail par une conclusion sur le travail réalisé ainsi que sur les points de vue.

A blue scroll graphic with a white border and a white shadow. The scroll is unrolled in the middle, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled part.

Chapitre 1

Généralité sur le contrôle non destructif

Chapitre 1 Généralité sur le contrôle non destructif

1.1. Introduction

On définit usuellement le contrôle non destructif (CND) ou l'évaluation non destructive (END) comme étant un moyen de mise en évidence des anomalies ou défauts (fissures, discontinuités de matière, fatigue, usure,...etc.) susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, sans porter atteinte à l'état global du produit. D'où l'importance majeure du CND dans le contrôle de la qualité des produits et dans la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens. Il existe plusieurs méthodes de CND, quoique la méthode utilisant les courants de Foucault (CND-CF) est très attractive comparée aux autres méthodes. Celle-ci est appliquée uniquement sur les produits constitués de matériaux conducteurs électriques. Dans ce chapitre, nous présentons, d'une manière non exhaustive, les différents types de contrôle non destructif et particulièrement celle utilisant les courants de Foucault.

1.2. Le Contrôle Non Destructif (CND)

Le contrôle non destructif CND est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer quelle taille de défaut est acceptable de façon empirique à la casse (destruction) et ensuite pouvoir les détecter, sans détruire la pièce.

En ce sens, le contrôle non destructif apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce. [1]

1.3. Les types de contrôle non destructif (CND)

Les types de CND utilisées sont diverses. Le choix d'une méthode dépend de :

- La pièce à contrôle (nature du matériau, forme,...)
- Les types de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...).
- Les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. [2]

1.3.1. Contrôle visuel

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, la Figure (1) montre le principe de contrôle visuel. [3]

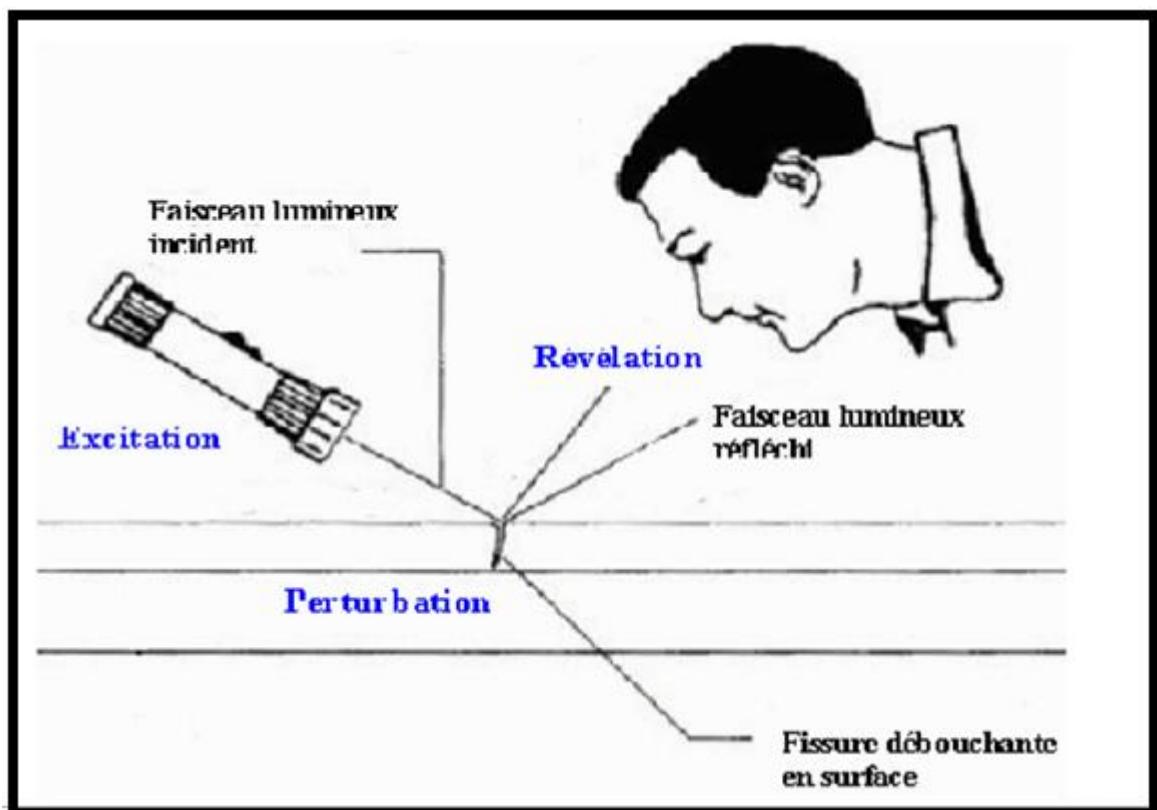


Figure 1.1. L'examen visuel.

- **Avantages**

- ✓ Examen simple, rapide et pas couteux.
- ✓ Souplesse d'inspection.

- **Inconvénients**

- ✓ Détection limitée aux défauts superficiels
- ✓ La surface doit être propre
- ✓ Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et pièce examinée.

1.3.2. Ressuage

Le contrôle par ressuage consiste à applique sur la surface à contrôle préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation colorée fluorescente. Le liquide pénètre, en particulier par capillarité, dans les ouvertures des défauts ; la vitesse et l'étendue de cette pénétration dépendent des conditions telles que : tension superficielle, cohésion du liquide, adsorption et viscosité, elles sont également affectées par d'autres facteurs comme le temps, la température, l'état de surface du matériau et de l'intérieur du défaut.

Après un certain temps correspondant à la pénétration du liquide d'imprégnation dans les défauts, l'excès de liquide présent à la surface de la pièce est ensuite éliminé par lavage. La surface est ensuite séchée puis recouverte d'un révélateur qui en attirant le Liquide d'imprégnation retenue dans les défauts donne une indication renforcée de ceux-ci. [4]

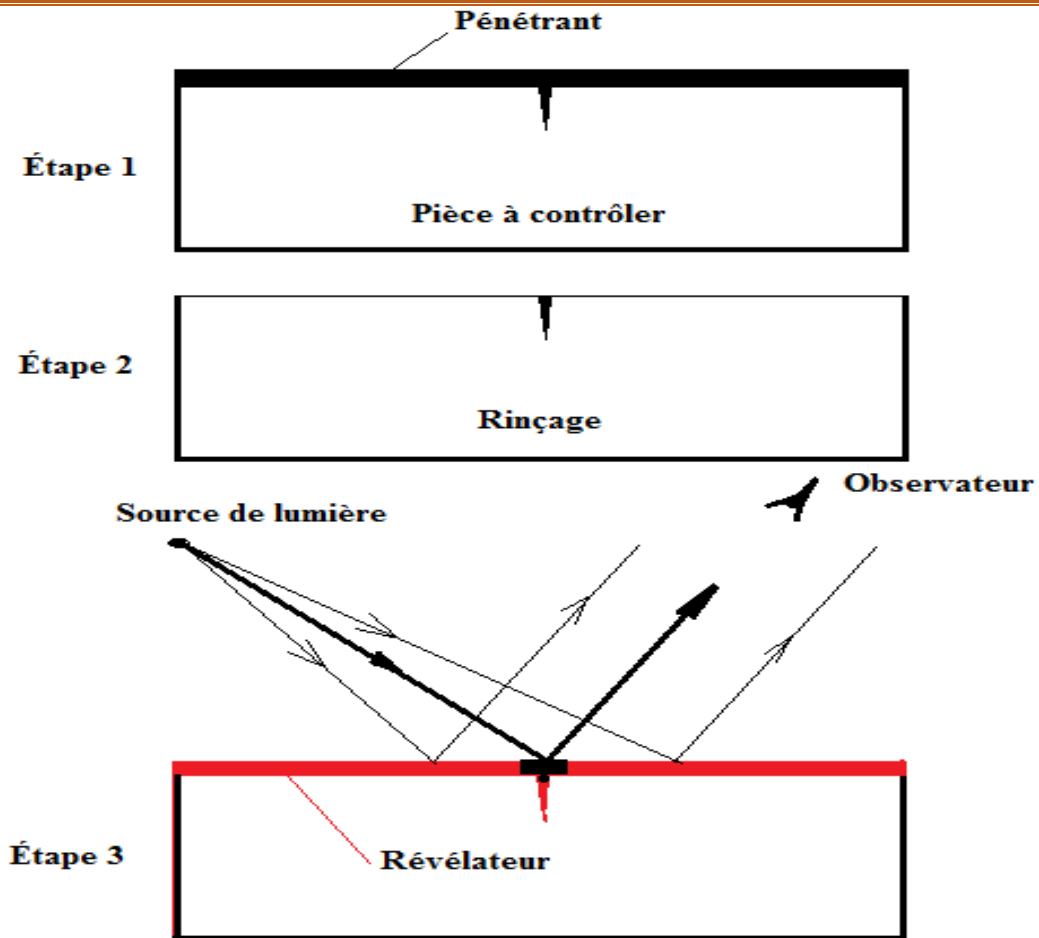


Figure 1. 2. Contrôle par ressuage.

- **Avantages**
 - ✓ Facilité de mise en œuvre et relativement aux fissures débouchant.
 - ✓ Appliqué sur les matériaux diélectriques et non ferromagnétique.
- **Inconvénients**
 - ✓ Limite de l'application sur les matériaux non poreux.
 - ✓ L'interprétation des résultats est subjective : il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
 - ✓ Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammable.

1.3.3. Magnétoscopie

C'est une méthode applicable seulement aux matériaux magnétiques pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l'instar du ressuage, la magnétoscopie complète l'examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant (les imperfections de surface restent peu visibles malgré tout le soin

Apporté).

La pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique. En l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air). Toute discontinuité du matériau provoquera une diminution de la section de passage et donc une augmentation du champ d'induction magnétique (conservation du flux). Cette augmentation provoquera une fuite magnétique à la surface de la pièce. Des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accrochent au droit du défaut. On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté. [5]



Figure 1. 3.Appareil portable de magnétisation.

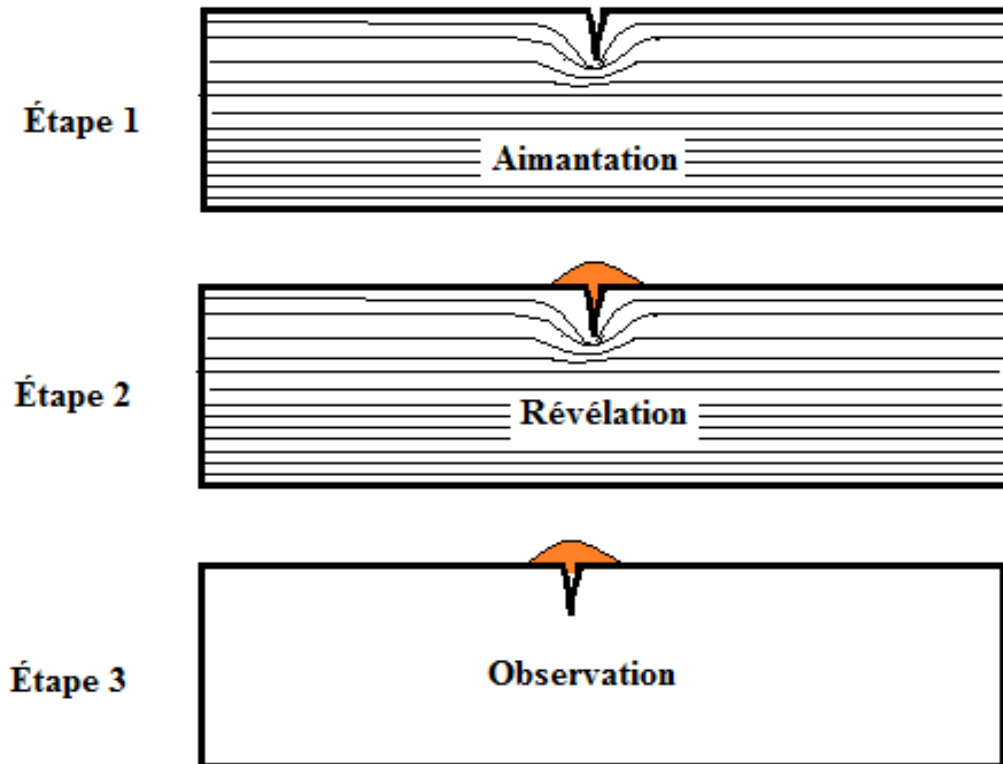


Figure 1. 4. Le principe de contrôle par magnétisation.

- **Avantages**
 - ✓ Simple, peu coûteuse et rapide.
 - ✓ Détection des défauts débouchant et sous-jacents.
- **Inconvénients**
 - ✓ 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.

1.3.4. Les ultrasons

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde. [6]

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et dimensionner les discontinuités

(Défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle ultrasons consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau. [5]

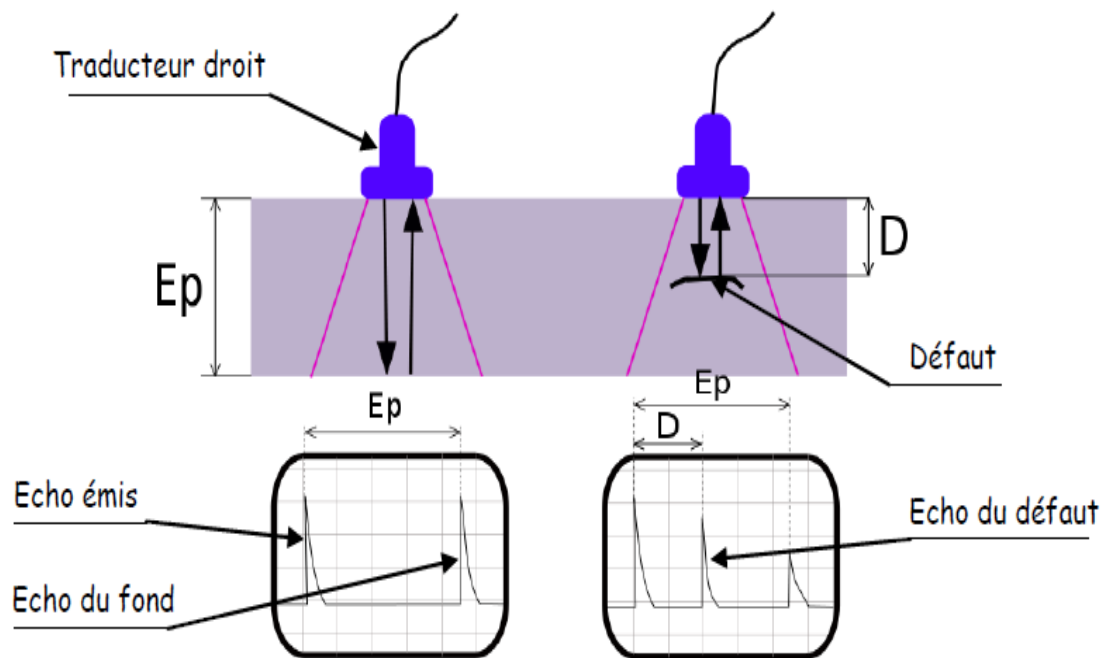


Figure 1. 5.Principe de contrôle par ultrason.

- **Avantages**

- ✓ Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forage).
- ✓ Haute sensibilité de détection de défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore).
- ✓ Détection localisation et dimensionnement des défauts.
- ✓ Inspection et détection en temps réel

- **Inconvénients**

- ✓ Sensible à nature et à l'orientation des défauts.
- ✓ Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle).
- ✓ Inspection limitée par la complexité de la pièce contrôlée.
- ✓



Figure 1. 6.Appareillage de contrôle par ultrason.

1.3.5. La radiographie

La radiographie met en œuvre des sources émettrices de rayonnements ionisants. Ces rayonnements ont une énergie très grande qui leur permet de traverser la matière.

Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus aux moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial (cas de radiographie industrielle). [6]

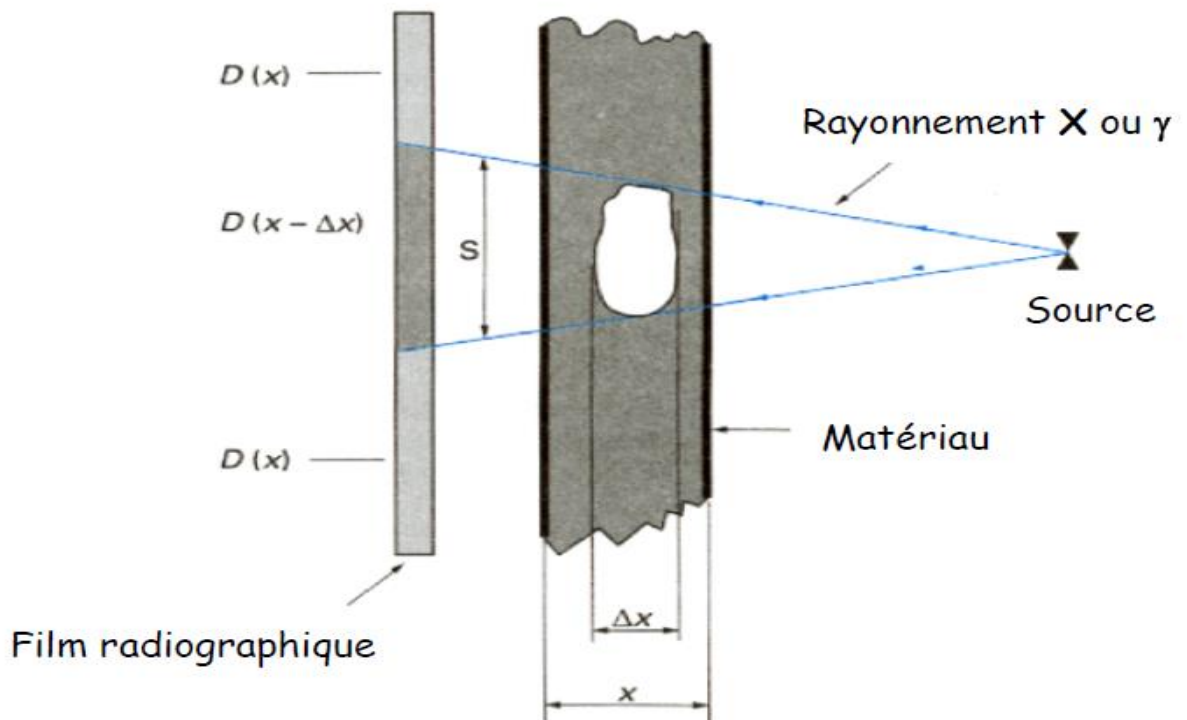


Figure 1. 7. Le contrôle par radiographique.

- **Avantages**
 - ✓ Contrôle des objets de forme compliquée.
 - ✓ Facile à transporté (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radioactive portatifs).
 - ✓ Apprécier la nature et la taille des défauts.
- **Inconvénients**
 - ✓ L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur.
 - ✓ Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
 - ✓ Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité.
 - ✓ Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

1.3.6. La Tomographie

Née dans les années 1970 pour le domaine médical la tomographie a adapté aujourd'hui ses paramètres au domaine industriel dont tous les secteurs peuvent bénéficier des possibilités, que ce soit en aéronautique, dans le secteur automobile, en fonderie, dans l'industrie minière ou pétrolière ou le secteur agro-alimentaire. Cette technique permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche depuis l'extérieur de cet

Objet. Dans une version haute résolution, on l'utilise aussi de plus en plus en sciences des matériaux et en contrôle non destructif CND. [6]

- **Avantages**

- ✓ La complémentarité avec la radiographie conventionnelle.
- ✓ Les images numériques fournissent des paramètres quantitatifs inaccessibles aux autres méthodes de CND.
- ✓ La tomographie permet de pouvoir analyser la matière au cœur des objets directement sans les altérer en supprimant par la même le problème de la représentativité des échantillons.

- **Inconvénients**

- ✓ Les principales difficultés liées à la méthode sont dues à :
- ✓ L'extrême variété des appareillages et des modes de fonctionnement de ceux-ci.
- ✓ La grande diversité des matériaux contrôlables.
- ✓ La grande diversité des objectifs recherchés.

1.3.7. LA THERMOGRAPHIE

La thermographie est une technique permettant à distance et sans contact, d'observer des scènes thermique et d'en mesurer des températures avec une précision variable en fonction des critères recherchés.

A partir du zéro absolu (-273 c), tous les corps rayonnent de l'énergie. Cette énergie émise est dépendante de deux facteurs principaux qui sont :

- ✓ La température du corps.
- ✓ Le type de matériau du corps.

En résumé, plus un corps est chaud, plus il émet de rayonnements. Le mesurage de cette énergie est possible grâce à un système de mesure appelé (caméra infrarouge), ou plus techniquement (radiomètre infrarouge). Le domaine militaire et le secteur médical ont contribué au développement de cette technologie. [6]

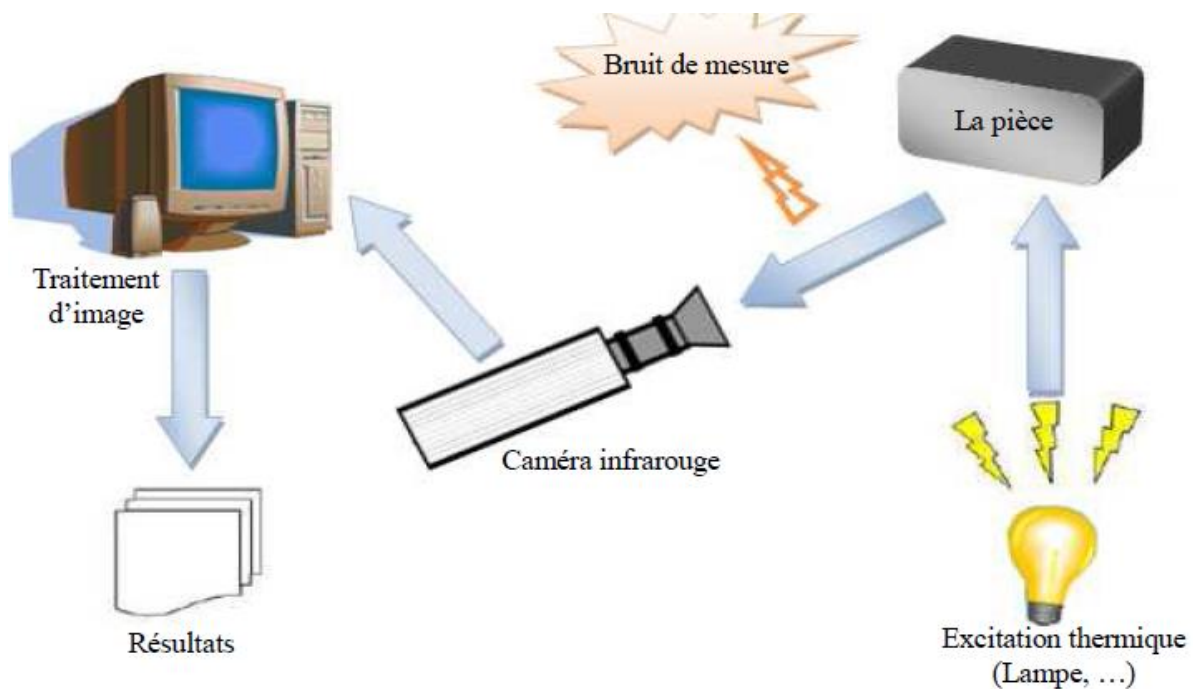


Figure 1. 8. Inspection par thermographie.

- **Avantages**

- ✓ Méthode relativement rapide et sans contact.
- ✓ Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée.
- ✓ Les cavités (champs de bulles, d'air, fissures, délaminages,..) sont bien détectées.
- ✓ La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions.
- ✓ L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge.

- **Inconvénients**

- ✓ Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs.
- ✓ Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée.
- ✓ L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts.

1.3.8. L'émission acoustique

L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation. La détection et

L'analyse des signaux permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts. La détection est réalisé par un capteur piézoélectrique avec une fréquence de 50 KHz à 1 MHz (généralement 50 à 500 KHz). L'émission acoustique diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif pour plusieurs raisons parmi eux :

Un signal d'émission acoustique ne peut être obtenu que si la structure est sollicitée, seuls les défauts actifs peuvent être détectés. L'émission acoustique peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité mais en aucun cas, l'émission acoustique ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...). [7]

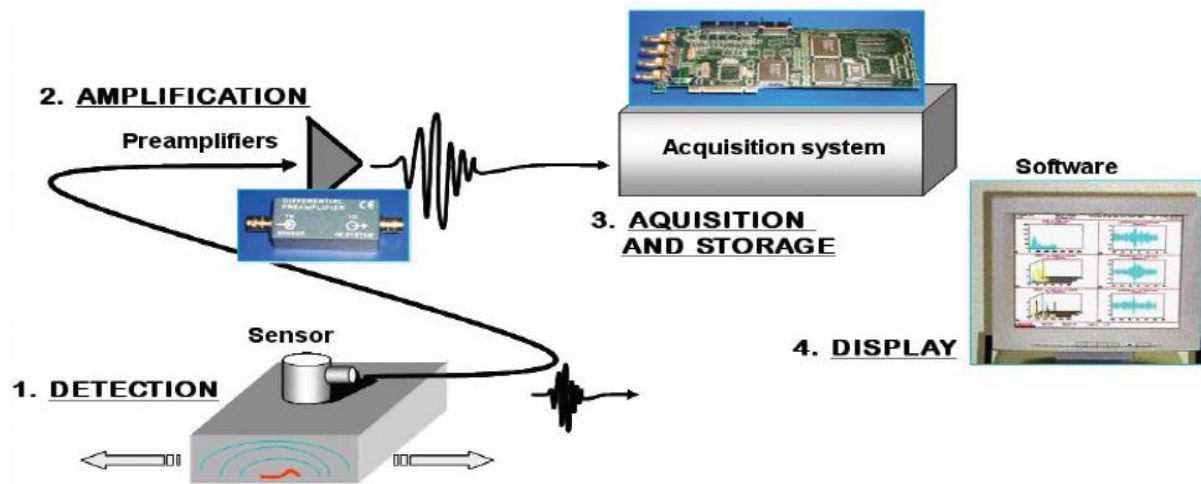


Figure 1. 9. L'émission Acoustique.

1.4. Le Control Non Destructif par Courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault s'effectue en créant un champ magnétique dans une bobine que l'on va déplacer à la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation des lignes des courants induits dans pièce, par un défaut, va se traduire par une modification du self induction, qui sera détectée. (Figure 1.10 et 1.11)

En générale on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine de la pièce contrôlée et celle d'une pièce de référence (sans

Défauts). En jouant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobine, il est possible de contrôler jusqu'à quelques millimètres de la surface. [8]

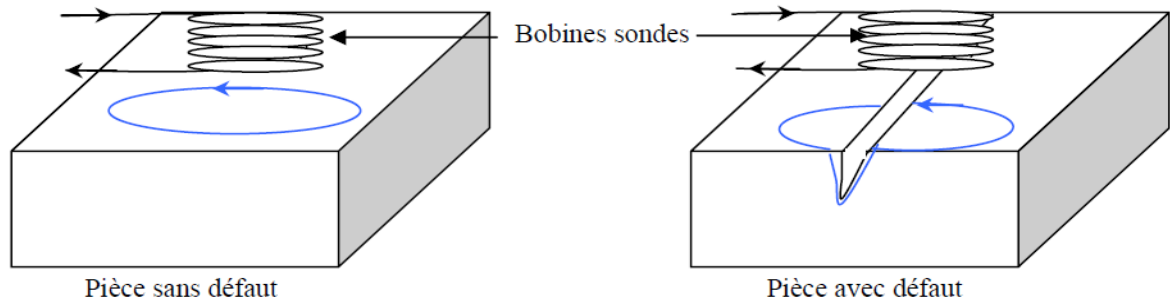


Figure 1. 10.Principe de la détection par courants de Foucault.

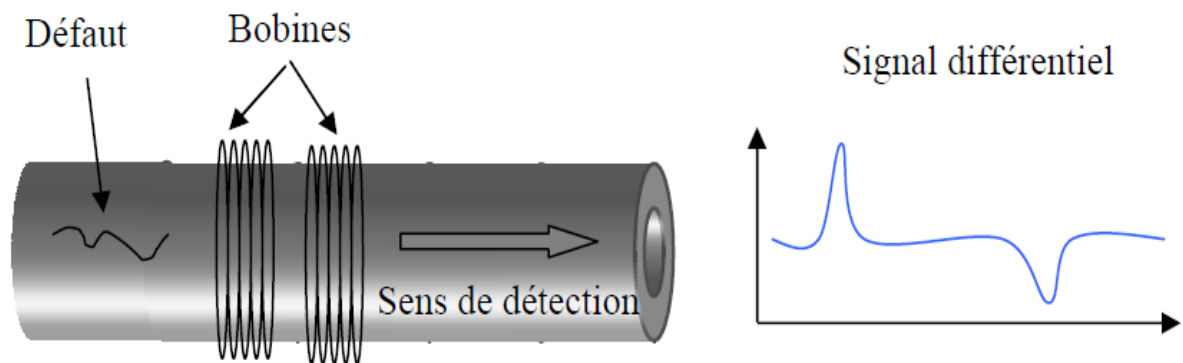


Figure 1. 11.Détection d'un défaut avec une sonde encerclant différentielle.

L'archivage électronique de signature des défauts et le traitement du signal constituent des voies de développement actuel permettant de simplifier l'exploitation de l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'application. Ils sont aussi bien utilisés pour la mesure de corrosion uniforme que localisée. Ainsi, la corrosion sous contrainte, qui entraîne le développement de fissures, est souvent mesurée par courants de Foucault. [8]

- Avantages

- ✓ Recherche de défauts situés à des profondeurs variables (de zéro à quelques mm)
- ✓ Possibilité de contrôle automatique et en continu de pièces longues et profilées (tubes, barres, rubans, feuillets...).
- ✓ Permet d'effectuer des mesures dimensionnelles (profondeur de défaut, mesure d'épaisseur des revêtements non-électro conducteurs ou de conductivité très différente de celle du substrat).
- ✓ Permet le tri de pièces dont la conductivité électrique est différentes (même alliage mais traitement thermique différente, nuances d'alliages mélangés accidentellement...).
- ✓ Haute sensibilité de détection des défauts, une appréciation de la profondeur est possible.
- ✓ Parfaitement adapté aux contrôles de maintenance (tubes de générateurs de vapeur, remontées mécanique, ponts suspendus, moteurs d'avions...).

Absence d'inconvénients liés à l'environnement ou à l'hygiène et à la sécurité.

- **Inconvénients**

- ✓ Méthode de contrôle ne s'appliquant qu'à des matériaux électroconducteurs.
- ✓ Difficile à mettre en œuvre pour l'examen complet de pièces de forme complexes (nécessité de fabriquer des sondes spécifiques).
- ✓ La méthode de contrôle local peu adaptée à des balayages rapides de surfaces importantes.
- ✓ L'interprétation des signaux est délicate et nécessite une formation spécifique des opérateurs de niveau élevé.

1.4.1. Présentation des CF

Courants de Foucault, courants étudiés par le physicien français Léon Foucault, apparaissant dans la masse de tout matériau conducteur en mouvement dans un champ magnétique, ou dans tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable. Les lignes de ces courants sont fermées sur elles-mêmes : on parle de boucles de courants, Les courants de Foucault s'expliquent par le phénomène d'induction électromagnétique et sont décrits par loi de Faraday. [8]

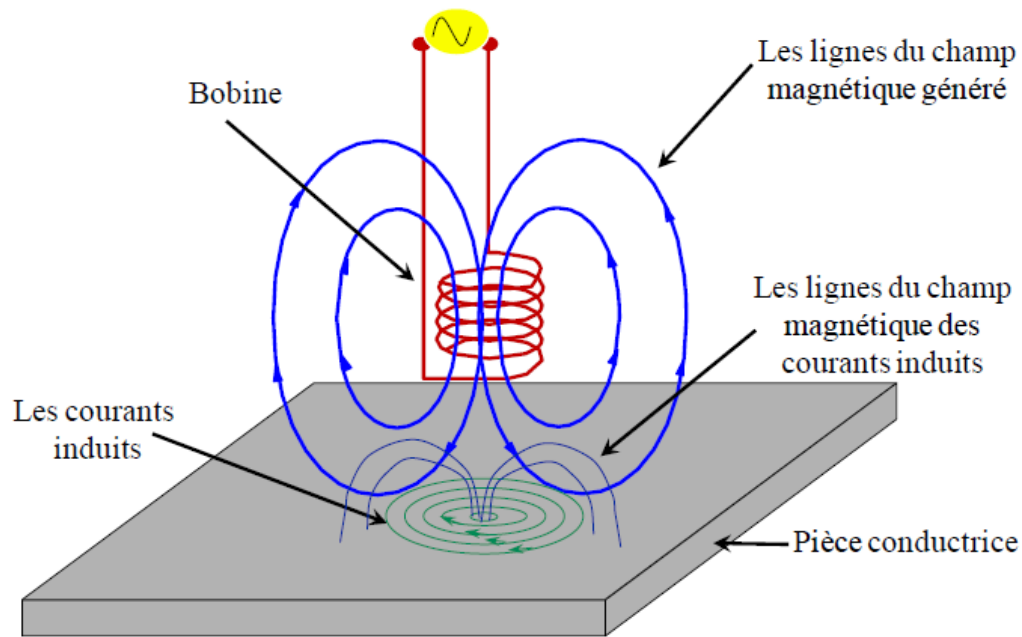


Figure 1. 12. Inspection par courants de Foucault.

1.5. Les types de courant de Foucault

Il existe deux types de courant Foucault :

1.5.1. Principe des courants de Foucault classiques

Parmi les différentes méthodes de contrôle non destructif des matériaux conducteurs, les courants de Foucault (CF) connaissent un développement important et ne nécessitent pas de contact entre la pièce et le système de mesure.

Considérons une pièce conductrice placée dans l'induction magnétique créée par un bobinage parcouru par un courant sinusoïdal. Le flux induit dans le matériau est également une fonction sinusoïdale, qui génère des courants appelés Courants de Foucault (Figure 1.13).

La répartition des courants de Foucault va dépendre de la nature du matériau (conductivité, perméabilité), de la forme et de la dimension des pièces, de la position relative de la pièce par rapport au capteur (bobinage) et des caractéristiques du courant inducteur (intensité, fréquence).

Toute discontinuité dans le matériau (changements dimensionnels, variations de perméabilité et/ou de conductivité, présence de défauts tels que fissures, piqûres, arrachements, etc. ... qui se présente devant le capteur, modifie le parcours ou l'intensité des courants de Foucault (figure 1.14)

Cette modification s'observera soit par la mesure du flux résultant dans la bobine d'excitation, ce qui revient à mesurer sa variation d'impédance, soit par la mesure de la force électromotrice (f.e.m.) induite dans une seconde bobine de détection placée dans l'induction créée par la bobine excitatrice. [9]

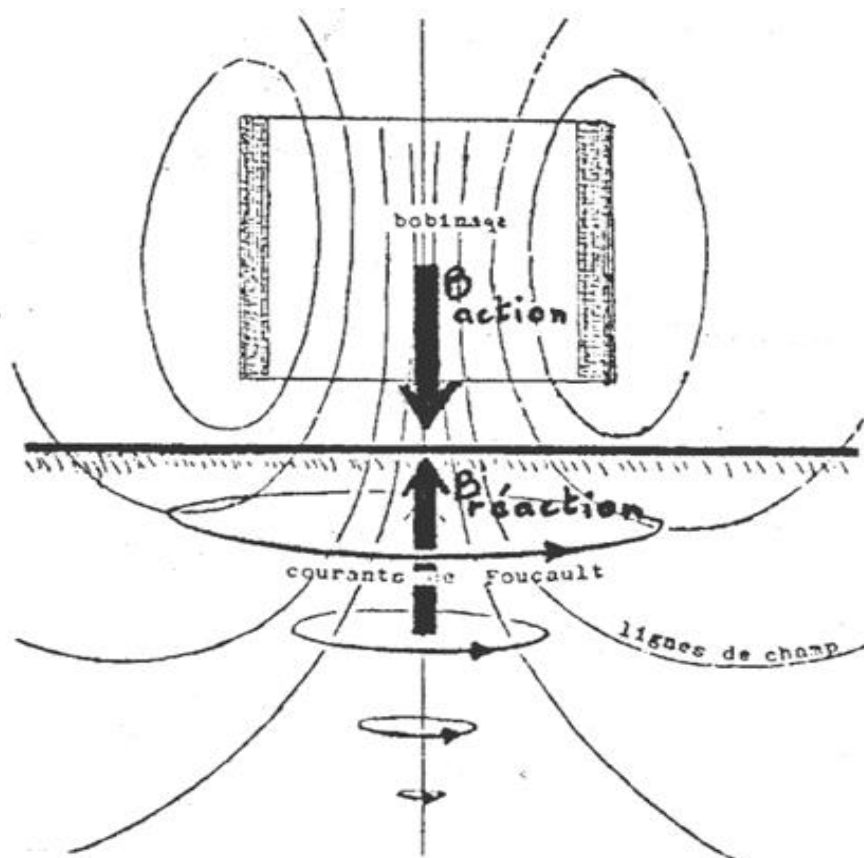


Figure 1. 13. Inspection par courants de Foucault.

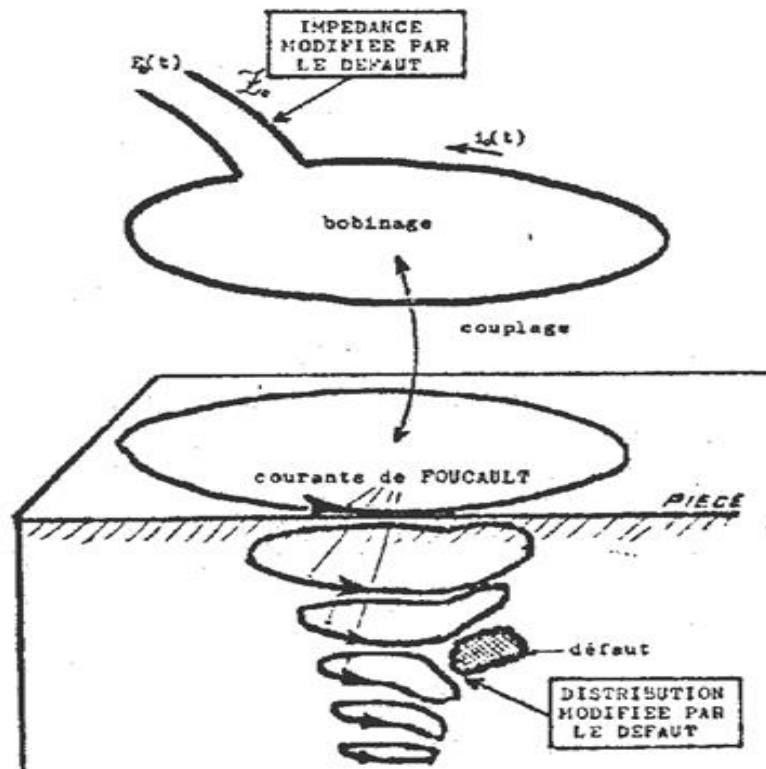


Figure 1. 14. Modification des courants de Foucault par un défaut.

1.5.2. Principe des Courants de Foucault pulsés

La technique de contrôle par courants de Foucault pulsés (CFP) est une nouvelle méthode d'inspection et d'identification de la corrosion en multicouches utilisée dans le CND. Aussi bien que des mesures d'épaisseur et de conductivité des collages des tôles conducteurs. Cette méthode de contrôle par courants de Foucault basée sur le principe de l'induction électromagnétique utilise un équipement simple et relativement peu coûteux. Les défauts présentent alors des changements de courant d'induction. Les courants de Foucault pulsée peuvent pénétrer profondément dans la pièce, même si celle-ci est en plusieurs couches non mécaniquement collées. C'est l'avantage le plus important par rapport à la méthode de contrôle par Ultrason qui exige un contact mécanique entre les couches. La méthode de contrôle par les courants de Foucault pulsée permet de détecter la perte en métal dans une structure en multicouche. [9]

1.6. Les technique des mesures

1.6.1. Mode absolu

Le terme absolu est utilisé pour signifier que la mesure est faite sans référence directe ou une comparaison avec un étalon. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts longs (corrosion, usure, érosion...).

Elle est très sensible aux variations de conductivité électrique ou de perméabilité magnétique, permet la mesure des conductivités et la mesure des revêtements (peinture, dépôts électrolytiques, matières plastiques...) ou des traitements thermochimiques (cémentation, nitruration...) sur les pièces métalliques. [10]

1.6.2. Mode différentiel

Cette mode contrôle nécessite l'utilisation de deux bobines qui soient connectées en oppositions série. L'une de deux bobine entoure ou est placée sur un étalon, l'autre entoure la pièce à examiner. Si la pièce est bonne (saine), la tension de sortie des deux bobine est nulle. Si les deux pièces différentes pour une raison quelconque, il existe une tension de sortie.

Cette méthode est Utilisée pour la détection des défauts courts (fissures, soufflures, inclusions, points de corrosion...).

Elle est peu sensible aux variations de conductivité électrique ou de perméabilité magnétique. [10]

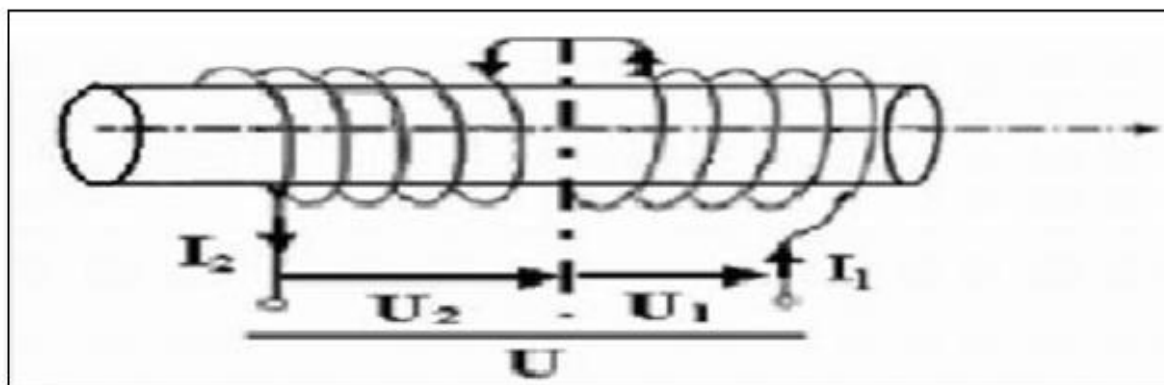


Figure 1. 15. Mode différentiel.

1.7. Profondeur de pénétration des courants de Foucault

Dans un conducteur planaire, l'intensité des courants de Foucault diminue avec la profondeur dans sous la surface selon une loi exponentielle. Par convention, la profondeur de pénétration.

Dans un tel conducteur est soumis à un champ uniforme H est la profondeur à laquelle l'intensité Les courants sont égaux à $1/e$ ou 0,37 de la densité surfacique, où e est la base des logarithmes népériens ($e = 2,7183$) Pour un conducteur plat, la profondeur de pénétration est donnée par l'expression suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

δ : Profondeur de pénétration en mètres.

σ : conductivité électrique du matériau en Siemens par mètre.

μ : perméabilité magnétique relative du matériau.

f : fréquence du courant parcourant la bobine en Hertz.

1.8 Signaux d'excitation et d'exploitation

On distingue trois types d'excitation :

- ✓ Excitation mono fréquence.
- ✓ Excitation multifréquence.
- ✓ Excitation pulsé.

1.8.1. Excitation mono fréquence

Le courant de Foucault est obtenu par excitation sinusoïdale de fréquence fixe qui peut être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts. Pour une fréquence très basse, l'amplitude, des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrée par les capacités inter spires du capteur. Il n'Ya cependant pas de critères simples et uniques du choix

De la fréquence. Nous pouvons donc dire que ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs. [11]

1.8.2. Excitation multifréquence

La méthode multifréquence est sans doute celle la plus utilisée dans le domaine du CND à courant de Foucault, développée en particulier pour le contrôle des tubes du générateur de vapeur et des rails ferroviaires. Dans le contrôle mono fréquentiel, on est limité à deux informations : la résistance et la réactance normalisées. Si ce type de contrôle permet une localisation spatiale d'un défaut et parfois une localisation sur sa taille, il ne permet pas de dissocier plusieurs informations (présence de plusieurs défauts) ou l'information d'une grandeur perturbatrice (entretouilles dans les tubes des générateurs de vapeur).

La technique multifréquence permet de discriminer un nombre de paramètres supérieur à deux. Elle constitue une extension de la technique mono fréquence et permet d'exploiter n fréquences différentes (deux ou quatre) et fournit $2n$ informations.

Le développement des techniques multifréquences résulte d'un double objectif positionner et caractériser un défaut à partir d'un signal global résultant de la combinaison du signal utile du défaut et de bruits parasites ayant des origines diverses. Cette méthode entraîne un surcoût important. Elle reste limitée au secteur présentant des impératifs de sécurité importants. [12]

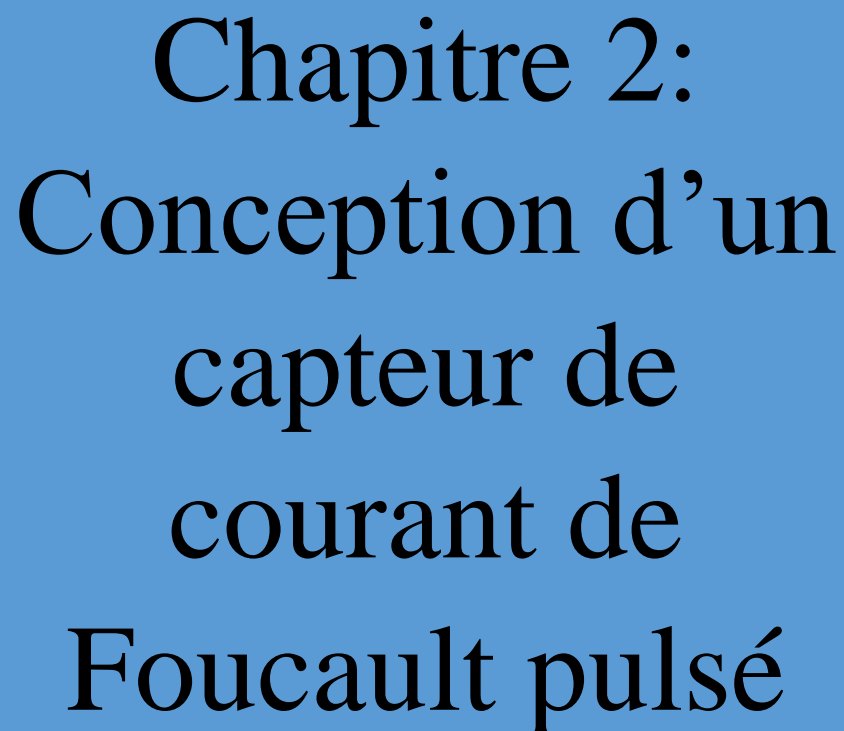
1.8.3. Excitation pulsé

Une technique qui a vu dans des années 50, destinait à l'évaluation de l'épaisseur de revêtement métallique, par la suite elle a été appliquée à détection de défauts profonds, les dépôts sur les pièces dans le domaine de l'inversion du phénomène. Elle consiste à émettre un champ magnétique de large bande de fréquence. La forme des signaux utilisés est variable dans le temps, c'est une excitation qui peut être des impulsions produite par une décharge capacitive ou bien une excitation impulsionnelle rectangulaire (carrée), triangulaire, ou semi sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. [11]

1.9. Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les types de CND à savoir le contrôle visuel, le ressuage, la radiographie, la thermographie, les ultrasons, le contrôle par magnétoscopie et le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) qui fait l'objet de cette mémoire.

Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et inconvénients. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous sommes expliqués le principe de contrôle non destructif par courant Foucault (CND-CF) et finalement nous avons mentionné les différents modes de CND-CF mono fréquence, multifréquence et pulsé.



Chapitre 2:
Conception d'un
capteur de
courant de
Foucault pulsé

Chapitre 2: Conception d'un capteur de courant de Foucault pulsé

2.1. Introduction

Les développements technologiques rapides dans le domaine de la science et de la technologie au cours des deux dernières décennies ont entraîné une énorme demande pour de nouvelles techniques CND qui. Sont efficaces, fiables et économiques à utiliser dans des domaines industriels sensibles tels que l'aviation, le nucléaire et de nombreuses autres industries qui utilisent des composants critiques nécessitant une fiabilité et une intégrité structurelle élevées [13]. L'incapacité à détecter les défauts pouvant entraîner la défaillance structurelle des composants critiques pourrait s'avérer catastrophique. L'une des techniques de contrôle non destructif les plus couramment utilisées est le test par courants de Foucault (CND-CF), qui est défini comme une technique d'inspection de matériaux électriquement conducteurs à des vitesses très élevées sans nécessiter de contact entre l'éprouvette et le capteur. Cette technique est utilisée pour détecter des défauts (fissures, corrosion, etc.) dans les matériaux conducteurs [14]. La découverte de l'induction électromagnétique près de 50 ans s'est écoulée avant D'autres expériences ont suggéré une voie vers l'application pratique du phénomène dans les essais de matériaux. David Edward Hughes (1831–1900) était un scientifique expérimental gallois et un musicien accompli. Il a mené d'importantes expériences de pertinence pour CND-CF en 1879, lorsqu'il a montré que les propriétés d'une bobine porteuse de courant changeaient lorsque la bobine était mise en contact avec des métaux de conductivité et de perméabilités différentes. C'est là que réside la base de l'identification des métaux et des alliages par des tests par courants de Foucault. Les chercheurs de ce siècle découvrent une nouvelle technique de courant de Foucault qui prouve la sensibilité de Haute aux fissures, cette technique appelée courant de Foucault à champ éloigné franchit les limites de la méthode des courants de Foucault telles que l'effet de peau et la force du signal, mais acier une technique de consommation d'énergie Haute avec de longs tests temps et moins d'informations sur le profil des défauts.

Pour résoudre ces problèmes, le chercheur a proposé une excitation pulsée comme amélioration de la technique des courants de Foucault à champ éloigné, les courants de

Foucault à champ éloigné pulsé montrent une sensibilité et une détectabilité plus élevées de différents paramètres de fissure [15] et une faible consommation d'énergie.

2.2. Conception de capteur de Foucault pulsé

L'étape principale et la plus difficile du CND par courants de Foucault est la conception du capteur, la combinaison de l'analyse des champs électriques et magnétiques et ses caractéristiques. Comment concevoir un capteur avec des bobines d'excitation et des bobines de détection appropriées est essentiel pour la sensibilité du test de courant de Foucault à champ lointain pulsé, dans cet article, nous avons conçu une sonde à courant de Foucault à champ lointain pulsé. La bobine d'excitation et la bobine de détection dans cette structure sont toutes deux coaxiales. Cela réduit la taille de la sonde, ce qui améliore la précision. L'excitation par impulsions avec une large gamme de composants donne au capteur proposé la possibilité d'examiner simultanément une gamme de profondeurs [15] et, par conséquent, sera en mesure de fournir plus d'informations sur le profil du défaut.

2.3. Analyse théorique

Afin de maximiser l'énergie de couplage magnétique indirect et de supprimer le couplage direct.

Énergie pour produire l'effet courant de Foucault en champ éloigné pulsé dans la plaque conductrice, nous adoptons des unités de blindage magnétique résultats théoriques du blindage mesurés par l'efficacité de blindage SE :

$$SE = 20 \log \frac{[B_0]}{[B_s]} [dB]$$

B_0 : la densité de flux magnétique au point de mesure sans le blindage.

B_s : la densité de flux magnétique au point de mesure avec le blindage.

L'impaction d'un nombre différent de couches de blindage a été étudiée. Une ou deux couches ne génèrent pas de phénomène courant de Foucault en champ éloigné pulsé [16], trois et quatre couches ou plus conduisent les caractéristiques de courant de Foucault en champ éloigné pulsé, le modèle à trois couches s'est avéré être un excellent choix qui donne un signal élevé résistance et dimensions optimales [16].

La tension induite de la bobine de détection donnée comme :

$$V_{Pik_p} = \sum_{w=0}^{\infty} \frac{j2\pi wn}{z_0(r_2 - r_1)} \int_0^{z_0} \int_{r_1}^{r_2} rA dr dz$$

2.4. Conception du système

	Bobine d'attaque	Bobine d'excitation
Diamètre intérieur (cm)	2	3
Diamètre extérieur (cm)	2.5	4
Nombre de tours	400	1000
hauteur (cm)	1	2
Conductivité de fil σ (s/m)	5.96×10^7	5.96×10^7

Tableau 2. 1 .les paramètres de capteur proposés.

2.5. Etude expérimentale

Afin de prouver que le capteur est valide pour générer le phénomène de courant de Foucault en champ éloigné pulsé et trouver le paramètres de fonctionnement appropriés tels que l'amplitude d'excitation, la largeur d'impulsion, la fréquence d'excitation. Dans cette étude, l'accent a été mis sur la détectabilité des fissures de hauteur dans les matériaux ferromagnétiques schéma fonctionnel des matériaux utilisés dans cet article illustré à la figure (2.1).

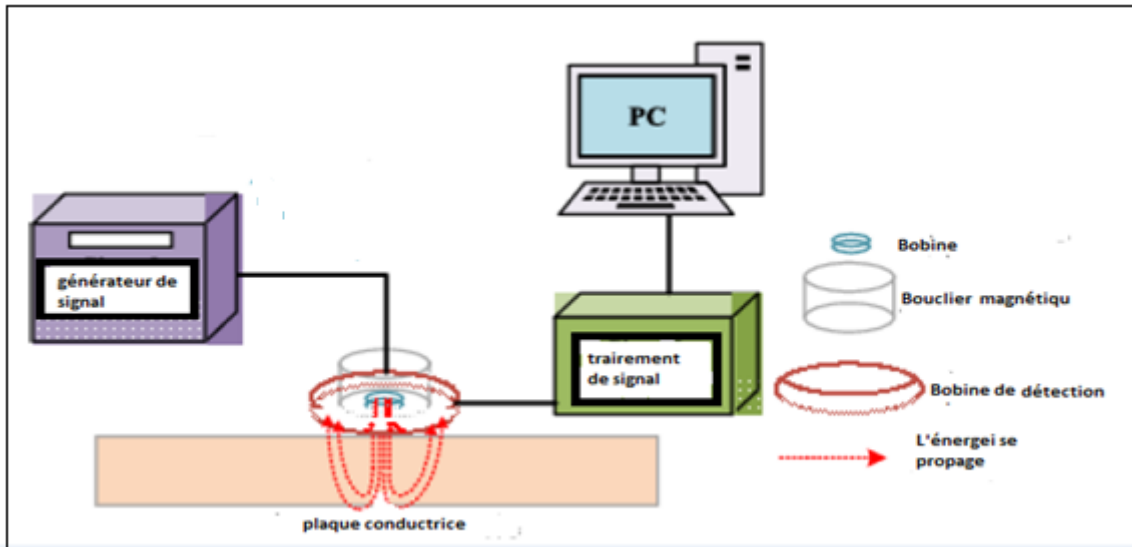


Figure 2. 1. Le schéma fonctionnel.



Figure 2.2. Modèle de capteur courant foucault pulsé.

2.6. Validation expérimentale

La validation expérimentale de cette étude a été réalisée en utilisant deux bobines coaxiales comme conducteur et bobine de détection et la dimension indiquée dans le tableau 2.1.

Le système comprend un générateur PWM, un oscilloscope, un échantillon d'acier avec 8 fentes situées en face avant qui simule des fissures de surface, 8 fentes de 1 mm de large avec différentes profondeurs, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm comme indiqué sur la figure (2.6). Générateur PWM alimenté par une alimentation de laboratoire 15V 2A, le conducteur et bobine de captage connectés comme indiqué sur la figure (2.1) a, l'amplitude appropriée de la l'impulsion d'excitation est de 5 V [16], le cycle est de 100 ms

avec une largeur d'impulsion de 1 ms (rapport cyclique de 10 %). Cette étude expérimentale a analysé dans une première partie l'impact de la fréquence d'excitation, du rapport cyclique et Le décollage sur la force et la sensibilité du signal du capteur. De plus, la détectabilité des différentes hauteurs de fissure dans les deuxièmes parties.

2.7. Plate-forme d'expérimentation

HANTEK 1008C Oscilloscope numérique pour PC de diagnostic à 8 canaux :

Hantek 1008c est un oscilloscope à 8 canaux pour les essais de véhicules avec un échantillonnage en temps réel de 2,4 MSa/s Taux de résolution verticale de 12 bits. Fonction d'analyse de spectre, fonction carte DAQ USB 2.0 interface brancher et utiliser, et pas besoin d'alimentation supplémentaire et sensibilité d'entrée à partir de 10 mV/div à 5V/div. 1008c est parfait pour nos mesures il peut mesurer : Mesure de tension : V_{pp} , V_{amp} , V_{max} , V_{min} , V_{top} , V_{mid} , V_{base} , V_{avg} , V_{rms} , V_{crms} , Pré-test, dépassement.



Figure 2. 3. Oscilloscope HANTEK 1008c, Dso5202p.

Générateur PWM :

Le module générateur de signal PWM de style XY LPWM combine une plage de fréquence de sortie précise de 0 à 150 kHz et un cycle de service de 0 à 100%, avec des commandes à bouton poussoir et un écran LCD qui affiche la fréquence et le cycle de service, le fonctionnement de 3 à 30 v et l'amplitude des impulsions de sortie. Sortie de courant maximum 5-30 mA, interface série TTL, compatible logique 3,3 V. Toutes ces fonctionnalités font de ce module excellent choix pour mener des expériences, tester et contrôler des appareils nécessitant une entrée PWM.

L'affichage et l'interface à bouton poussoir simple facilitent le réglage. L'ajout d'un pilote de sortie lui permet de piloter de moteurs, des solénoïdes, des servos, des LED Dim et d'autres applications à impulsions.



Figure 2. 4. Module générateur XY-LPWM (fournitures de PWM signal).

Ordinateur personnel :

Nous utilisons un ordinateur personnel acer processeur Intel i3 7e génération comme unité de visualisation pour les informations traitées provenant de l'oscilloscope Hantek 1008c avec interface de visualisation du hantek 1008c.

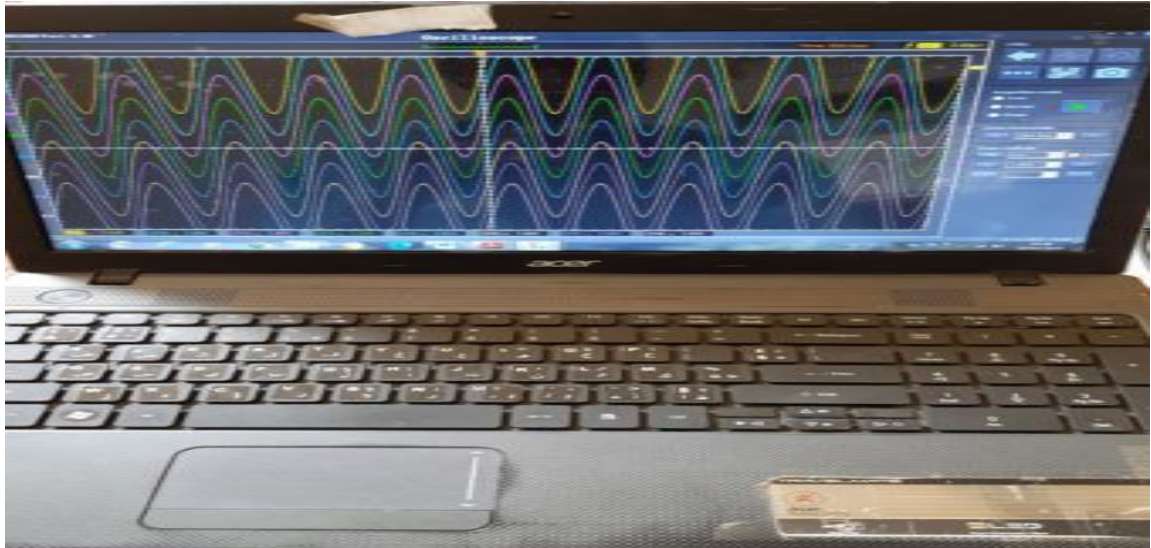


Figure 2. 5. Unité de visualisation "ordinateur personnel".

L'éprouvette d'essai :

L'éprouvette inspectée est de 445*20*10 mm pièce d'aluminium/acier avec un groupe de défauts comme indiqué sur la figure 2.6 les pieds sont à différentes hauteurs de 1 mm à 8 mm.



Figure 2. 6. Le spécimen inspecté.

2.8. Analyse des résultats expérimentaux

2.8.1. L'impact de l'amplitude d'excitation

La figure (2.7) montre la tension de détection lors de l'application d'amplitudes d'excitation (5 V), que nous avons prises comme une amplitude d'excitation appropriée de la conception proposée. Pendant une fréquence de 64 kHz, il montre de meilleurs résultats, grâce à sa capacité de détection.

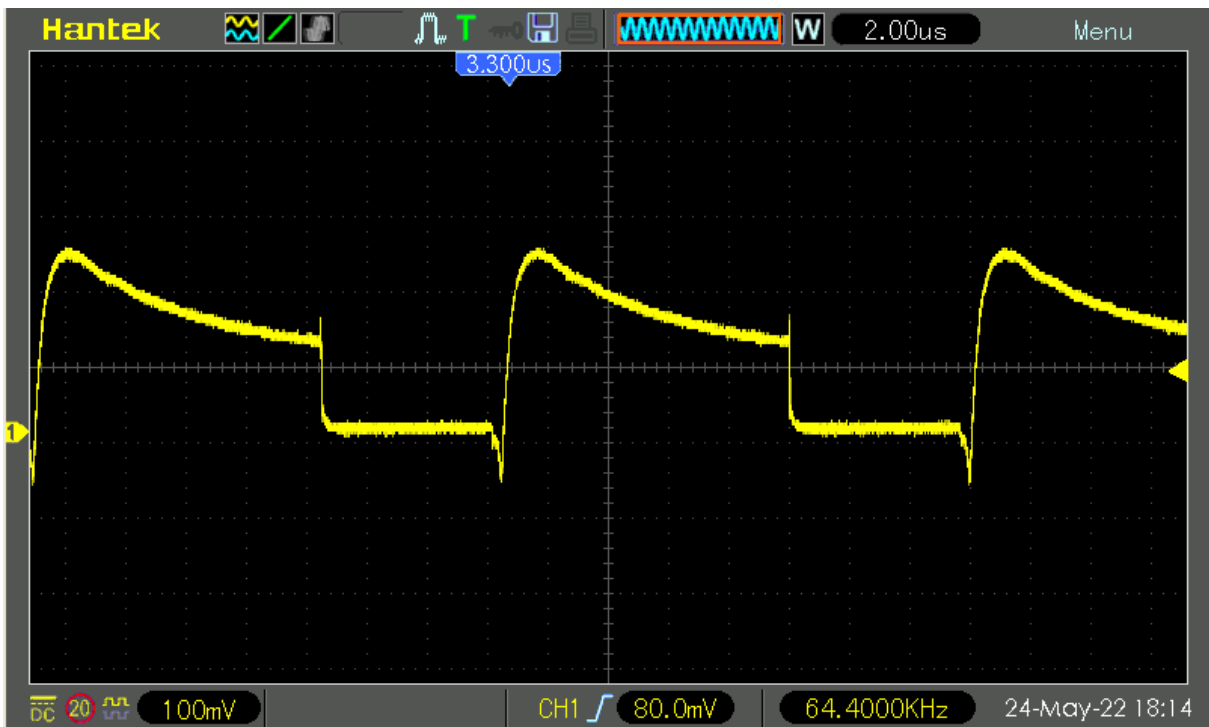


Figure 2. 7.Tension d'excitation 5 v.

2.8.2. L'impact de la fréquence d'excitation et du rapport cyclique :

La fréquence d'excitation est l'un des paramètres importants du contrôle, dans ce test nous établissons le rapport cyclique avec une valeur de 20%, l'amplitude d'excitation de l'impulsion à 5 V et la fréquence (64 kHz).

Les figures (2.8/2.9/2.10) représentent la réponse du signal de détection à différentes impulsions. Cycle de service [10%.20% et 30%] avec une amplitude de 5 V et 64 Hz à la fréquence d'excitation. Nous avons remarqué avec cette étude pilote que le rapport cyclique d'impulsion de 20 % fournit un signal plus stable qui nous permet de traiter les informations via un équipement plus simple, tandis que le rapport cyclique augmente le niveau de bruit.

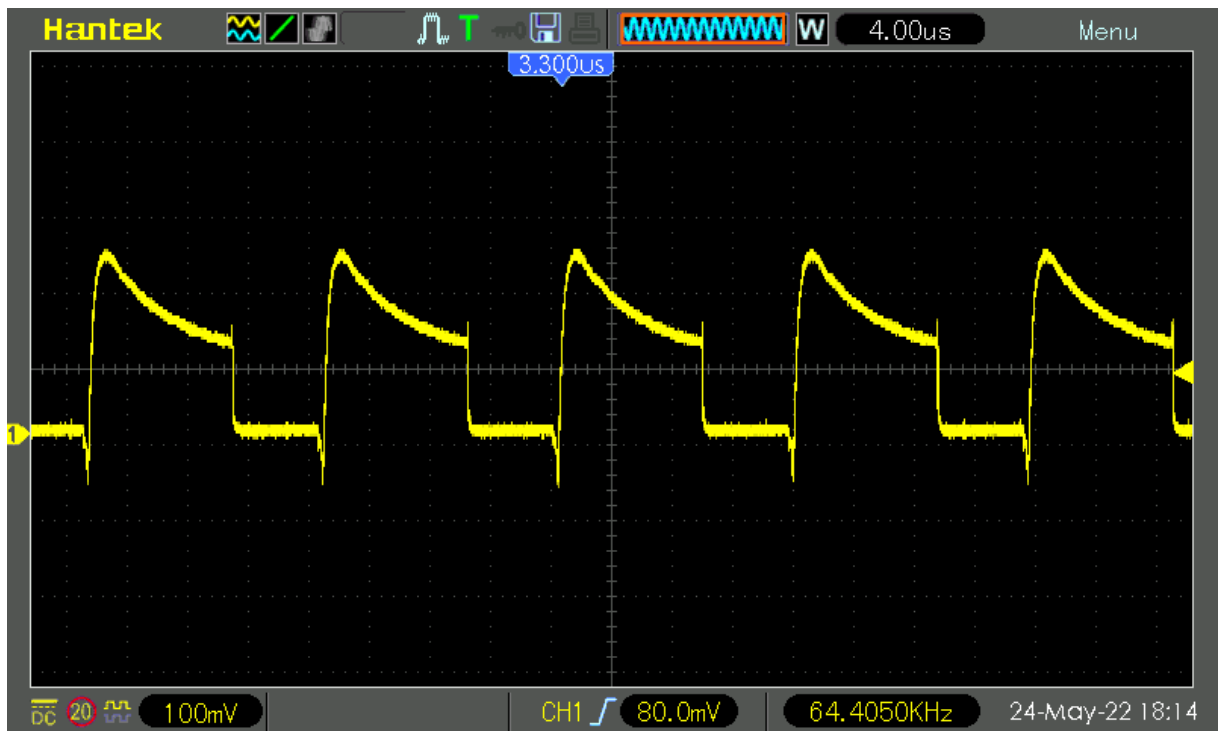


Figure 2. 8. Signal de démarrage en cycle10%.

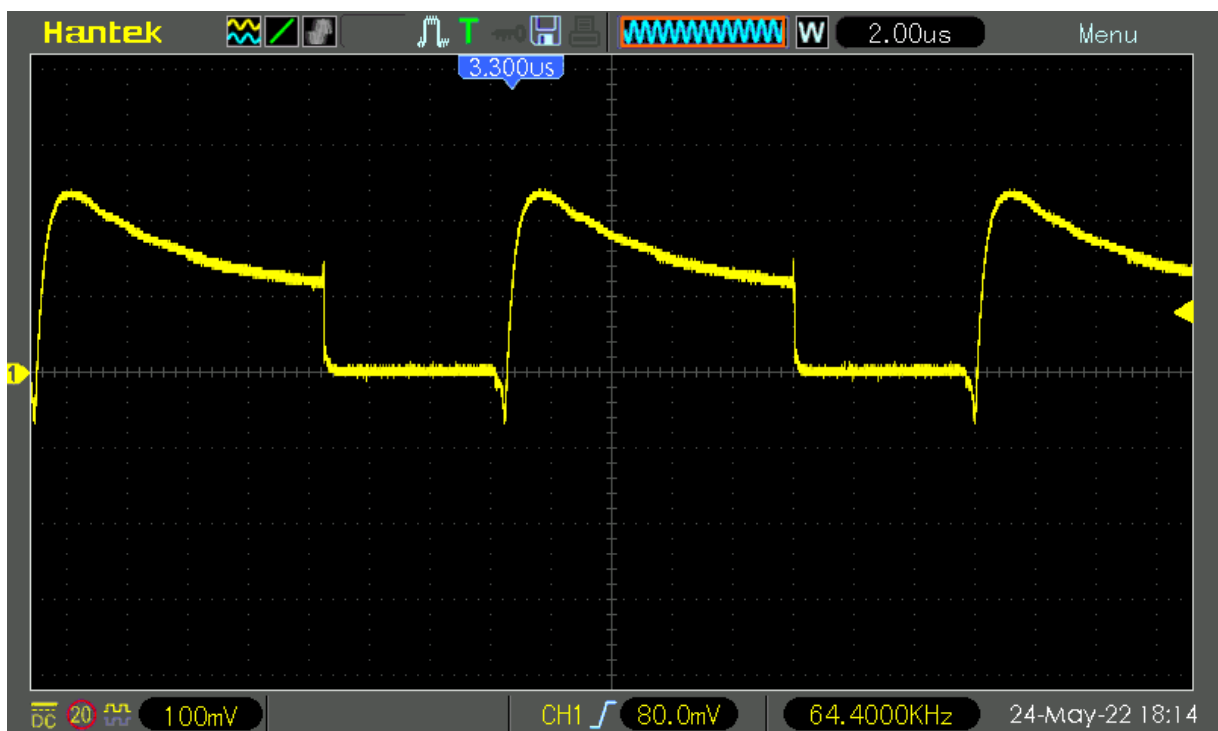


Figure 2. 9. Signal de démarrage en cycle20%.

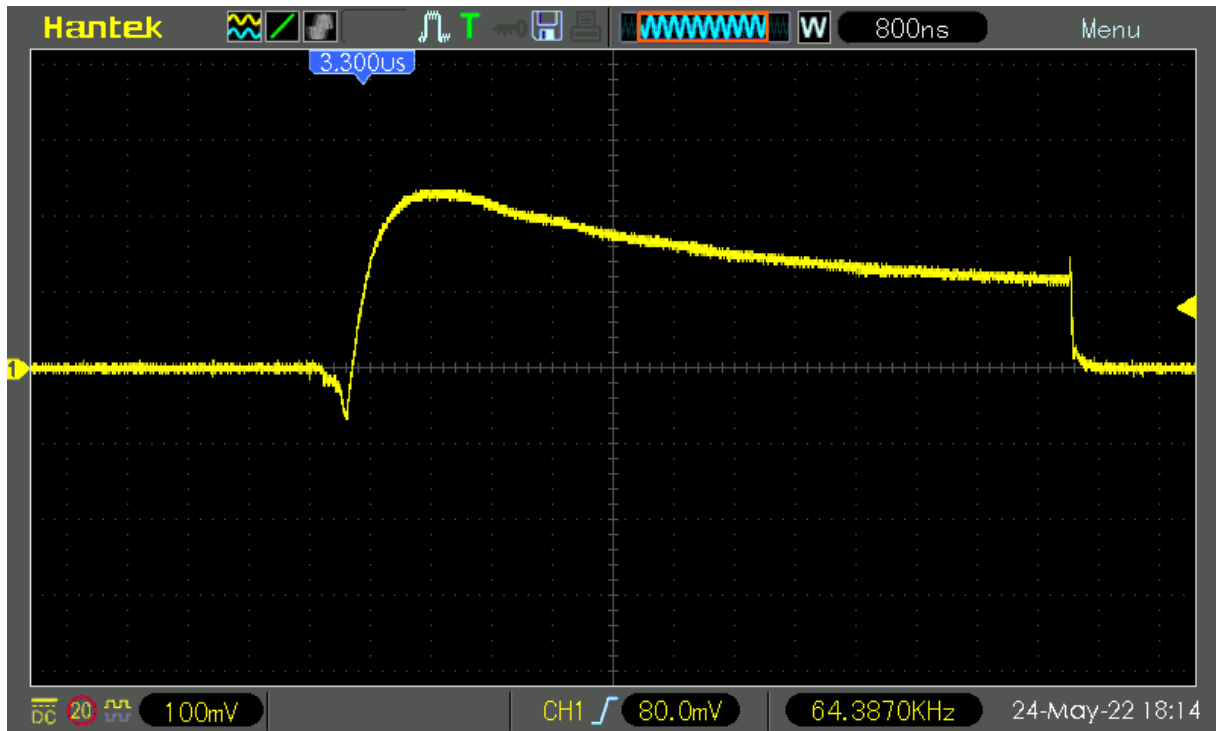


Figure 2. 8. Signal de démarrage en cycle 30%.

2.8.3. L'influence des différentes hauteurs des défauts sur la tension de démarrage

La pièce présente huit défauts de surfaces différentes de 1 mm à 8 mm par incréments de 1 mm. Nous avons pris deux échantillons différents de 6 mm (2.11) et 1 mm, (2.12) Les résultats présentés sur la figure indiquent que la tension augmente lorsque la hauteur du défaut est augmentée, une relation linéaire favorable est observée entre la hauteur du défaut et la tension de démarrage, et le capteur est sensible changer.

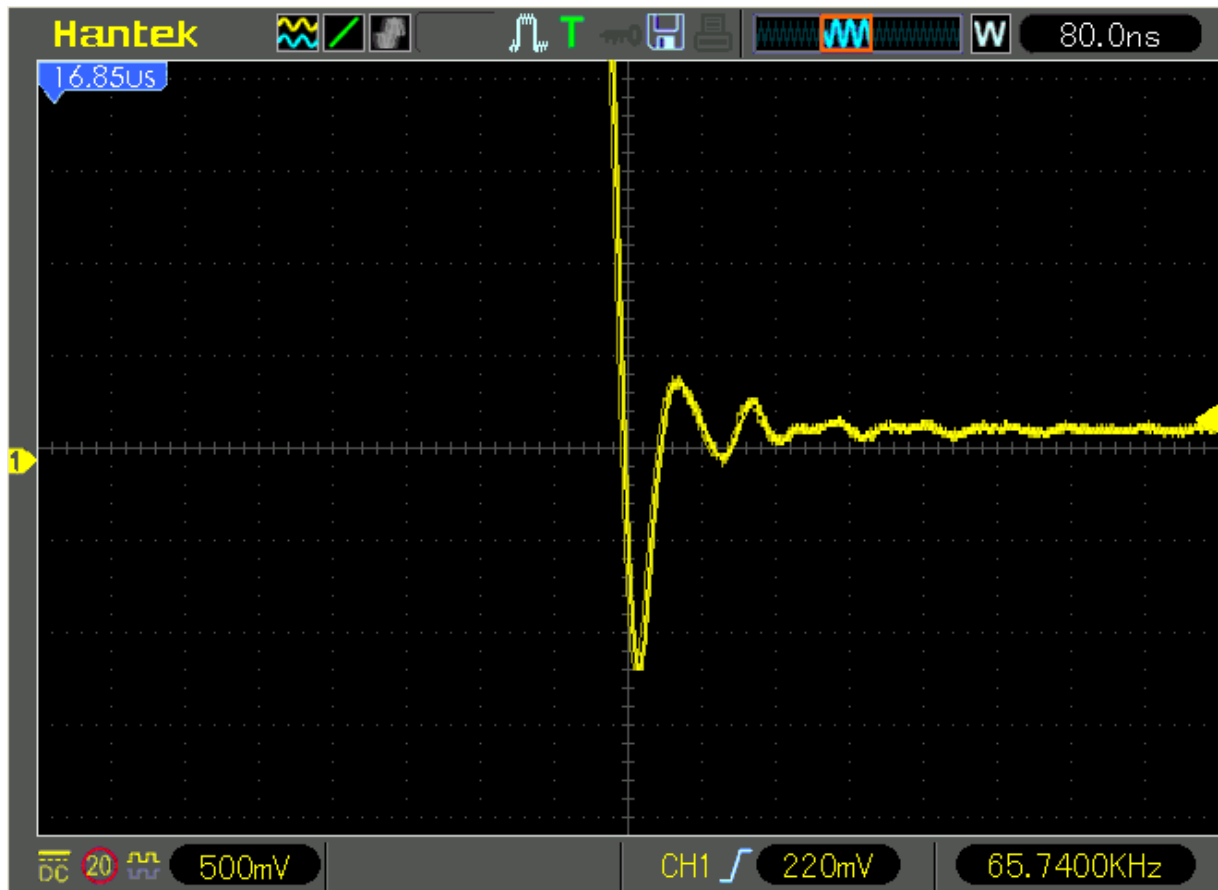


Figure 2. 9. Signal de détection à 6 mm.

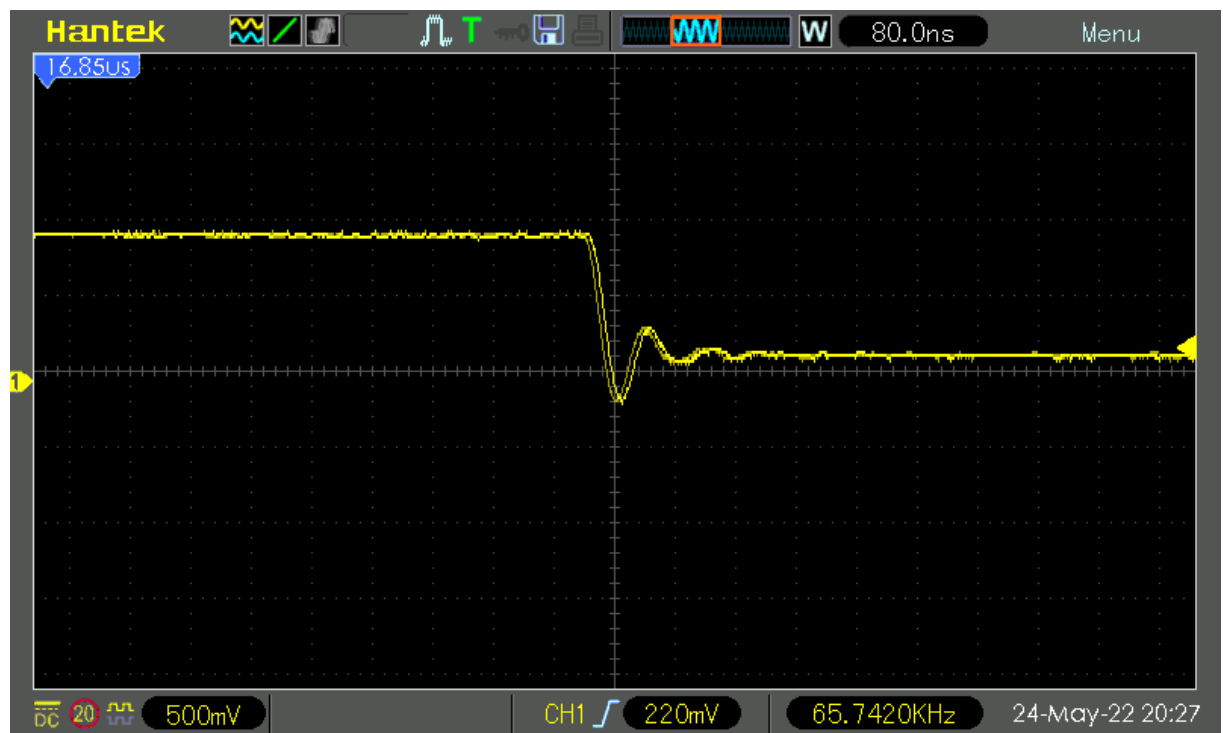
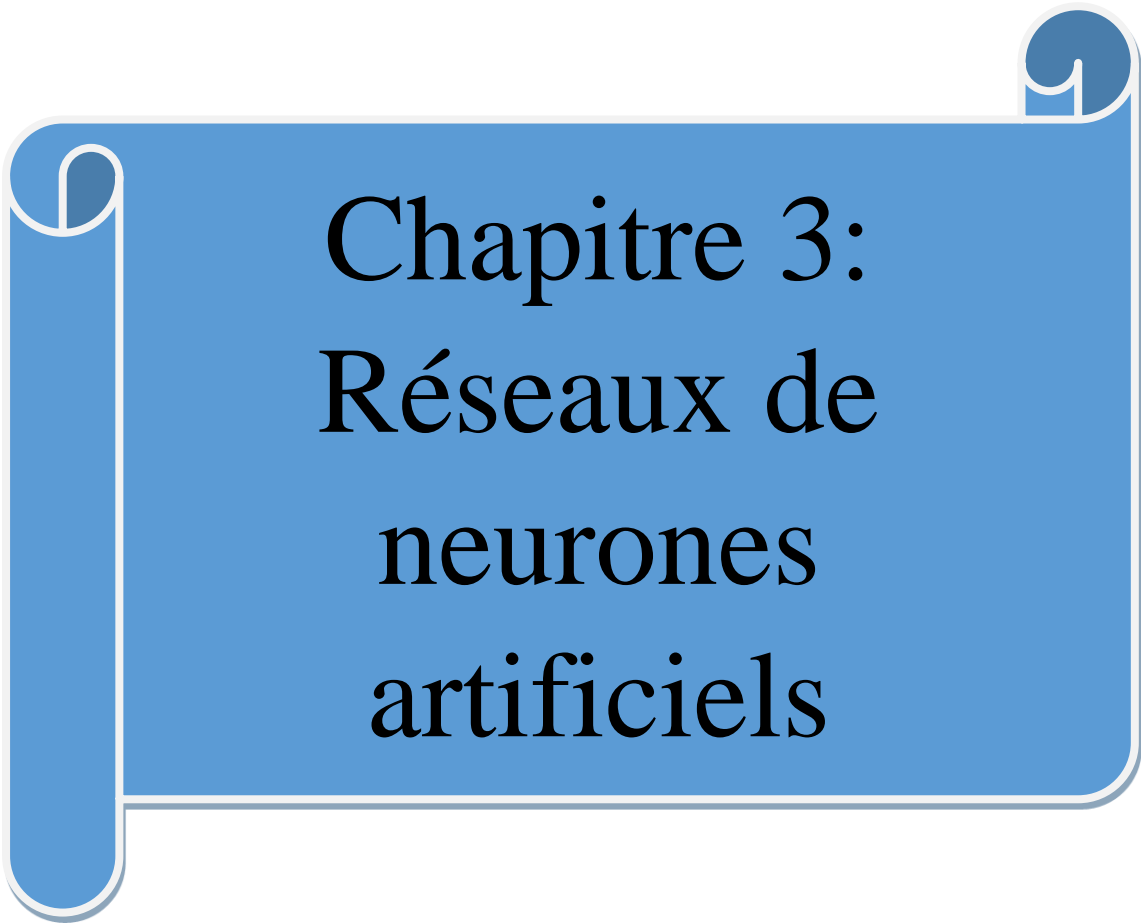


Figure 2. 10. Signal de détection à 1mm.

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous discutons de la méthode d'essai par courants de Foucault en tant que méthode efficace dans le domaine des essais non destructifs. En tant que méthode pour pénétrer les limites de l'effet de peau et la faible profondeur de pénétration en utilisant le capteur à courants de Foucault pulsés, l'étude expérimentale a montré que la fréquence d'excitation et l'amplitude des impulsions sont importantes pour la stabilité et la sensibilité du signal de détection, ce qui prouve qu'il existe une relation linéaire entre la sensibilité à la lévitation et le sensitif. Nous avons pris des échantillons de deux pièces et les avons validés à l'aide du capteur proposé, tous les travaux prouvent qu'ils ont une bonne interaction de réponse.



Chapitre 3: Réseaux de neurones artificiels

Chapitre 3: Réseaux de neurones artificiels

3.1. Introduction

La construction d'un modèle à base réseaux de neurones artificiels pour un procédé du CND courants Foucault pulsée, est de reproduire fidèlement sa réponse lors de la variation des différents paramètres (les paramètres géométriques et électriques). Ce chapitre sera consacré, entièrement, à la mise en œuvre de la procédure d'inversion retenu dans un procédé du CND. Précisément. On va présenter l'application du réseau de neurones multicouches (MLP) pour la résolution du problème inverse dans le domaine du CND. Cette modélisation concerne la caractérisation des défauts (Estimation de l'épaisseur) dans les pièces métalliques à partir des signaux issus d'un capteur courant Foucault pulsé. On peut effectuer une comparaison entre les trois modèles neuronaux. Ces derniers sont (la variation des caractéristiques du signal valeur de crête, la variation des caractéristiques temps de crête et la variation des caractéristiques temps de passage par zéro) en fonction de l'épaisseur du défaut.

3.2. Définition

L'idée générale des réseaux de neurones artificiels et de trouver une nouvelle procédure de calcul pour produire une nouvelle génération d'ordinateur. Cette idée, inspirée de la biologie du cerveau humain, est différente de la méthode conventionnelle utilisée sur les ordinateurs.

Ce nouveau technique semble plus humain que mécanique. L'homme à toujours rêver de la machine qu'est parlé, pense, oublie et se rappelle. Le but n'est pas de produire une machine humaine ce que impossible, mais de copier et imiter l'approche naturelle de cerveau humaine au profite de la science. Un RNA peut être considéré comme une boîte noire, qui reçoit des signaux d'entrée et produit des signaux de sortie c'est un modèle mathématique composé d'un grand nombre d'éléments de calculs organisée sous forme de couches interconnectées.

D'autres définitions sont données comme suite :

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau. [18]

3.3. Historique

Aujourd'hui, les réseaux de neurones sont utilisés dans de nombreux domaines à cause de leurs propriétés, en particulier leur capacité d'apprentissage.

1890 : **W. James**, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.

1943 : **J. Mc Culloch** et **W. Pitts** laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).

1949 : **D. Hebb**, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.

Le premier réseau de neurones artificiel apparaît en 1958, grâce aux travaux de Rosenblatt qui conçoit le perceptron. Ce dernier est inspiré du système visuel (en terme d'architecture neurobiologique) et possède une couche de neurones d'entrée une couche de sortie ("décisionnelle"). Ce réseau parvient à apprendre, à identifier des formes simples et à calculer certaines fonctions logiques. [19]

1969 : **M. Minsky** et **S. Papert** publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à

tout modèle de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers l'IA (Intelligence Artificielle) et les systèmes à bases de règles.

Il faudra attendre le début des années 80 pour que l'intérêt pour ce domaine soit de nouveau présent. En effet, **Hopfield** démontre en 1982 tout l'intérêt d'utiliser les réseaux récurrents (dits "feed-back») pour la modélisation des processus. Les réseaux récurrents constituent alors la deuxième grande classe de réseaux de neurones, avec les réseaux type perceptron (dits "feed-forward").

En parallèle des travaux de Hopfield, Werbos conçoit son algorithme de rétro propagation qui ne sera pourtant popularisé qu'en 1986 par **Rumelhart**. [19]

3.4. Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.
- Traitement du signal : filtrage, classification, identification de source, traitement de la parole...etc.
- Contrôle : commande de processus, diagnostic, contrôle qualité, asservissement des robots, systèmes de guidage automatique des automobiles et des avions...etc.
- Défense : guidage des missiles, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar, lidar, compression de données, suppression du bruit...etc.
- Optimisation : planification, allocation de ressource, gestion et finances, etc.
- Simulation : simulation du vol, simulation de boîte noire, prévision météorologique, copie de modèle...etc. [20]

3.5. Introduction aux réseaux de neurones biologiques

Un neurone est une cellule nerveuse dont la fonction est de transmettre un signal électrique dans certaines conditions. Il agit comme un relai entre une couche de neurone et celle qui la suit. Sa structure se compose de quatre (04) régions principales (le corps cellulaire, les dendrites,

L'axone, la synapse). [17]

3.5.1. Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone et effectue les transformations biochimiques nécessaires à la synthèse des enzymes et des autres molécules qui assurent la vie de neurone. Sa forme est pyramidale ou sphérique dans les plupart des cas. Elle dépend souvent de sa position dans le cerveau, ce corps cellulaire fait quelques microns de diamètre. [18]

3.5.2. Les dendrites

Chaque neurone possède une « chevelure » de dendrites. Celles-ci sont de fines extensions tubulaires, de quelques dixièmes de microns de diamètre et d'une longueur de quelques dizaines de microns. Elles sont les récepteurs principaux du neurone qui servent à capter les signaux qui lui parviennent. [18]

3.5.3. L'axone

L'axone, qui est à proprement parler la fibre nerveuse, sert de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone. Il se distingue des dendrites par sa forme et par les propriétés de sa membrane externe. En effet, il est généralement plus long que les dendrites, et se ramifie à son extrémité, là où il communique avec les autres neurones, alors que les ramifications des dendrites se produisent plutôt près du corps cellulaire. [18]

Pour former le système nerveux, les neurones sont connectés les uns aux autres suivant des répartitions spatiales complexes. Les connexions entre deux neurones se font à des endroits appelés synapses ou ils sont séparés par un petit espace synaptique de l'ordre d'un centième de micron. [18]

3.5.4. Les synapses

Le rôle des synapses est fondamental pour permettre aux cellules nerveuses de communiquer entre elles. Les signaux qui se propagent dans les neurones sont de nature électrique. Cependant, il n'existe pas de liaisons directes entre deux cellules nerveuses. Celles-ci sont séparées par un espace appelé fente synaptique que l'influx électrique ne peut traverser. Le relais s'effectue à ce niveau par l'intermédiaire d'un médiateur chimique. [18]

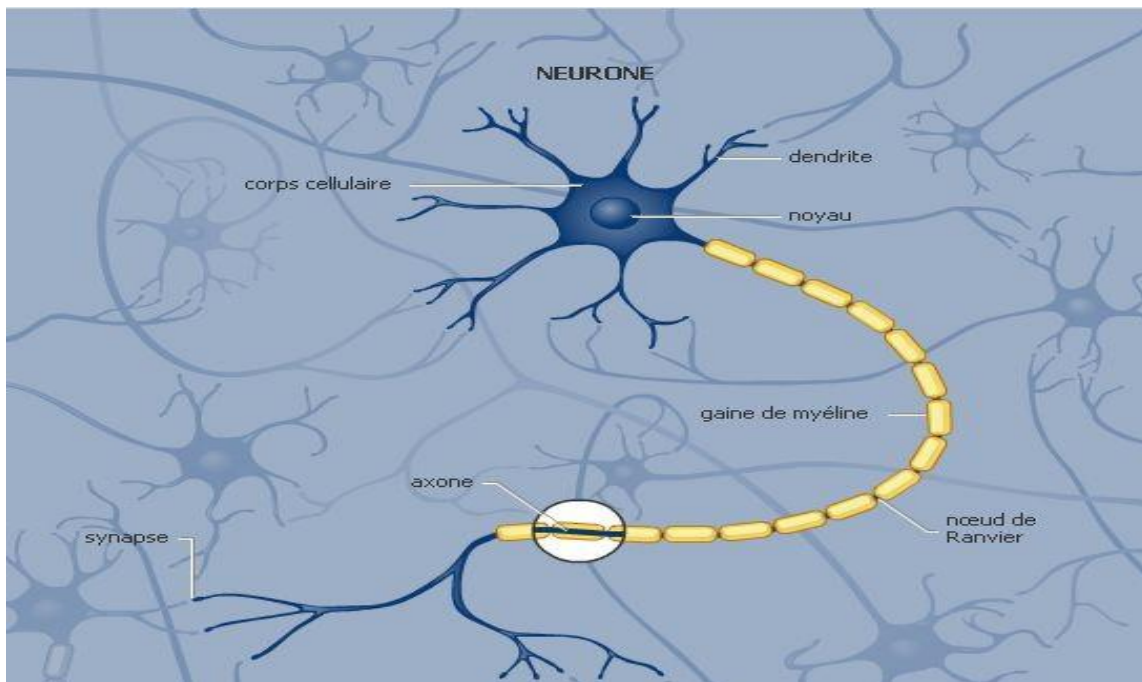


Figure 3.1 .Modèle d'un neurone biologique.

3.6. Neurone formel

Le neurone formel figure (2) est une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même « valeur » (les connexions entre les neurones étant plus au moins fortes), les chercheurs ont donc créé un algorithme qui pondère la somme de ses entrées par des poids synaptiques (coefficients de pondération). En général, un neurone formel est un élément de traitement possédant n entrées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie y_i le résultat d'une fonction de seuillage f (dite aussi la fonction d'activation) de la somme pondérée. [19]

Neurone biologique	Neurone artificiel (formel)
Axones	Signal d'entrée
synapses	Poids de la connexion
dendrites	Signal de sortie

Tableau 3.1 .correspondance neurone biologique/neurone artificiel.

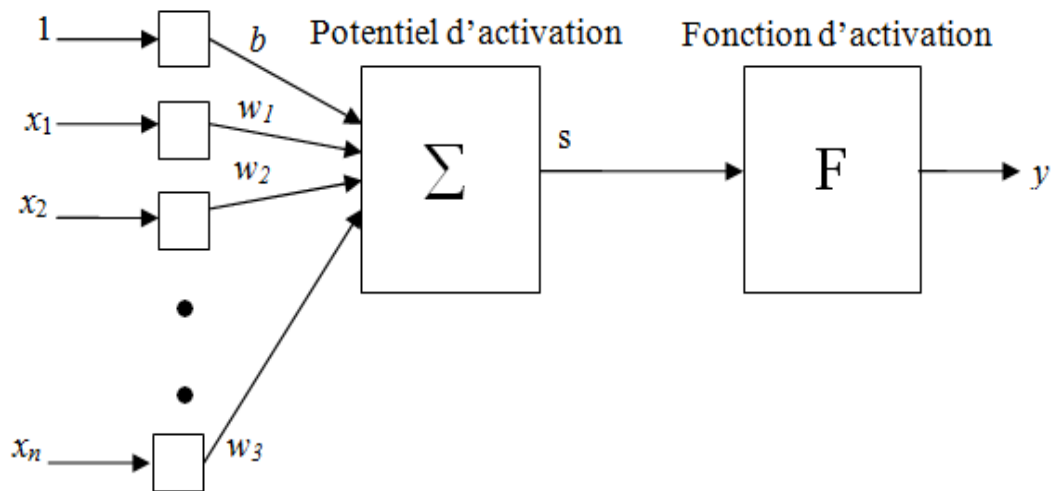


Figure 3. 2 .Modèle d'un neurone formel.

Avec :

- Les x_i sont les entrées du réseau.
- S est le potentiel d'activation.
- Les W_i représentent les poids synaptiques.
- y_i la sortie du réseau tels que :

$$y = f(s) ; s = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i + b$$

3.7. Fonction d'activation

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non linéarité dans le fonctionnement du neurone. Les fonctions de seuillage présentent généralement trois intervalles : En dessous du seuil, le neurone est non actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1). Aux alentours du seuil, une phase de transition. Au-dessus du seuil, le neurone est actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 1). [21], (Le tableau 3.2) englobe l'ensemble des fonctions d'activations qui sont généralement utilisées.

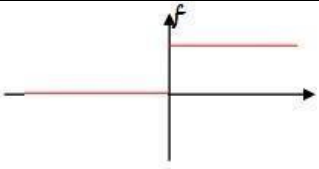
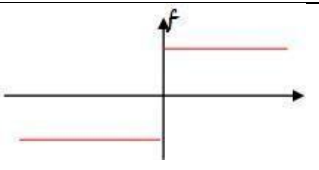
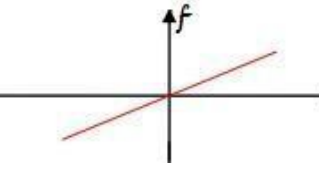
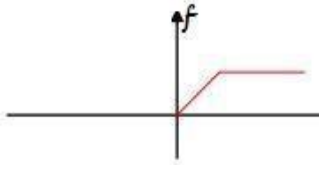
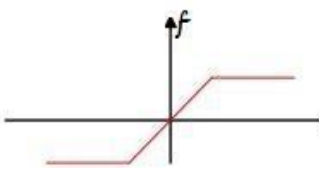
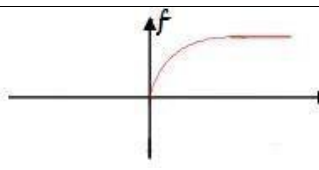
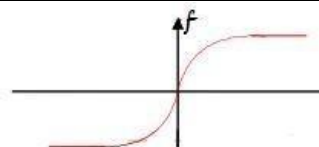
Nom de la fonction	Type	Equation	Allure	Nom Matlab
Seuil	Binaire (fonction de Heaviside)	$f(x) = 0$ si $x < 0$ $f(x) = 1$ si $x \geq 0$		<i>Hardlim</i>
	Signe	$f(x) = 1$ si $x > 0$ $f(x) = -1$ si $x \leq 0$		<i>Hardlims</i>
Linéaire	Identité	$f(x) = x$		<i>Purelin</i>
	Saturé positif	$f(x, k) = 0$ si $x < 0$ $f(x, k) = 1$ si $x \geq 1/k$ $f(x, k) = kx$ sinon		<i>Satlin</i>
	Saturé symétrique	$f(x, k) = 1$ si $x < -1/k$ $f(x, k) = -1$ si $x \geq 1/k$ $f(x, k) = kx$ sinon		<i>Satlins</i>
Sigmoide	Positive (type logistique)	$f(x, k) = \frac{1}{1 + e^{-ks}}$		<i>Poslin</i>
	Symétrique (type tanh)	$f(x, k) = \frac{2}{1 + e^{-ks}}$		<i>Logsig</i>

Tableau 3. 2 .Fonctions d'activation.

3.8. Les différents types de réseaux de neurones Artificiels

3.8.1. Les réseaux statiques ou réseau à couche (FEED FORWARD)

Appelés aussi réseaux « proactifs » ou « de type perceptron » ou « feed-forward ». Un Réseau non bouclé se caractérise par la propagation des signaux dans un seul sens, de La couche d'entrée vers la couche de sortie, sans utilisation d'aucune boucle de rétroaction. Il est généralement statique car les entrées et les sorties sont indépendantes du temps.

Ce type de RNA est utilisé principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire, de classification ou de modélisation de processus statiques non linéaires. [22]

3.8.2. Les réseaux de neurones bouclés

Les réseaux « récurrents » ou bien « feed-back » se caractérisent par la présence, au moins, d'une boucle de rétroaction des neurones de sorties vers les neurones d'entrée. Ces réseaux sont dynamiques ; ils régissent par des équations aux différences non linéaires à cause des retards associés aux connexions Ils sont utilisés fréquemment à l'affectation des tâches de modélisation de systèmes dynamiques, de commande de processus, ou de filtrage. [22]

3.8.3. Les réseaux de neurones convolutifs(CNN)

Les réseaux de neurones convolutifs (ConvNets) sont des outils largement utilisés pour l'apprentissage en profondeur. Ils sont particulièrement adaptés aux images en tant qu'entrées, bien qu'ils soient également utilisés pour d'autres applications telles que le Texte, les signaux et d'autres réponses continues. Ils diffèrent des autres types de réseaux de neurones de plusieurs façons [23]. Les réseaux de neurones convolution els sont inspirés de la structure biologique d'un cortex visuel, qui contient des arrangements de cellules simples et complexes [24]. Ces cellules s'activent en fonction des sous-régions d'un champ visuel. Ces sous-régions sont appelées champs réceptifs. Inspirés des résultats de cette étude, les neurones dans une couche convolutive se connectent aux sous-régions des couches avant cette couche au lieu d'être entièrement connectés comme dans d'autres types de réseaux neuronaux.

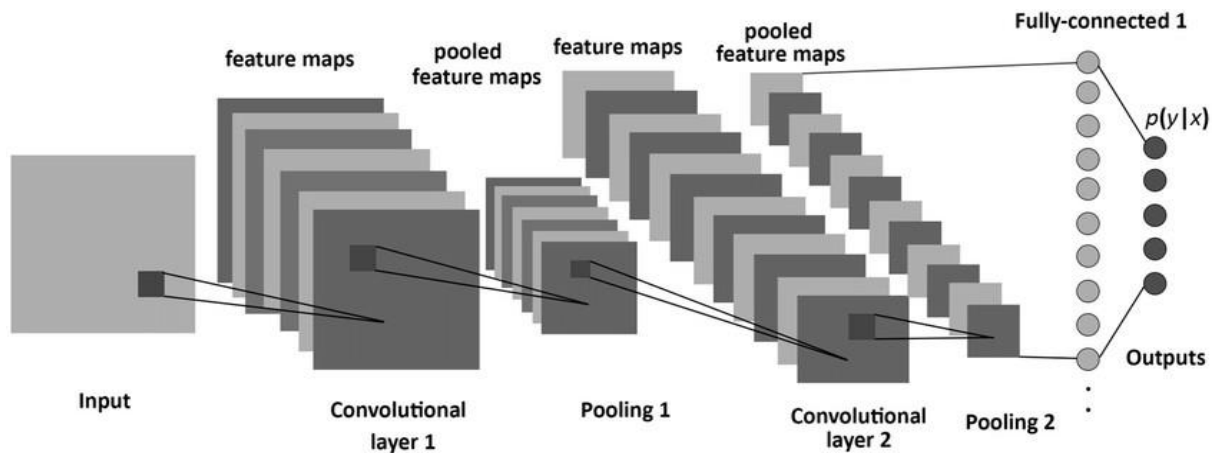


Figure 3. 3 . Structure d'un réseau CNN.

3.9. L'Apprentissage des Réseaux de Neurones

Il existe quatre types d'apprentissages principaux :

3.9.1. Apprentissage supervisé

Pour les réseaux à apprentissage supervisé, on présente au réseau des entrées, et au même temps les sorties désirées pour cette entrée. Le réseau doit ajuster ses poids de façon à réduire l'écart entre la réponse désirée et la sortie du réseau. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait. L'algorithme le plus utilisé est celui de la rétro propagation de l'erreur. [25]

3.9.2. Apprentissage non supervisé

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé, aucune information sur la réponse désirée n'est fournie au réseau. On présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise. Ce comportement est connu sous le nom "auto organisation". [25]

3.9.3. Apprentissage par renforcement

Est une approche utilisée dans les problèmes de planification à travers le temps. Elle utilise deux réseaux : un réseau d'action et un réseau d'évaluation qui joue le rôle d'un superviseur et qui génère un signal d'avertissement à chaque fois que les actions prises sont

mauvaises. Ce signal sert à entraîner le réseau d'action. Les poids du réseau d'évaluation sont altérés dans le sens de renforcer les bonnes actions et de sanctionner les mauvaises. [19]

3.9.4. Apprentissage semi-supervisé

L'apprentissage semi-supervisé est un type de technique d'apprentissage automatique. Il se situe entre l'apprentissage supervisé et non supervisé, c'est-à-dire que l'ensemble de données est partiellement étiqueté.

3.10. Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones

Avantages

Sont les suivants [26] :

- Le parallélisme de leur structure, leur adaptabilité ainsi que dans leur mémoire distribuée.
- Les réseaux de neurones sont en fait des « approximateurs universels ». Leur utilisation permet de passer les données directement au prédicteur, sans intervention, sans recodage, sans discrétisation, sans simplification ou interprétation douteuse.
- Un réseau de neurones a également une grande résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- L'idée d'apprendre est plus facile à comprendre.
- Les réseaux de neurones sont capables d'analyser les relations spatiales et topologiques.
- Les régressions sont effectuées sur des fonctions de dépendance simples (linéaires, logarithmiques) qui ne sont pas toujours très réalistes.
- Un réseau de neurones bien conçu est capable de présenter n'importe quelle dépendance fonctionnelle et d'extraire des données sans modèle préconçu.

Les inconvénients

Sont les suivants [26] :

- Un réseau de neurones ne dispense pas de bien connaître son problème, de définir ses classes avec pertinence, de ne pas oublier de variables importantes,...
- Un réseau de neurones est une "boîte noire" qui justifie pas ses décisions.

—Les réseaux de neurones ont une très forte capacité de prédiction statistique, mais ils sont totalement impossibles à inspecter.

3.11. Types de perceptron

3.11.1. Perceptron simple

Le perceptron monocouche est le premier modèle neuronal proposé créé. Le contenu de la mémoire locale du neurone est constitué d'un vecteur de poids. Le calcul d'un perceptron d'une seule couche est effectué sur le calcul de la somme des vecteurs d'entrée chacun avec la valeur multipliée par l'élément correspondant du vecteur de poids. La valeur affichée dans la sortie sera l'entrée d'une fonction d'activation [27] (voir Figure 3.4).

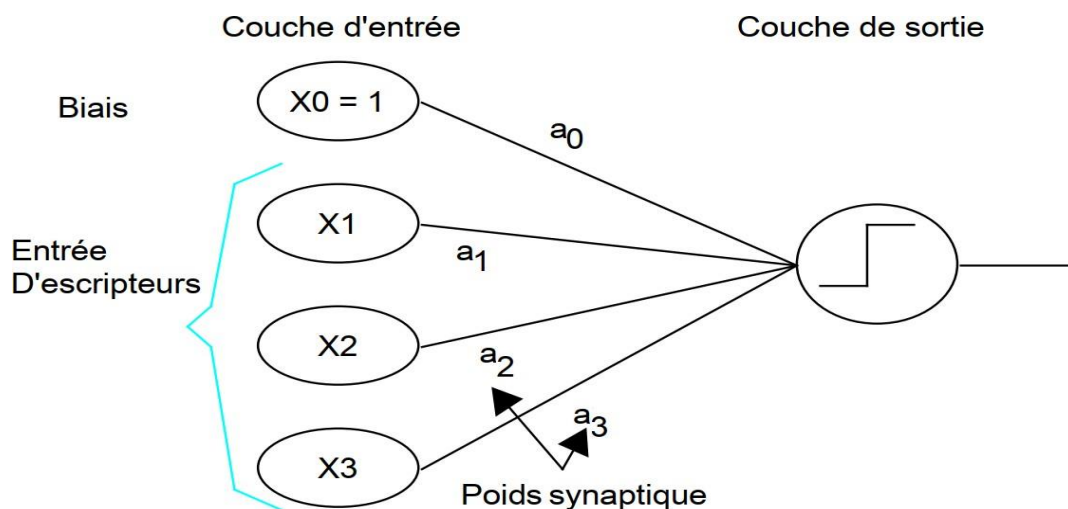


Figure 3.4. Perceptron simple.

3.11.2. Perceptron multicouches (MLP)

Est un type de réseau neuronal à rétroaction qui se caractérise par une couche d'entrée, un certain nombre de couches intermédiaires et une couche de sortie, qui sont entièrement connectées. Un MLP utilise la rétro propagation pour la formation. Le terme feed-forward fait référence à l'architecture en couches du réseau, en particulier au fait qu'il n'y a pas de

cycles dans le réseau. La structure des canapés garantit qu'il n'y a pas de cycles, car les canapés ne peuvent avoir que des poids de la couche directement précédente. Le terme entièrement La connectivité fait référence au fait que tous les nœuds d'une couche donnée ont un poids sur tous les nœuds de la couche précédente dans le MLP. [27]

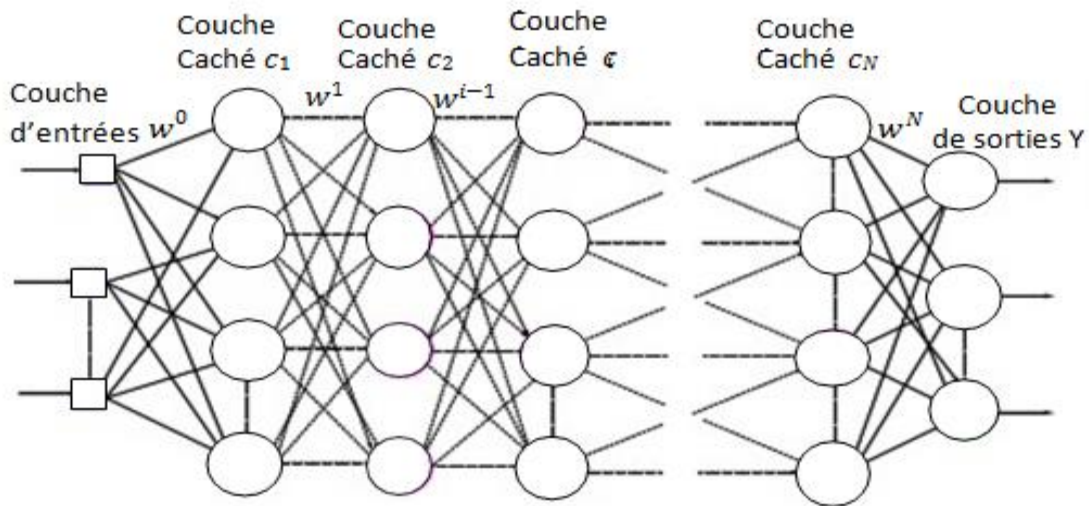


Figure 3. 5 .Perceptron multicouches.

3.12. Création d'une base de validation

Pour créer le modèle MLP d'un procédé du CND courants Foucault pulsée au moyen des réseaux de neurones on choisit une base de données caractérisée, dans notre cas, par les paramètres électriques (valeur de crête, temps de crête, temps de passage par zéro), et l'épaisseur du défaut. Dans une deuxième étape on sépare la base d'apprentissage et celle de test, puis on fait l'entraînement d'un réseau de neurones sur la base d'apprentissage avec l'algorithme de rétro propagation et finalement on mesure la performance du modèle obtenu avec la base de test.

3.12.1. Choix de la base de données

La gamme des différents paramètres appliqués sur un procédé du CND à courant Foucault pulsé sont présentés sur les figures ci-dessous [28]:

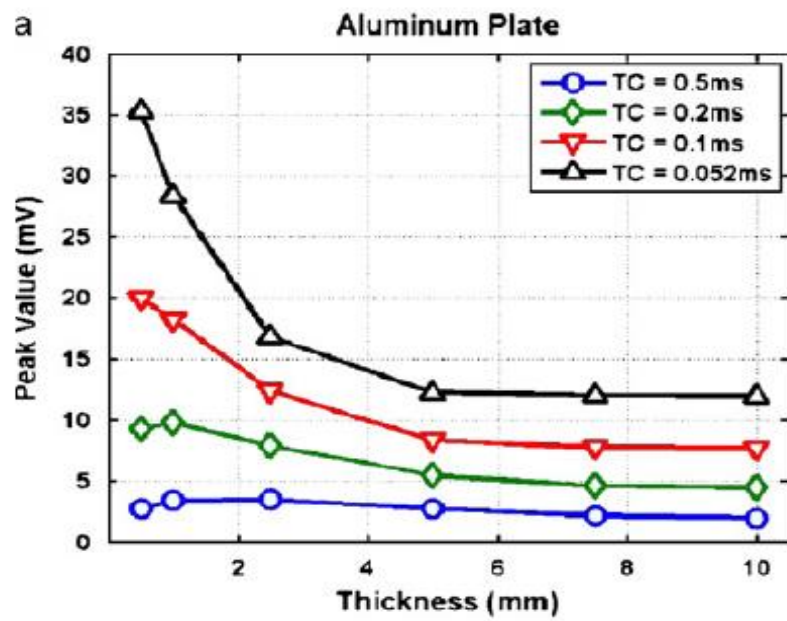


Figure 3. 6 .Variation des caractéristiques du signal (a). [28]

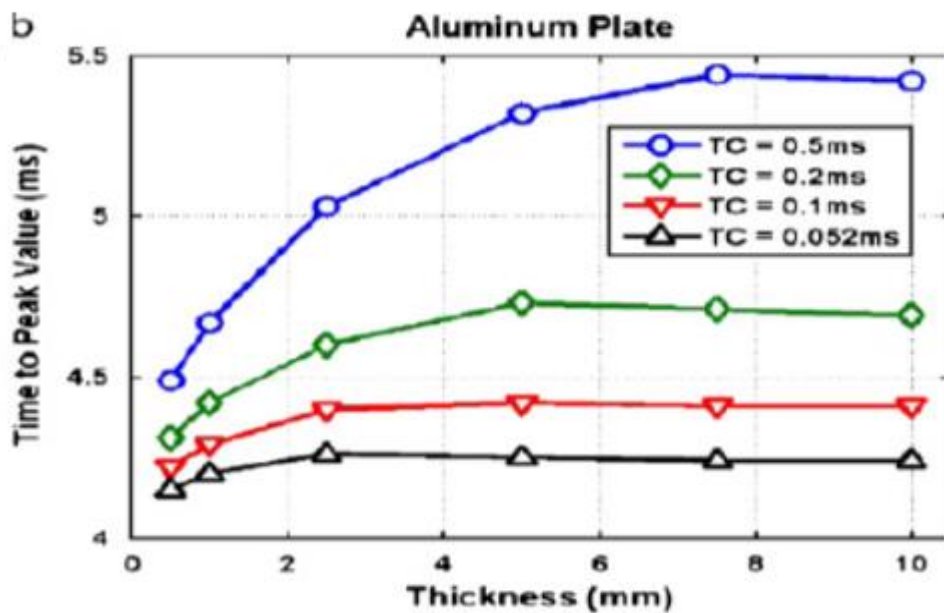


Figure 3. 7 .Variation des caractéristiques du signal temps de crête. [28]

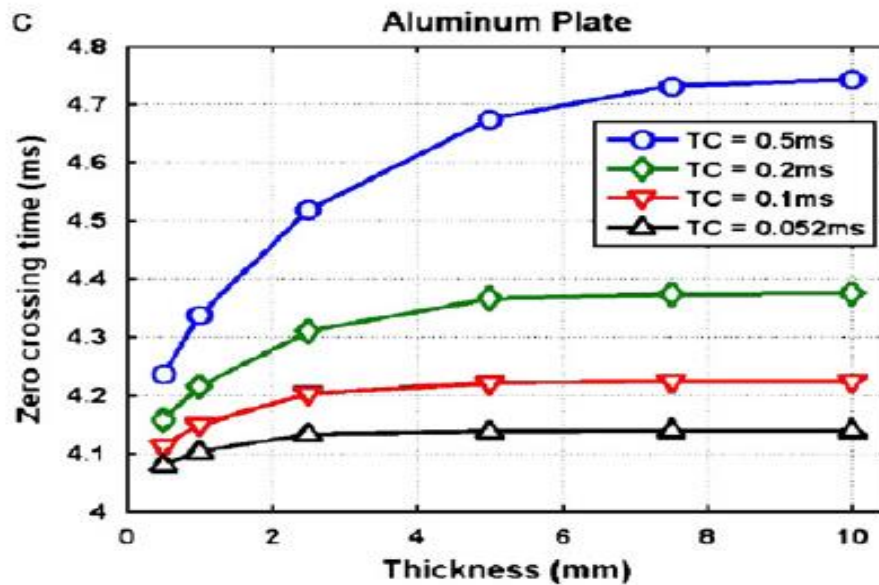


Figure 3. 8. Variation des caractéristiques du signal temps de passage par zéro. [28]

3.12.2. Création d'une base de validation

Comme son nom l'indique cette base de données est utilisée pour tester « valider » les résultats obtenus après l'apprentissage. On doit noter ici qu'il n'y a pas de règles précises concernant cette séparation, néanmoins, d'une manière générale la base de test représente entre 10% et 25% de la base de données, suivant le problème étudié. Les deux bases de données ainsi obtenues par cette séparation doivent impérativement couvrir l'espace de fonctionnement. Dans notre cas, l'épaisseur du procédé du CND courants Foucault pulsée, varie entre 0 mm et 10 mm, alors les deux bases englobent des différentes valeurs distribuées au long de cet intervalle, le même principe est appliqué ou autre paramètres. La base d'apprentissage est 75% de la base de données, quand à la base de test elle est composée de 25% de la base de données. Il est important de ne pas utiliser aucun élément de la base de test pendant toute la durée de l'apprentissage. Cette base est réservée uniquement à la mesure finale de la performance. Autrement dit, elle sert à vérifier si le réseau de neurones a une bonne performance sur les exemples qu'il n'a pas appris « base de test ». Avec les réseaux de neurones, il existe toujours le risque de sur-apprentissage, c'est-à-dire, quand le réseau a pris trop de paramètres pour représenter une fonction qui n'est pas très complexe. La base de validation permet de mettre en évidence le problème s'il se présente. Le sur apprentissage se traduit par une augmentation de l'erreur sur la base de validation [29].

3.13. Résultat et discussion

3.13.1. Phase d'apprentissage

Comme nous avons vu précédemment, l'apprentissage nécessite une base de données et une base de tests, et le nombre de couches et des neurones utilisés dans chaque couche. Le bon choix, de type des fonctions d'activations et du nombre d'itérations nécessaires pour avoir le seuil d'estimation voulue « S » qui représente la valeur minimale de l'erreur quadratique moyenne «EQM»

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Qu'on désire obtenir, est aussi nécessaire pour faire notre apprentissage. La figure (3.9) représente l'organigramme qui interprète notre programme structuré en Matlab.

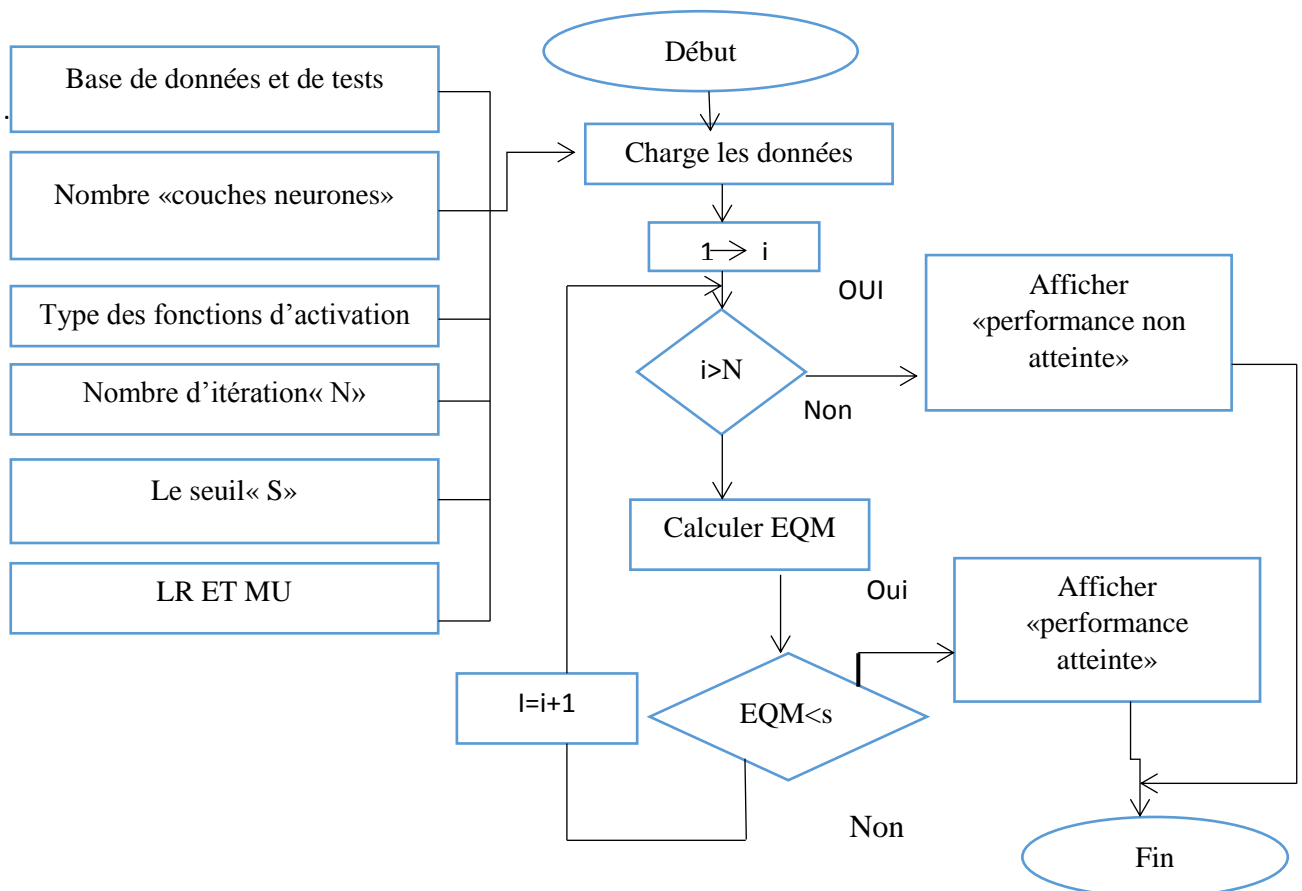


Figure 3. 9 .Organigramme pour le programme d'apprentissage.

Dans la couche cachée, On peut travailler une comparaison entre les trois modèles des neuronaux.

3.13.2. Modèle N° 1 (valeur de crête)

Les trois modèles des fonctions (valeur de crête, temps de crête, temps de passage par zéro) à cet exemple qui on a choisi le nombre des neurones dans la couche cachée de 1 à 20 neurones et on a effectué 200 apprentissages avec chaque fois une initialisation différente pour chaque une de ces architectures, puis on a sauvegardé la valeur des poids synaptiques qui donne le minimum de MSE sur la base d'entraînement.

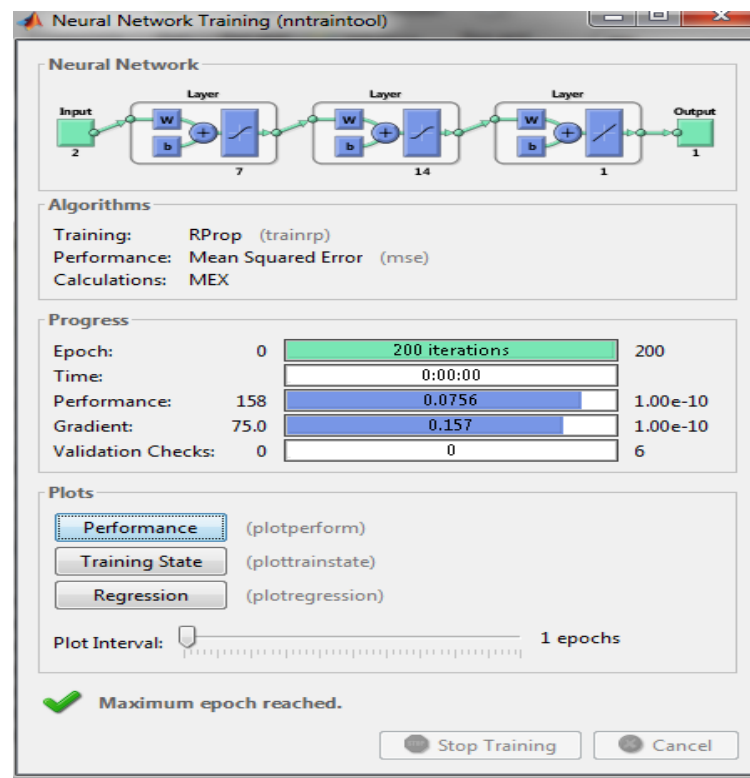


Figure 3. 10 .Interface de l'entraînement du MLP pour le premier modèle.

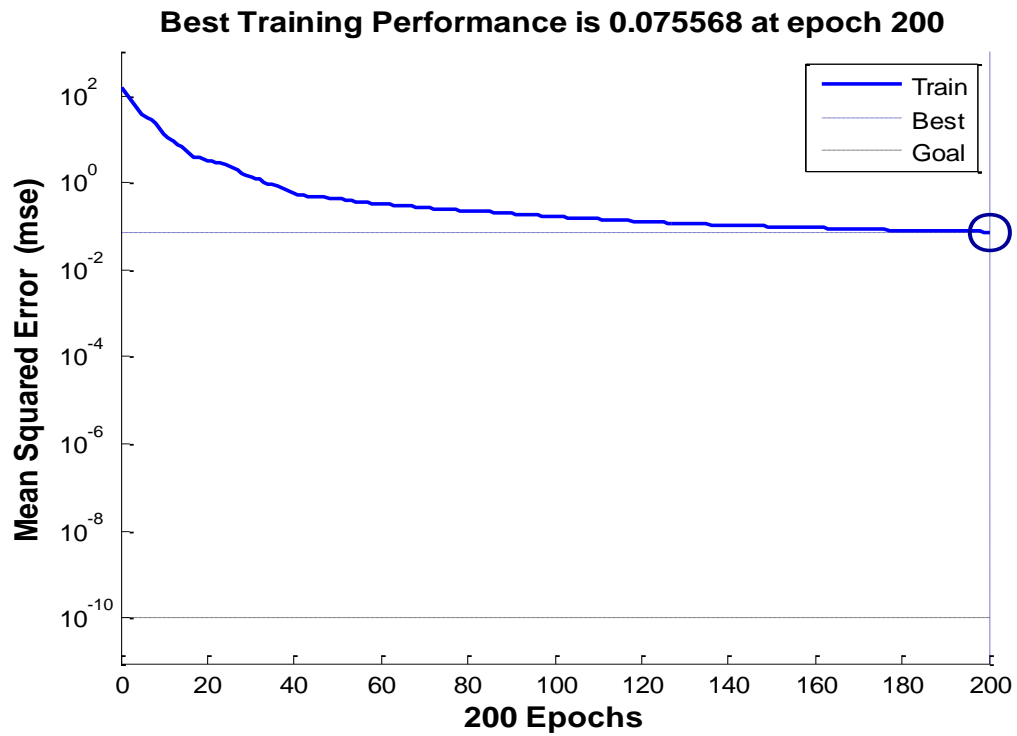


Figure 3. 11 .EQM en fonction du nombre d'itérations pour le premier modèle.

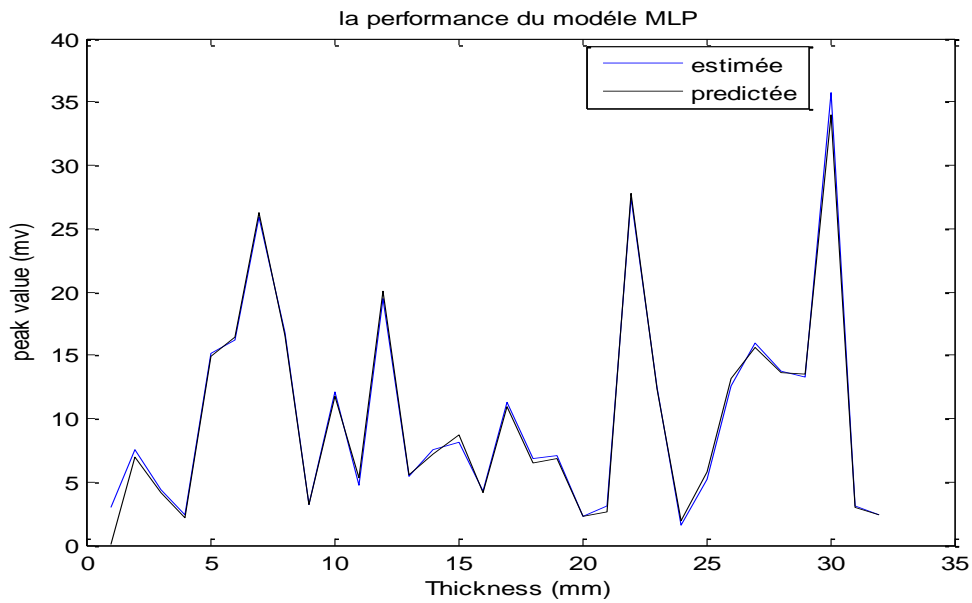


Figure 3. 12 .La performance du modèle MLP pour le premier modèle.

3.13.3. Modèle N° 2 (temps de crête)

La même simulation pour le deuxième modelé :

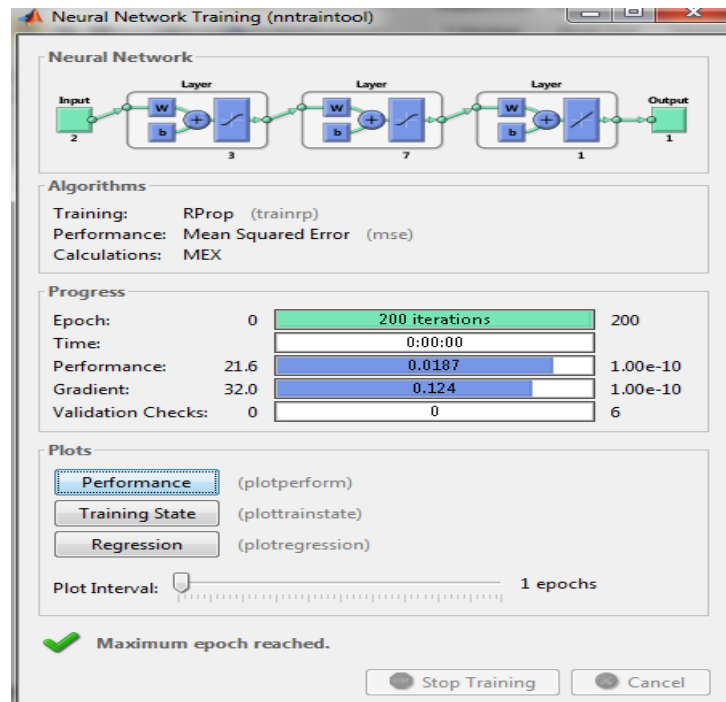


Figure 3. 13. Interface de l'entraînement du MLP pour le deuxième modèle.

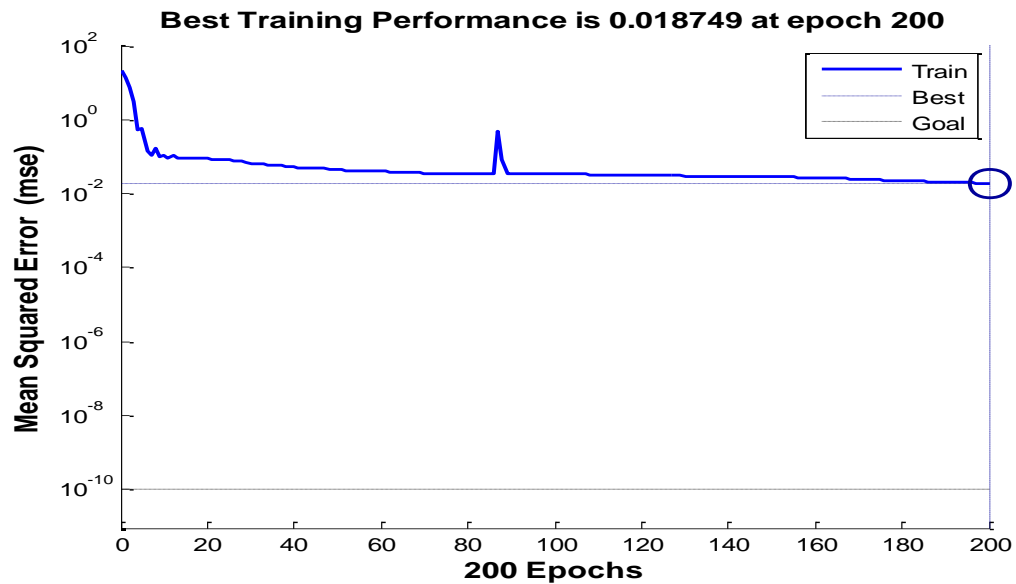


Figure 3. 14. EQM en fonction du nombre d'itérations le deuxième modèle.

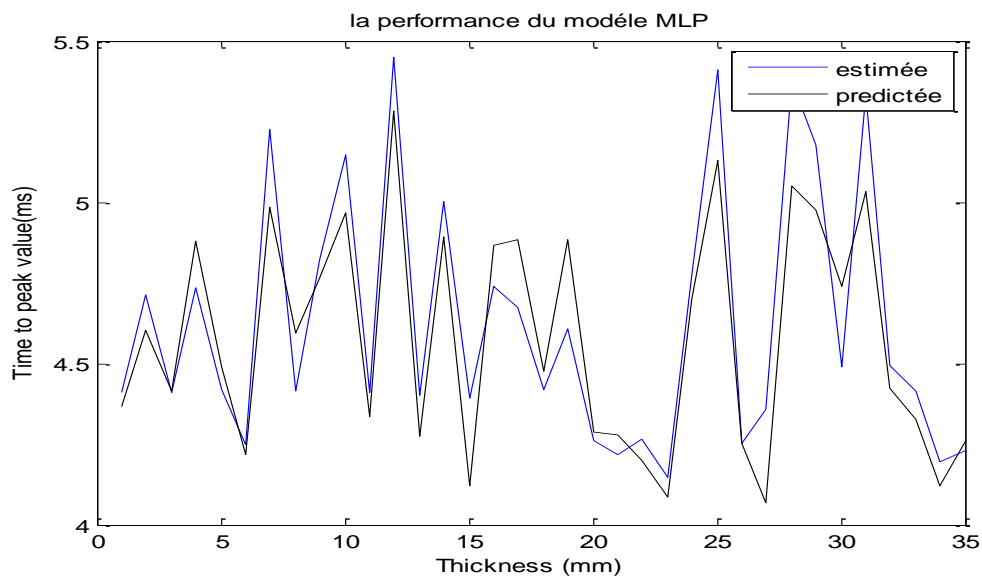


Figure 3.15 .La performance du modèle MLP pour le deuxième modèle.

3.13.4. Modèle N° 3 (temps de passage par zéro)

La même simulation pour le troisième modelé :

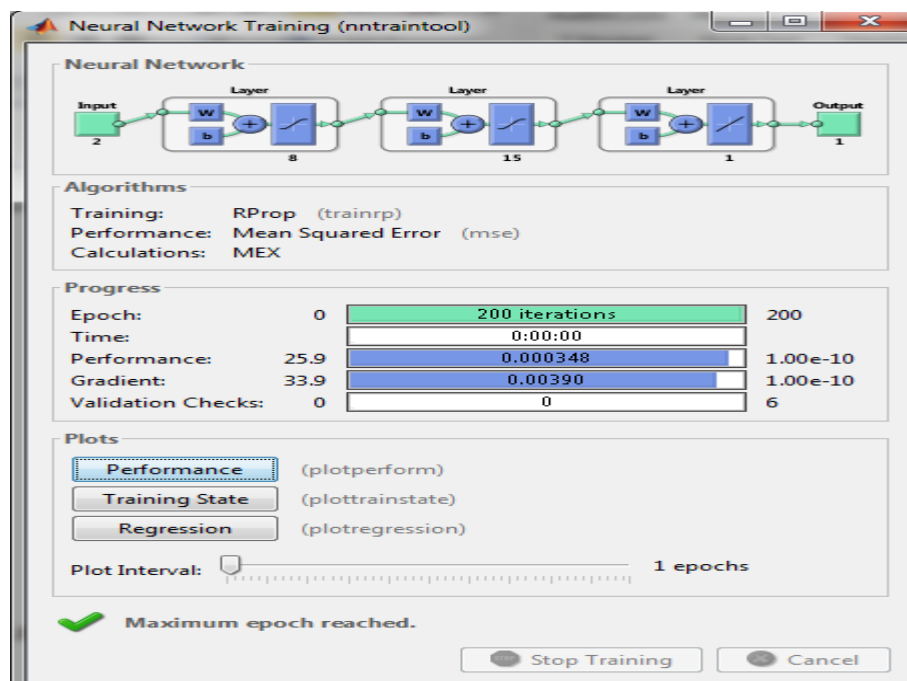


Figure 3.16 .Interface de l'entraînement du MLP pour le troisième modèle.

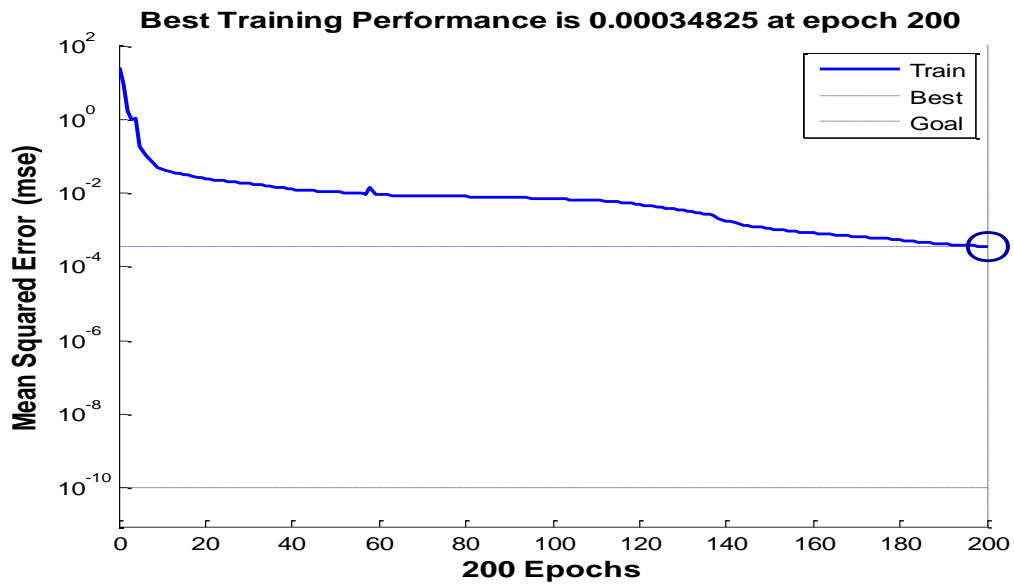


Figure 3. 17 .EQM en fonction du nombre d'itérations le troisième modèle.

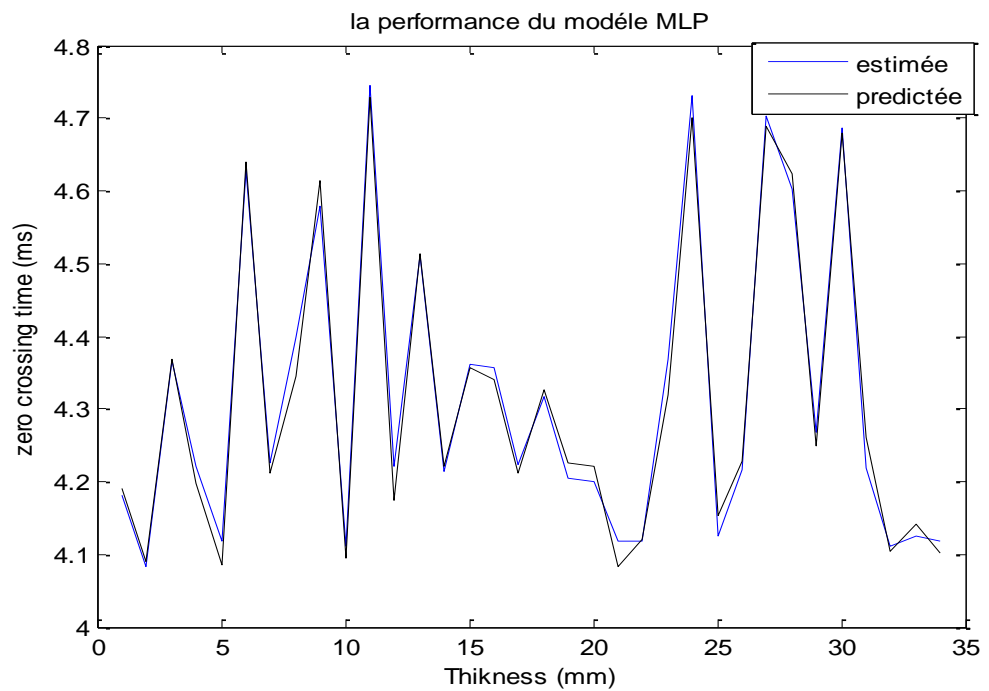


Figure 3. 18 .La performance du modèle MLP pour le troisième modèle.

3.13.5. Mesure de la performance du modèle obtenu

De même pour les choix des types des fonctions d'activations, nombre maximum d'itération et l'EQM. Le test et l'observation, de la variation de l'erreur, pour des différentes valeurs est la solution pour avoir les meilleurs résultats. Afin d'évaluer l'influence du seuil S sur le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir EQM (validation et test).

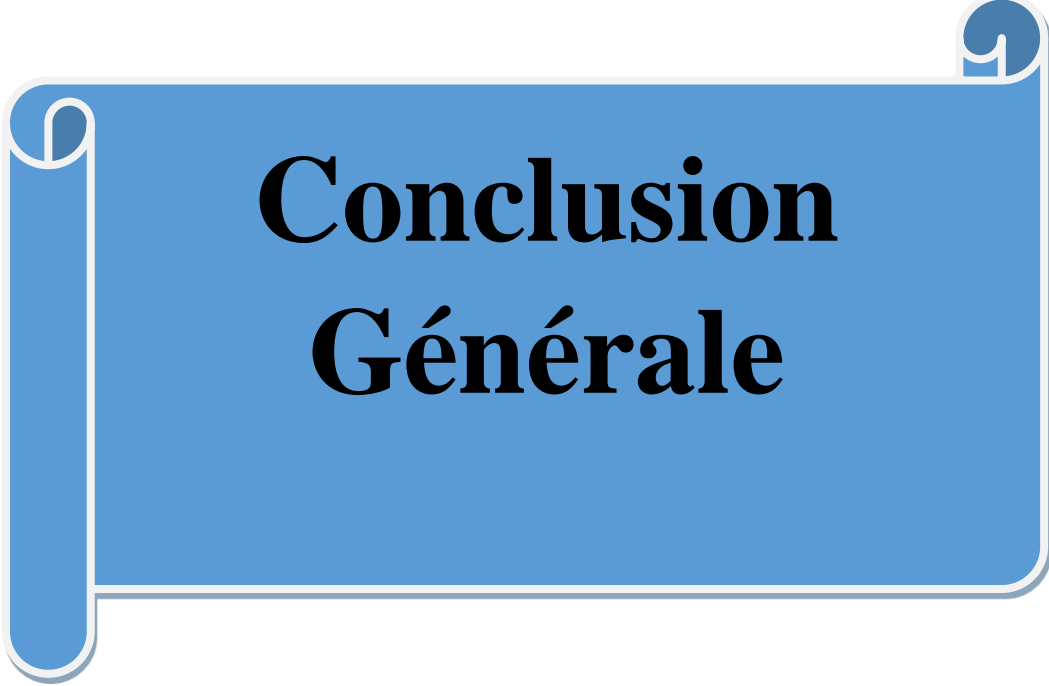
Modèle	Nombre de neurone couche 1	Nombre de neurone couche 2	MSE validation	MSE test
Modèle 1	5	4	0.6768	1.9977
Modèle 2	19	10	4.4547e-04	6.9169e-04
Modèle 3	6	7	1.1014e-04	2.7438e-05

Tableau 3. 3 .Variation des erreurs en fonction du nombre des neurones dans la couche cachée.

Après la comparaison entre les modèles d'apprentissage, utilisant la base de test, indique que le modèle N°3 présente le meilleur résultat.

3.14. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une comparaison des résultats des trois modèles neuronales (la collecte des données, l'analyse des données, la séparation des bases de données, le choix d'un réseau de neurones, la mise en forme des données, l'apprentissage, la validation). L'analyse des différents résultats obtenus, nous permet de conclure la validité du programme de calcul mis en œuvre sous environnement Matlab basé sur un réseaux de neurones à deux couches cachées, Selon les calculs afin d'adopter le meilleur modèle dans la phase d'apprentissage et la phase de test.

A blue scroll graphic with a white border and decorative scroll ends on the left and right sides. The text is centered on the scroll.

Conclusion Générale

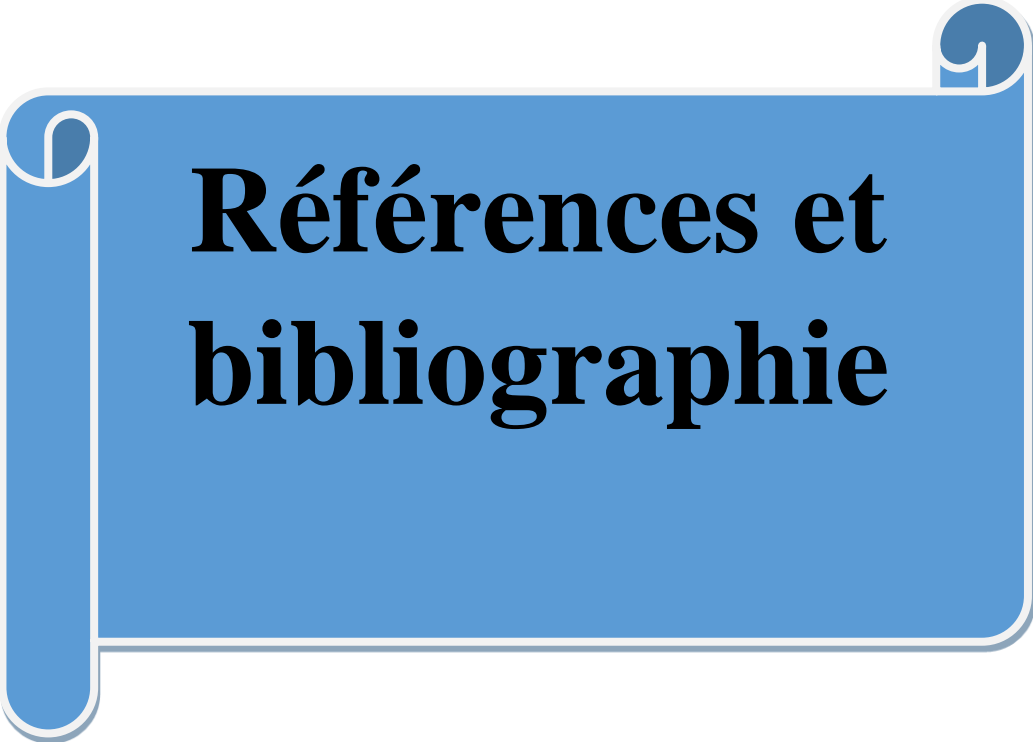
Conclusion générale

Plusieurs techniques d'essais non destructifs existent pour les essais non destructifs. Dans le présent travail, le capteur à courants de Foucault, largement utilisé dans le domaine industriel, est conçu et largement utilisé en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant.

Nous avons commencé notre travail en présentant quelques types de contrôles non destructifs utilisés dans l'industrie en général et les contrôles par courants de Foucault en particulier, et en expliquant leur principe de fonctionnement tout en mentionnant quelques avantages et inconvénients connus.

Au deuxième chapitre, le capteur est réalisé avec une amplitude d'excitation (5 V), une fréquence d'excitation (64 kHz) et un rapport cyclique (10 %, 20 % et 30 %) différents. Les résultats montrent que les paramètres de signal de capteur idéaux sont de 5 volts en amplitude, à une fréquence de 64 kHz et un rapport cyclique de 20 %. Le capteur fourni détecte les fissures de différentes profondeurs jusqu'à 8 mm. Les résultats de ce travail ont été bons par rapport aux outils dont nous disposons. Nous essayons de développer ce capteur pour qu'il fonctionne automatiquement et à distance. En plus d'utiliser l'intelligence artificielle pour détecter les fissures et donner des détails à leur sujet.

Le troisième chapitre, est consacré à la construction d'un modèle basé sur un réseau neuronal artificiel pour le processus CND pulsé, où nous mettons en œuvre la procédure d'inversion utilisée dans le processus CND. Plus précisément, présentation de l'application du réseau de neurones multicouches (MLP) pour résoudre le problème inverse dans le domaine CND. Cette modélisation concerne la caractérisation de défauts (estimation d'épaisseur) dans des pièces métalliques à partir de signaux issus d'un capteur à courants de Foucault pulsés.



**Références et
bibliographie**

Bibliographie

- [1] **J. DUMONT-FILLON** , "*Contrôle non destructif (CND)* ", techniques de l'ingénieur R1400, 1996.
- [2] <https://www.insa-lyon.fr/sites/www.insa-lyon.fr/files/fichems-residence-2021.pdf>.
- [3] **BAKAI LAKHDAR et LAYACHI AMEL**, «*Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage)* », Mémoire Master, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ,2017 /2018.
- [4] **kada karim et gharabi tayab**, «*Contrôle non destructif* » Mémoire Master, Université Ahmed draya - Adrar s.n. 2017 /2018.
- [5] **ALI RAID**, «*CONTRÔLE NON DESTRUCTIF RESSUAGE, MAGNÉTOSCOPIE, RADIOGRAPHIE, COURANTS DE FOUCAULT ET ULTRASONS*», 2017-2018 p5.
- [6] **RABHI Mouldi**, «*CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND)* », PLAN DE COURS, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA, 2016-2017.
- [7] **mohammed cherfaoui**, «*contrôle par émission acoustique* », article de référence : BM6450, techniques de l'ingénieur, 10 juil 2006.
- [8] **Wissem SLIMANE**, «*Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND)* », MEMOIRE DE MAGISTERE EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA, Présenté et soutenu publiquement le : 14 / 02 / 2008
- [9] **BOUCHEROU Nacer**, «*UTILISATION D'OUTILS DE TRAITEMENT DU SIGNAL DANS LE DIMENSIONNEMENT DES DEFAUTS*», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE SAAD DAHLED DE BLIDA, Blida, Juin 2009.
- [10] <https://f2school-com.cdn.ampproject.org> 2020.
- [11] **MelleZEMOURI Nassima**, «*Etude et Réalisation d'un Système Multi capteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs* », MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Soutenu publiquement le 21/07 /2016.
- [12] [Chapitre 2], *Le CND par Courants de Foucault*, Chapitre 2.

- [13] **P. Xiang**, "*Courants de Foucault à sonde rotative multifréquence automatique*", Thèses et mémoires rétrospectifs, État de l'Iowa, 2005.
- [14] **H.A.E.M.L.T. 4. Aber Chifaa1**, « *Development of A 3d Model Eddy Current Testing* », International Journal of Engineering Science Invention, Oran, Toulouse, 2016.
- [15] **Ilham Zainal Abidin, Catalin Mandache, Gui Yun Tian, Maxim Morozov**, "*Test par courants de Foucault pulsés avec cycle de service variable sur les joints de rivet*", International, Newcastle, 2009.
- [16] **Changrong Yang, Ben Gao, Qiuping Ma, Lian Xie, Gui Yun Tian, Ying Yin**, «*Structure de capteur de focalisation magnétique multicouche pour courant de Foucault pulsé à distance*», IEEE Sensors Journal, 2019.
- [17] **RAMDANE MOHAMED et djarer Mohammed**, «*contrôle intelligent par réseaux de neurone pour la détection d'anomalie en radiothérapie* », mémoire master, UNIVERSITE DE SAAD DAHLED DE BLIDA, 2018-2019.
- [18] [Chapitre] Trois Les Réseaux des Neurones Artificiels
- [19] **Zahir ASRADJ**, «*Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de Neurones* », MEMOIRE Magister en Automatique et Traitement du Signal, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA –BEJAIA.
- [20] **Youcef Djeriri** , «*Les réseaux neurones artificiels* », Chapter , Université of Sidi-Bel-Abbès, 20 Septembre 2017.
- [21] **p. compolucci**, « *A circuit theory approach to recurrent network architecture and learning methods*», these Doctorat, université de bologne, février1998.
- [22] **Mourad abidi** , «*réalisation et implantation d'un réseau neurones sur une architecture matérielle distribuée à base de réseau sur puce*», mémoire de PFE d'ingénieur, école nationale d'ingénieurs de Sousse, juin2014.
- [23] **M.R. Alismail et N. ourchani**, «*fusion multimodale des scores pour lareconnaisancesdes personnes*», master2, université Mohamed khider biskra, 2011.
- [24] <https://www.mathworks.com> 1994-2022

- [25] **MERZOUKA NOURESSADAT**, «*Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels : une approche dans l'espace d'état*», MEMOIRE MAGISTER, UNIVERSITE DE SETIF 1ALGERIE, Soutenu le : 04/07/2009.
- [26] **Benoît Virole**. RESEAUX DE NEURONES ET PSYCHOMETRIE, Etude prospective des applications possibles des réseaux de neurones formels dans le traitement des données psychométriques, Editions du Centre de Psychologie Appliquée, Juin 2001.
- [27] **MLLE.RABIA Molkhiret MLLE.SAIDANI Siham**, «*Réseaux de neurones pour les jeux de plateau* », mémoire de master, UNIVERSITE AKLI MOUHAND OULHADJ-BOUIRA, 2019/2020.
- [28] **Young-KilShin, Dong-MyungChoi, Young-JooKim, Seung-SeokLee**, « *Signal characteristics of differential-pulsed eddy current sensors in the evaluation of platickness*», NDT&E International 42(2009)215–221
- [29] P. BOURRET, J. REGGIA, M. SAMUELIDES, '*Réseaux neuronaux une approche connexionniste de l'intelligence artificielle*', Ouvrage de l'édition TEKNEA, 1991.