



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique*



Université Saad Dahlab de Blida I
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales, IAES

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Aéronautique
Spécialité : Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Aéronautique

Option : Structure

Thème

**Maintenance et Caractérisation des Anomalies par CND à Base
des Réseaux de Neurones**

Projet de **Startup** présenté dans le cadre de l'arrêté ministériel "1275", assuré par
l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales, IAES.

Proposé et dirigé par :
Dr. Sari Elkahina

Réalisé par :
**Bataoui Rania
Bahloul Sirine**

Codirigé par :
Dr. Boudifa Hakima

Soutenu devant le jury composé de :

E. Sari	MCA. U de Blida I	Encadreur
H. Boudifa	MCA. EHEC d'Alger	Co-Encadreur
K. Bakouche	MCB. U de Blida I	Examineur
K. Hamidi	MCB. U de Blida I	Président
M. Krim	MCB. U de Blida I	Représentant de l'incubateur
F. Bennoui	Lt/Col. Base de Boufarik	Partenaire socio-économique
E. Saoudi	MCB. U de Blida I	Représentant du CATI

Promotion : 2022 / 2023

ملخص

الهدف من هذا المشروع لإنهاء الدراسات هو توصيف "العيوب المفتوحة" باستخدام شبكات الأعصاب، وذلك من خلال تحقيقات تجريبية في مجال التحكم غير المدمر. تعتمد التقنيات المستخدمة في التحكم غير المدمر على تيارات الدوامة والموجات فوق الصوتية.

مر تطوير الذكاء الاصطناعي لتوصيف "العيوب المفتوحة" على مرحلتين: المرحلة الأولى تتضمن إنشاء قاعدة بيانات التجريبية تحتوي على مدخلات مُستقاة من تحليل اختبارات تيارات الدوامة و مخرجات مُستقاة من التحكم بالموجات فوق الصوتية. المرحلة الثانية تتضمن تنفيذاً باستخدام برمجة ماتلاب لإعادة بناء العيوب باستخدام شبكات الأعصاب. يعتمد خوارزمية التعلم على الانخفاض التدريجي والتي تعتمد على اقتراح هيكل مثالي للشبكة العصبية الاصطناعية. و يتم أيضاً النظر في ضبط معالم الشبكة مثل عدد الخلايا العصبية وعدد الطبقات الخفية ونوع وظيفة التنشيط المستعملة.

Résumé

L'objectif de ce projet de fin d'études est de caractériser les 'défauts débouchant' par l'utilisation des réseaux de neurones. Ceci par le biais de résultats expérimentaux de contrôle non destructif. Les techniques CND utilisées sont les courants de Foucault et les ultrasons.

Le développement d'intelligence artificielle pour caractériser les 'défauts débouchant' est réalisé selon deux étapes : La première, consiste à l'établissement d'une base de données expérimentale contenant une entrée obtenue par analyse des tests de courant de Foucault et une sortie obtenue par contrôle ultrasonore. La deuxième, comporte une implémentation sous Matlab de la reconstruction des défauts par les réseaux de neurones. L'algorithme d'apprentissage utilisé est la descente du gradient qui se base sur la proposition d'une architecture optimale du réseau de neurone artificiel. Le réglage des paramètres du réseau tels que le nombre des neurones, le nombre des couches cachées ainsi que le type de la fonction d'activation est aussi considéré.

Abstract

The goal of this final project study is to characterize 'emerging defects' through the use of neural networks. This is accomplished by the use of nondestructive control experiment results. The CND techniques employed are Eddy currents and ultrasound testing. The development of artificial intelligence to characterize 'emerging defects' occurs in two stages: The first is the creation of an experimental database containing an input obtained via the Eddy current tests analysis and an output obtained through ultrasound control. The second includes a Matlab implementation of the defects reconstruction using neural networks. The learning algorithm used is gradient descent, which is based on the proposal of an optimal artificial neural network architecture. The configuration of network parameters such as the number of neurons, the number of hidden layers, and the type of activation function is also taken into consideration.

Dédicaces

À ma mère la professeur 'Kheldoun Saïda', source infinie de soutien et d'amour. Tu as été ma lumière et ma force tout au long de ce parcours. Tes encouragements constants, ton dévouement inébranlable et ta bienveillance incommensurable ont été les piliers sur lesquels j'ai pu construire ce mémoire. C'est grâce à toi que j'ai trouvé la détermination nécessaire pour atteindre ce moment.

À mon père l'ingénieur 'Bahloul Nacer Eddine', mon frère 'Bahloul Mohamed Redha' et ma sœur 'Bahloul Fifi', Votre soutien infaillible m'a été précieux à chaque étape de cette aventure. Votre compréhension, votre patience et votre amour m'ont permis de persévérer et de grandir en tant qu'individu. Je suis reconnaissante d'avoir une famille aussi formidable à mes côtés.

À mon proche ami l'ingénieur 'Loucif Amir', Pour ton soutien inébranlable, ton aide précieuse et ton amitié sincère, ta contribution a été un véritable atout que je suis profondément reconnaissante. Ton engagement envers mon succès a été une source d'inspiration constante. Merci du fond du cœur.

À mes professeurs, votre guidance, votre expertise et votre passion pour l'apprentissage ont été une source d'inspiration constante. Vous m'avez montré la voie, m'avez éclairé mon chemin et m'avez encouragée à aller au-delà de mes limites. Je vous remercie pour votre dévouement à l'éducation et pour avoir été des mentors exceptionnels.

À mon binôme Rania, ton amitié, notre collaboration précieuse ont été essentiels pour mener à bien ce projet. Nous avons partagé des moments d'apprentissage, de réflexion et de travail acharné.

À tous ceux qui ont contribué à ce parcours, Que ce mémoire soit un témoignage de ma gratitude envers vous tous. Chacun d'entre vous a joué un rôle essentiel dans ma réussite, et je vous en suis profondément reconnaissante. Ce travail est aussi le vôtre.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance.

Bahloul Sirine

Dédicaces

Au début de cette dédicace, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma mère exceptionnelle et mon père incroyable. Maman 'Taïbi Souad', ta force, ton amour inconditionnel et tes encouragements constants ont été ma source de motivation inestimable tout au long de ce parcours. 'Papa Djahid', ton soutien indéfectible et tes conseils avisés m'ont guidé dans cette aventure académique. À tous les deux, je vous adresse mes remerciements les plus chaleureux pour avoir été les piliers de ma réussite.

Je profite également de cette occasion pour exprimer mon amour et ma gratitude à tous les membres de ma famille. À mon frère Mouhamed, à sa femme rima, et à leurs enfants Imane et Wassim, pour leur soutien et leur affection constants. À mes chers frères Oussama et Hafid, je vous remercie du fond du cœur pour être toujours présents dans ma vie. Mes amies Bessma et Meriem, votre amitié précieuse a été une source d'inspiration.

Je dédie ce travail à mon amie et mon binôme sirine et je voulais lui dire : Merci infiniment. Tu as été mon soutien dans les moments difficiles. Merci pour tout ce que tu as partagé avec moi, les rires et les larmes. Je te souhaite une réussite éclatante dans ta vie.

Enfin, mes remerciements s'étendent à toute la famille Bataoui ainsi et à Mme Akriche Sabiha, qui ont joué un rôle essentiel en me fournissant un environnement aimant et encourageant. Votre amour, vos encouragements, et votre soutien indéfectibles ont été les moteurs de ma réussite. Je vous suis infiniment reconnaissant, et je partage cette réussite avec vous tous. Que cette dédicace témoigne de mon amour et de ma reconnaissance éternelle envers vous.

RANIA BATAOUI

01/09/2023 & 23h :31

Remerciements

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de manière significative à la réalisation de mon mémoire de mastère. Leurs efforts, leur soutien et leur expertise ont été d'une importance cruciale dans cette entreprise.

Nous commençons par remercier chaleureusement les ministres de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique, **Pr. Kamel Baddari**, et de l'Economie de la connaissance, des Start-up et des Micro-entreprises, **Mr. Yacine El-Mahdi Oualid**, pour nous avoir offert l'opportunité d'explorer le monde de l'entrepreneuriat et pour leur soutien précieux dans la concrétisation de nos idées.

Nous tenons à exprimer ma reconnaissance envers nos promoteurs, les maîtres de conférences "A" **Dr. Sari Elkahina** et **Dr. Boudifa Hakima** pour leur suivi attentif de notre travail, leurs précieux conseils, ainsi que pour le courage, le soutien infaillible et la direction qu'ils nous ont généreusement prodigués.

Nos remerciements vont également au colonel **Bennoui Farid**, dont la présence constante et le dévouement ont été une source inestimable de solutions et d'idées pour surmonter les défis rencontrés tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers **Dr. Hoadjli Abir** pour ses précieux conseils et orientations.

Un grand merci à tous les membres des jurys d'avoir accepté d'examiner notre travail avec bienveillance et professionnalisme.

Nous n'oublions pas de remercier chaleureusement l'équipe de formateurs, **M. Krime Mouhamed** et **M. Labssir Abd Elkader**, pour leurs formations enrichissantes qui ont grandement contribué à notre développement.

*Nous souhaitons également exprimer ma profonde reconnaissance envers le commandant **Azzouni Amine**, dont le soutien constant a été d'une aide inestimable à chaque étape de notre parcours.*

*Enfin, un remerciement spécial à l'équipe de ERMA, notamment à **Mr. Bensselam Ziadé**, **Mr. Bakhouche Nacer Eddine**, et **M. Ahmed**, pour leur précieuse contribution à notre projet.*

Nous tenons à souligner que chaque personne mentionnée ici a joué un rôle essentiel dans la réussite de ce mémoire. Leurs conseils, leur soutien et leur expertise ont été des éléments clés de notre parcours académique et professionnel. Merci du fond du cœur pour votre engagement et votre confiance à notre travail.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et des abréviations

Introduction Générale 14

Chapitre I: Généralités sur les méthodes de CND

I.1/ Introduction..... 17

I.2/ Définition de CND..... 17

I. 3/ Principe de contrôle non destructif 17

I.4/ Champs d'application de contrôle non destructif 19

I.5/ Type des défauts détectés..... 20

I.6/ Techniques de contrôle non destructif 21

I .6.a/ Contrôle visuel 22

I.6.b/ Contrôle par ressuage 23

I.6.c/ Contrôle par ultrason 24

I.6.d/ Radiographie 26

I.6.e/ Magnétoscopie..... 28

I.6.f/Thermographie..... 30

I.6.h/ Courants de Foucault..... 33

1/ Principe de contrôle par courant de Foucault 33

2/ Mise en œuvre du contrôle..... 34

3/ Effet de peau 34

4/ Diagramme d'impédance normalisée 35

5/ Types des capteurs pour le contrôle par CF..... 37

a / Définition d'un capteur..... 37

b/ Principe des capteurs..... 37

c/ Classification des capteurs 38

6/ Avantages, inconvénients et limitation de la méthode 48

I.7/ Conclusion..... 50

Chapitre II : Réseaux de neurones

II.1/ Introduction	51
II.2/ Historique	51
II.3/ Neurone biologique	52
II.4/ Neurone artificiel.....	53
II.5/ Fonctions d'activation	55
II.6/ Composition d'un réseau de neurone	58
II.7/ Type des réseaux de neurones	58
a/ Les réseaux de neurones monocouches	59
b/ Les réseaux neurones multicouche	61
II.8/ Architecture des réseaux de neurones	61
II.9/ Type d' apprentissage	64
II.10/ Algorithme d'apprentissage.....	68
a/ Définition Rétro-propagation.....	68
b/Algorithme d'apprentissage par la descente de gradient	68
II.11 /Conclusion	70

Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1/ Introduction	71
III.2/ Généralités sur l'aluminium	71
III.3/ Réalisation des défauts débouchant artificiels	76
III.4/ Construction de la base de données.....	76
III.5 / Implémentation des réseaux de neurones sous Matlab	82
a/ Choix de type de réseau de neurones.....	82
b/ Résultats de l'implémentation sous Matlab.....	82
III.6/ Conclusion.....	91

Chapitre IV: De la technologie vers l'entreprise

IV.1/ Introduction.....	92
IV.2/ Solution proposée.....	93
IV.3/ Présentation du projet	94
IV.4/ La valeur ajoutée	95
IV.5/ Objectifs	96
IV.6/ Présentation des porteurs du projet	96
a/ L'équipe d'encadrement du groupe du travail.....	96
b/ L'équipe du projet du groupe du travail	97
c/ Carte d'information.....	97

IV.7/ La nature des innovations liées à notre projet.....	98
IV.8/ Les valeurs proposées selon les critères.....	99
IV.9/ Le Business Model Canvas (BMC)	99
IV.10/ Analyse du marché.....	110
a/Analyse SWOT	111
b/ Analyse PESTEL du projet	111
IV.11/ Analyse technique et économique.....	112
a/ Moyens immobiliers, et équipements :	112
b/ Moyens humains.....	113
c/ Fournisseur	113
d/ Moyens de transport	114
IV.12/ Analyse financière.....	114
a/ Evaluation du cout du projet.....	114
a.1/ Frais préliminaires prévisionnels en DZD pour une année.....	114
a.2/ Fond de roulement	114
b/ Charges salariales	115
c/ Chiffres d'affaires prévisionnels.....	116
d/ Achats et Consommations	117
e/ Services extérieurs	118
f/ Amortissement	118
IV.13/ Conclusion	119
Conclusion générale	120
ANNEXE 1	128
ANNEXE 2	129
Références	137

Liste des figures

Figure I.1: Principe de contrôle non destructif	18
Figure I. 2: Contrôle visuel	22
Figure 1.3: Principe de contrôle visuel	22
Figure 1.4: Principe de contrôle par ressuage	23
Figure 1.5: Contrôle par ultrason	25
Figure 1.6: Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide	25
Figure I.7: Radiographie	27
Figure I.8: Inspection par magnétoscopie	28
Figure I.9: CND par thermographie	30
Figure I.10: CND par Barkhausen	32
Figure 1.11: Présentation des courants de Foucault	33
Figure I.12: Diagramme d'impédance normalisé	36
Figure I.13: Variation de l'impédance lors de l'apparition d'un défaut	38
Figure I.14: Bobine encerclant	39
Figure I.15: Bobine interne glissante avec noyau	39
Figure I.16: Bobine simple avec noyau	40
Figure I.17: Bobine plate	40
Figure I.18: Bobine plate	41
Figure I.19: Capteur à double fonction	42
Figure I.20: Capteur à fonction séparée	42
Figure I.21: Sonde absolue	43
Figure I.22: Capteur différentiel à deux éléments	44
Figure I.23: Différents modèles de capteurs encerclants	45
Figure I.24 : Capteurs internes réels	45
Figure I.25: Capteur sonde	46
Figure I.26: Sonde rotative	47
Figure I.27: Sonde à bobines perpendiculaires	47

utilisés.

Figure II.1: Représentation schématique d'un neurone biologique	53
Figure II.2: Passage de neurone biologique au neurone artificiel	53
Figure II.3: Représentation d'un neurone artificiel	55
Figure II.4: Fonction seuil	55
Figure II.5: Fonction sigmoïde	56
Figure II.6: Fonction saturation.....	56
Figure II.7: Fonction gaussienne centrée	57
Figure II.8: Fonction ReLU centrée	57
Figure II.9: Architecture d'un réseau de neurones	
Figure II.10: Réseaux à une seule couche.....	58
Figure II.11: Schéma d'une classification.....	59
Figure II.12: Perceptron simple.....	60
Figure II.13: Réseaux perceptron multicouche	61
Figure II.14: Principaux types d'architectures et de structures d'interconnexions des réseaux de neurones.....	62
Figure II.15: Réseaux neurones non bouclé à connexions totales.....	63
Figure II.16: Réseaux neurones non bouclé à connexions partielles	63
Figure II.17: Structure d'un réseau de neurones bouclés.....	64
Figure II.18: (1) propagation (2) retro propagation.....	68
Figure III.1: Echantillons avec défauts artificiels	77
Figure III.2: Fraiseuse PMER VST300.....	77
Figure III.3: Rohmann Elotest M3	78
Figure III.4: Bloc d'étalonnage	79
Figure III.5: Contrôle des défauts par Elotest M3.....	79
Figure III.6: Graphique de variation d'impédance du défaut 3 sur Elotest M3	79
Figure III.7: Détermination d'impédance par le calcul de l'intégration numérique pour le défaut 3.....	80
Figure III.8 : Olympus Omniscan MX2 & la sonde utilisée	81
Figure III.9 : Le test ultrasonore de la profondeur 3mm.....	81
Figure III.10: Une partie de la base de données obtenue par des mesures de CND.....	82
Figure III.11: Architecture du réseau de neurones pour le 1 ^{er} cas.....	83
Figure III.12: Courbe de performance (MSE) pour le 1 ^{er} cas	84

Figure III.13: L'évolution du gradient et convergence pour le 1 ^{er} cas.....	85
Figure III.14: Courbes de régression des données pour le 1 ^{er} cas.....	85
Figure III.15 : Architecture du réseau de neurones pour le 2 ^{ème} cas.....	86
Figure III.16: Courbes de performance (MSE) pour le 2 ^{ème} cas.....	86
Figure III.17: L'évolution du gradient et convergence pour le 2 ^{ème} cas.....	87
Figure III.18: Courbes de régression des données pour le 2 ^{ème} cas.....	87
Figure III.19: Architecture du réseau de neurones pour le 3 ^{ème} cas.....	88
Figure III.20: Courbe de performance (MSE) pour le 3 ^{ème} cas.....	88
Figure III.21: L'évolution du gradient et convergence pour le 3 ^{ème} cas.....	89
Figure III.22: Courbes de régression des données pour le 3 ^{ème} cas.....	89
Figure III.23: Architecture du réseau de neurones pour le 4 ^{ème} cas.....	90
Figure III.24: Courbe de performance (MSE) pour le 4 ^{ème} cas.....	90
Figure III.25: L'évolution du gradient et convergence pour le 4 ^{ème} cas.....	90
Figure III.26: Courbes de régression des données pour le 4 ^{ème} cas.....	91
Figure IV.1: Quelques structures à inspecter par notre Startup.....	94
Figure IV.2 : Logo du Startup.....	94
Figure IV.3: La nature innovatrice de notre projet.....	99
Figure IV.4: Site web de la Startup Drone Sight.....	105
Figure IV.5: Les média sociaux utilisés pour notre Startup.....	105
Figure IV.6: Les étapes de l'application mobile.....	106
Figure IV.7: Le prototype application mobile « Dronesight ».....	108
Figure VI.8: La carte visite de la Startup « Drone Sight ».....	108
Figure IV.9: Etude de marché provisionné.....	111
Figure VI.10: L'analyse SWOT du marché de notre Startup.....	111
Figure IV.11: Présentation chiffre d'affaire 2024-2028.....	118

Liste des tableaux

Tableau II.1: La différence entre un apprentissage supervisé et non supervisé	67
Tableau III.1: Compositions chimiques de 2017A.....	74
Tableau III.2: Caractéristiques mécaniques de 2017A.....	74
Tableau III.3: Les caractéristiques physiques de 2017A.....	74
Tableau IV.1: Equipe d'encadrement.....	96
Tableau IV.2: Equipe du projet	97
Tableau IV.3: Les valeurs proposées selon les critères.....	99
Tableau IV.4: Le Business Model Canvas (BMC).....	100
Tableau IV.5: Liste des partenaires du projet.....	103
Tableau IV.6 : Liste des équipements et moyens immobiliers.....	113
Tableau IV.7: Liste des moyens humains avec le nombre nécessaire.....	113
Tableau IV.8 : Délais client / fournisseur.....	114
Tableau IV.9: Fond de roulement pour un fonctionnement de 30 jours	115
Tableau IV.10: Structure de coût pour l'entreprise	115
1Tableau IV.11: Estimation des salaires du projet.....	116
Tableau IV.12: Nombre de commande par mois et le nombre de jour travaillés par an.....	116
Tableau IV.13 : Prévission de chiffre d'affaire	117
Tableau IV.14 : Les achats pour chaque année (DZD)	118
Tableau IV.15 : Services extérieurs	118
Tableau IV.16: Amortissement d'entreprise.	119

Liste des abréviations

CND	Contrôle Non Destructif
END	Évaluation Non Destructif
TP	Thermographie pulsée
TM	Thermographie modulée
TPP	Thermographie de phase pulsée
CND-CF	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
CF	Courants de Foucault
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
RNN	Réseau de neurones récurrents
SVM	Support Vector Machines
GPU	Graphics Processing Units
PMC	Perceptron multicouche
MPC	Multilayer Perceptron
MSE	Mean Squar Error
IA	Intelligence artificielle

Liste des symboles

σ_e : Conductivité électrique [Sm^{-1}]

μ : La perméabilité magnétique [Hm^{-1}]

δ_p : La profondeur de pénétration conventionnelle [m]

f : La fréquence du courant [Hz]

z : La profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m]

J_z : Le module de la densité de courant dans une pièce

J_s : Le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z=0$) [A/m^2]

X_n : La réactance normalisée

R_n : La résistance normalisée

Z_n : Impédance normalisée de la bobine au contact du matériau

X_0 : La réactance de la bobine seule

R_0 : La résistance de la bobine seule

Z_0 : Impédance du capteur à vide

$\omega_{j,i}$: Le poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée i

b_j : Terme constant appelé biais, il est considéré comme le poids d'une entrée 0 x égal à 1

ϑ_j : Potentiel des neurones j

x_i : Provenant des entrées ($i = 1,2,3,4, \dots n$)

Z_i : L'impédance du $i^{\text{ème}}$ défaut

R : Le coefficient de corrélation

g : La fonction d'activation

S_j : La sortie du neurone j

σ : L'écart type de la gaussienne.

$F(x_i)$: La sortie calculée

z_i : La sortie désirée

E : Erreur

δ : Le taux d'apprentissage

Introduction Générale

Introduction Générale

L'intelligence artificielle révolutionne l'industrie. Des chaînes d'approvisionnement à l'optimisation des chaînes de productions en passant par la maintenance préventive et prédictive. Les applications industrielles de l'intelligence artificielle sont nombreuses. L'IA permet d'optimiser les performances industrielles, de réduire les défaillances et de simplifier les simulations, elle permet d'automatiser les contrôles qualité. L'intelligence artificielle constitue également un formidable outil d'aide à la décision.

Les réseaux de neurones artificiels, nés il y a environ une cinquantaine d'années, sont toujours en cours de développement. Cet axe de recherche a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs de différentes disciplines. Ces réseaux de neurones artificiels sont issus de la combinaison entre la neurobiologie comme idée de base, la physique comme champs d'application et les mathématiques et l'informatique autant que moyens de réalisation. Les réseaux de neurones artificiels sont des ensembles de neurones formels associés en couches et fonctionnant en parallèle. Chaque neurone élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches intermédiaires.

Les secteurs de l'aérien et de l'aéronautique sont particulièrement propices à l'innovation et à l'utilisation de nouvelles technologies. C'est un secteur industriel de plus en plus exigeant du point de vue des techniques de maintenance employées. Cette exigence s'accompagne d'une préoccupation évidente en matière de sécurité il est accentué d'une part en raison du vieillissement de la flotte aéronautique (la tendance est que les avions soient utilisés de plus en plus longtemps) et d'autre part des impératifs de réduction des coûts et de temps d'arrêt imposés par un marché du transport aérien civil avec des contraintes économiques toujours plus pressantes.

En plus, les techniques de contrôles évoluent à cause de l'augmentation de complexité de structures en aéronautique pour des composants de grands ou petits dimensions (joints, assemblages, aubes, disques de turbines etc.)

Pour avoir une solution pour ces critères que ce soit pour l'industrie sensibles (nucléaires) ou bien le domaine aéronautique, des techniques de contrôle non-invasives, couramment appelées techniques de contrôle non-destructif (CND) ont été élaborées. On désigne par contrôle non destructif l'ensemble des procédés permettant de caractériser l'intégrité de structures ou de matériaux sans les altérer. Compte tenu d'un certain nombre de phénomènes physiques, beaucoup de méthodes sont réalisables pour effectuer la tâche du CND. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault...), Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs comme les propriétés physiques de la pièce à vérifier, la nature des informations recherchées et les conditions d'exécution.

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

Connaître les dimensions du défaut est un paramètre très important pour que les ingénieurs prennent des décisions sur l'avenir de la pièce. En effet, la plupart des méthodes d'inspection non destructives ne nous disent pas grand-chose sur la forme du défaut. Il existe actuellement une forte demande pour une caractérisation quantitative des défauts. C'est à dire effectuez une évaluation non destructive pour reconstruire la forme du défaut. Dans ce cas, on parle du problème inverse, qui est généralement difficile à résoudre, Face à la nécessité de trouver des solutions à des problèmes inverses ou à des problèmes de mauvaise configuration, plusieurs méthodes ont vu le jour pour résoudre ce genre de problème. Parmi les méthodes de résolutions de problèmes inverses : la méthode des réseaux de neurones.

Dans ce mémoire, nous nous interrogerons sur les nouvelles stratégies de lutter la rupture brutale des pièces aéronautique (revêtement de l'avion) en aluminium en utilisant l'intelligence artificielles pour avoir une idée sur la sécurité de l'avion on connaissant les dimensions des défauts.

Afin de traiter le sujet et de répandre au questionnement nous avons émis un plan de recherche, d'abord nous effectuons des défauts de différentes profondeurs sur des plaques d'aluminium 2017A, ensuite, nous préparons une base de donnée fondée sur interprétation des

signaux des ondes ultrasonores longitudinales et des courants de Foucault obtenues par contrôle non destructif, enfin, on fait l'implémentation des réseaux de neurones avec l'utilisation du logiciel Matlab en faisant une proposition d'une architecture optimale du réseau de neurone artificiel et un bon choix d'algorithme d'apprentissage.

Alors, pour traiter le sujet nous divisons ce mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre dont le but est de rappeler brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif. Après, nous évoquerons les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance. Nous passerons ensuite à une description plus détaillée des principales familles de procédés du contrôle non destructif.
- Le deuxième chapitre présente une idée générale sur les réseaux neurones, ses types avec leurs applications et même aussi les types d'apprentissages et l'algorithme de calcul.
- Le troisième chapitre traite les différents résultats et ses interprétations. Ces résultats sont obtenus grâce à la construction d'une base de données qui repose sur les essais ultrasonores et une analyse des résultats d'essais du courant de Foucault des défauts débouchant artificiels. Une fois la base de donnée est réalisée, une implémentation sous Matlab est faite pour la reconstruction des défauts par les réseaux de neurones en utilisant l'algorithme de la descente du gradient.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de notre projet Startup DroneSight, ces objectifs et notamment une analyse du marché et financière en examinant en détail les éléments essentiels de notre offre, notamment notre gamme diversifiée de services et notre plateforme d'application mobile conviviale.

Et enfin nous terminons ce projet par une conclusion générale et des perspectives.

Généralités sur les méthodes de CND

I.1/ Introduction

Les enjeux de sûreté, les contrôles qualité et de santé des pièces deviennent un impératif incontournable. Le contrôle non destructif (CND) a comme objectif de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en changer les propriétés physiques. Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du 19^{ème} siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Une forte accélération du progrès et du développement des END s'est manifestée ensuite vers les années 1960 / 1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates-formes offshore.

Les différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, . . .) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes familles : les défauts surfaciques et les défauts internes [1].

I.2/ Définition de CND

Méthodes et techniques qui permettent de rechercher des anomalies dans la matière et les matériaux sans les altérer, les contrôles non destructifs fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient. le même principe applique aux pièces mécanique consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour permettre d'apprécier sans destruction, l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude a remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement.

I. 3/ Principe de contrôle non destructif

Le CND peut prendre des aspects très différents car il doit s'adapter aux problématiques industrielles et aux particularités de chaque objet produit , il est regroupé un ensemble de techniques et /ou de procédés aptes à fournir des informations concernant la santé d'une pièce ou d'une structure, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés et concernant la détection de défaut (hétérogénéités localisées), trois techniques sont privilégiées pour les

défauts internes : la radiographie, les ultrasons ...etc. La détection des défauts de surface (craques, rayures ...) relève d'un grand nombre de techniques dont notamment : optique, ressuage, courants de Foucault, magnétoscopie et ultrasons. Concernant l'évaluation des caractéristiques intrinsèques, les principales techniques utilisées sont : les méthodes optiques pour l'aspect et les propriétés de surface, les ultrasons et les rayons X pour les propriétés de la matière.

Le contrôle non destructif d'objets ne se limite généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même Le choix du procédé, de la méthode et de l'équipement. Au début, il faut prévoir tout un processus avec des objectifs suivantes : vérifier la fiabilité, la répétabilité, la localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, notamment par leur taille, classement, présentation visuelle, décision d'affectation des objets, documentation des résultats finaux et des conditions d'examen.

Ce sont les opérations de calibrage, calibration, scande sondes, l'informatique qui permet d'atteindre ces cibles sont aujourd'hui en bonne conditions grâce à la contribution calcul intensif en temps réel.

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée [1] :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

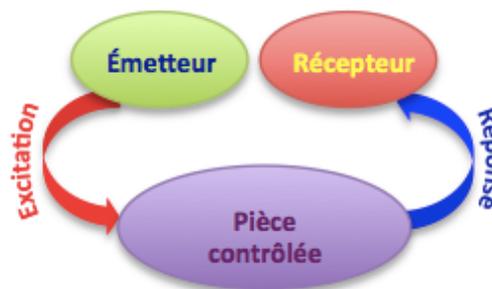


Figure I.1: Principe de contrôle non destructif [2]

La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche :

- défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux qui appartiennent essentiellement à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue).
- défauts d'aspect (taches sur une surface propre)
- Corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire) [1].

I.4/ Champs d'application de contrôle non destructif

À travers son objectif, on aura compris que le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits, les structures de toutes natures.

➤ **Le contrôle en cours de fabrication**

Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés .le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux. Quand le détecteur de défauts ne peut pas être installé en ligne de fabrication, on utilise dans l'industrie des bancs de contrôle correspondant bien souvent à des équipements importants en taille et en coût d'investissement [1].

➤ **Le contrôle en recette**

Il procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant. Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle c'est surtout l'aspect procédure de la démarche À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions [1].

➤ **Le contrôle en service :**

S'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement du matériel.

Les méthodes de CND sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- L'industrie navale (contrôle des coques) ;
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ;
- L'aérospatiale et l'armée (dont la totalité des programmes sont confidentiels ou secret défense);
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.);

- Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies);
- Autres (fabrication de mousquetons d'escalade, ouvrages d'art, etc) [3].

I.5/ Type des défauts détectés

Détecter un défaut c'est mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Ça peut être des porosités, criques, rivets, soudures, fissures, délaminages, corrosion, collages, taux de fibre/matrice, décohésion fibre-matrice, cotation, forme, ...

On classe les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts internes, les défauts de surface [1], [4].

I.5.a/ Les défauts de surface

Les défauts de surface sont accessibles à l'observation directe mais par toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- les défauts ponctuels et les défauts d'aspect. La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.
- La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [1].

I.5.b/ Les défauts internes

Les défauts internes sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie[1].

I.6/ Techniques de contrôle non destructif

Le problème de l'inspection ou évaluation non destructive des structures se rencontre dans un très vaste champ d'applications et plusieurs techniques sont utilisées ou développées pour répondre aux besoins croissants de l'industrie. Une méthode de contrôle non destructif est fondée sur la déformation d'un champ d'une grandeur physique par une discontinuité, ce qui revient à exploiter ce phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans une structure. Le choix de la grandeur physique utilisée comme : sonde, la source d'excitation...

Les techniques les plus courantes sont :

- Le contrôle visuel est la technique la plus simple et permet de détecter uniquement des défauts débouchants ; cette technique a l'avantage d'être rapide et bon marché.
- La magnétoscopie utilise comme source d'excitation un champ magnétique, l'interaction avec l'objet se fait par induction magnétique. Ce type de technique permet de détecter des défauts superficiels dans des matériaux magnétiques.
- La radiographie, les courants de Foucault.. Utilisent comme source d'excitation un champ électromagnétique de fréquence très variable. L'interaction avec l'objet se fait par induction, réflexion, diffusion ou absorption en fonction de la fréquence du champ électromagnétique.

- Le contrôle par ultrasons utilise comme source d'excitation des vibrations élastiques générées le plus souvent par un capteur piézoélectrique, l'interaction est de type réflexion, diffusion ou absorption. Ces techniques s'appliquent pour de nombreux types de défauts, sont sans danger, mais présentent l'inconvénient d'une interprétation souvent délicate.
- La thermographie utilise la température comme source d'excitation, l'interaction se fait par conduction, convection ou rayonnement.

I.6.a/ Contrôle visuel

Cet examen permet l'appréciation de nombreux paramètres (forme, couleur, défauts externes). L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielle constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats (tôle, tissu .. etc.) comme présenté par la figure I.2 :



Figure I. 2: Contrôle visuel [2]

Les principaux outils de contrôle optique sont : l'éclairage, l'œil et aides optiques à la vision comme illustré par la figure I.3 :



Figure 1.3: Principe de contrôle visuel [2]

Avantages de contrôle visuel

- Rapidité : Le contrôle visuel peut être effectué rapidement ;
- Pas besoin d'équipement sophistiqué ;
- Une méthode facile à comprendre et à utiliser ;
- Pas coûteuse .

Inconvénients

- Certains défauts peuvent être manqués lors d'une inspection visuelle.
- l'interprétation subjective de l'opérateur et peut varier d'un opérateur à l'autre.
- Le contrôle visuel peut être fortement influencé par les conditions d'éclairage et la qualité de la lumière.
- Le contrôle visuel peut détecter des défauts défauts internes.
- Le contrôle visuel peut être impossible à réaliser dans des zones difficiles d'accès.

I.6.b/ Contrôle par ressuage :

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. Le ressuage est une technique très simple. Elle permet de détecter la plupart des défauts débouchant sur la surface à condition que le matériau de la pièce ne réagisse pas chimiquement avec le pénétrant [1] Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux cinq phases illustrées sur la figure I.4 :

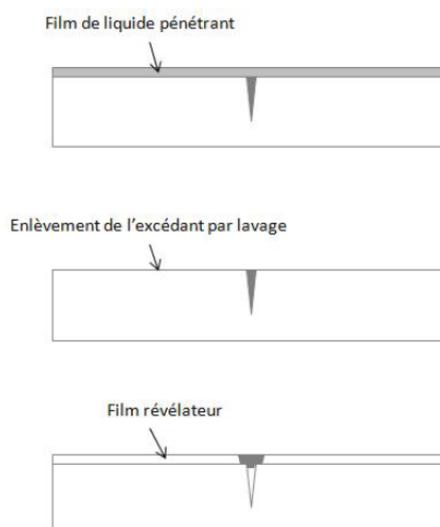


Figure 1.4: Principe de contrôle par ressuage [5]

Avantages

- Le contrôle par ressuage peut détecter des fissures ou des discontinuités superficielles très petites qui ne sont pas visibles à l'œil nu.
- Le contrôle par ressuage est une méthode simple et rapide qui ne nécessite pas de formation avancée ou de connaissances techniques poussées.
- Coût faible, méthode économique par rapport à d'autres méthodes de contrôle non destructif.
- Le ressuage peut être utilisé pour tester une grande variété de matériaux, y compris les métaux ferreux et non ferreux, les plastiques et les céramiques [6].

Inconvénients

- Ne permet pas la détection des défauts non débouchant.
- Temps d'examen relativement long comparé à d'autre méthode de CND.
- Le contrôle par ressuage ne peut détecter que les défauts de surface, ce qui le rend inutile pour détecter les défauts internes.
- Pour obtenir des résultats précis, la surface de la pièce doit être nettoyée soigneusement et séchée avant le test de ressuage. Cela peut prendre du temps et peut parfois être difficile à réaliser dans des zones difficiles d'accès.
- Le contrôle par ressuage doit être effectué dans un environnement approprié, à l'abri des courants d'air, de la poussière et de la lumière directe du soleil, ce qui peut être difficile dans certains environnements de travail.
- Le contrôle par ressuage ne convient pas aux matériaux poreux ou aux surfaces très rugueuses, car la pénétration du liquide de ressuage peut être limitée.

En somme, le contrôle par ressuage est une méthode simple et économique pour détecter les défauts de surface, mais elle a ses limites et ne peut pas détecter les défauts internes.

I.6.c/ Contrôle par ultrason

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité la gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel [1].

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

matière. Le principe de contrôle par ultrason réside dans l'analyse de l'influence des défauts sur la propagation des ondes dans le matériau. Cette influence peut se traduire par de la réflexion, réfraction (déviation d'une onde lorsque sa vitesse change entre deux milieux) et diffraction (diffusion d'une onde par le défaut qui se comporte alors comme une source). Cette influence induit les phénomènes mesurables d'atténuation et de temps de propagation. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau et le temps aller-retour de l'onde envoyée [7], on en déduit la distance parcourue par cette dernière et par suite la localisation d'un éventuel défaut [8] comme présentée par la figure I.5 :

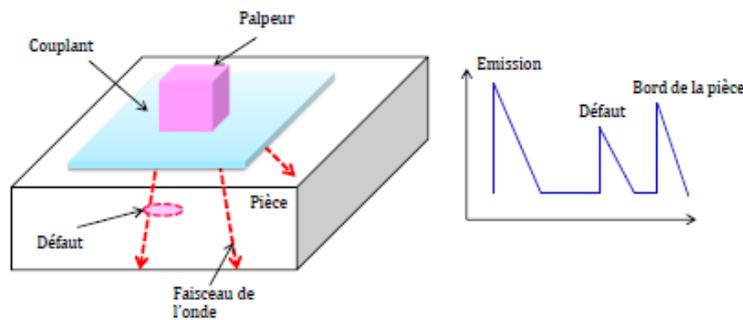


Figure 1.5: Contrôle par ultrason [8]

Il existe trois types des ondes ultrasonores qui se présentent par la figure I.6 :

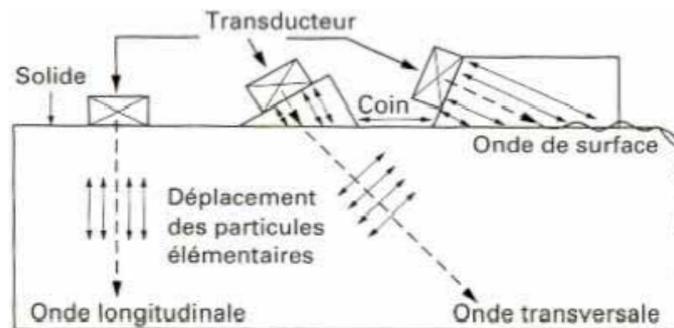


Figure 1.6: Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide [1]

Une des principales complexités pour réaliser ce type de contrôle est de transmettre l'onde ultrasonore dans le matériau. En effet, l'air constitue un très mauvais milieu de propagation de l'onde émettrice. Ce problème peut être contourné en utilisant de l'eau entre l'émetteur et la pièce inspectée. Il s'agit alors d'un contrôle en immersion. Pour des pièces qu'on ne peut pas immerger, il est nécessaire de déposer un produit, appelé couplant, entre le palpeur et la pièce testée [8].

Les avantages du contrôle par ultrasons

- Il est rapide
- Les résultats sont immédiats.
- Il est utilisable sur la plus part des matériaux.
- Il n'est pas nécessaire d'avoir accès aux deux côtés de la pièce.
- Détection de défauts internes [6]

Les inconvénients du contrôle par ultrasons

- Un produit de couplage est exigé.
- Les défauts parallèles aux ondes ultrasonores sont difficiles à déceler.
- L'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise.
- Le matériel doit être étalonné de façon régulière pour chaque épaisseur et chaque type de matériau
- Influence de la géométrie : Les résultats des tests par ultrasons peuvent être influencés par la forme et la géométrie des matériaux. Certains types de défauts peuvent être difficiles à détecter dans des matériaux complexes.
- Coût de l'équipement : Les équipements nécessaires pour effectuer des tests par ultrasons peuvent être coûteux, en particulier pour les applications de haute technologie.
- Limitation de la profondeur : Les ultrasons ont une portée limitée, il peut donc être difficile de détecter des défauts situés à une grande profondeur.

I.6.d/ Radiographie

Comme la plupart des autres techniques de contrôle non destructif, la radiographie est connue depuis de nombreuses années et a fait ses preuves dans l'industrie, La radiographie est une méthode couramment employée pour contrôler l'intérieur d'une pièce, elle est comparable à la radiographie médicale leur principe se base a de faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courtes longueurs d'onde, comme les rayons (Rayons X ou gamma), la pièce a inspecté. En pénétrant dans la pièce, les photons voient leur énergie est entièrement ou partiellement absorbée par la matière, selon la densité de la matière, derrière elle, on place un récepteur, le plus souvent un film radiographique est irradié par les

photons qui ont encore quasiment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones défectueuses sont indiquées par des changements de densité optique. Une fois développé, le film permet d'obtenir une image de l'intérieur de la pièce et de localiser les éventuels défauts internes comme présenté par la figure I.7 :

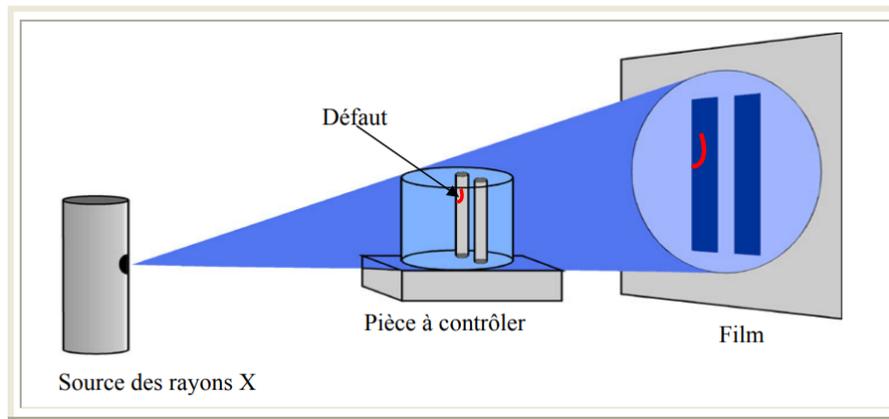


Figure I.7: Radiographie [9]

Avantages

- Facilite la détection des défauts internes des pièces ;
- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15min) ;
- Facile à transporter (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radioactivité portatifs) ;
- Traçabilité et archivage des résultats à l'aide de film et la numérisation est possible avec traitement d'image ;
- Garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

Inconvénients

- L'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur ;
- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement ;
- Son utilisation en industrie complètement inadaptée ;
- Nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;

- Limitation de contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé ;
- Risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau;
- La faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films;

Domaine d'application

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

I.6.e/ Magnétoscopie

La magnétoscopie consiste à soumettre une zone à contrôler à l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif, Le contrôle par magnétoscopie fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté, Cette technique est particulièrement destinée aux pièces ferromagnétiques (fer, fonte...) et permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface (les défauts superficiels), (très proches de la surface de la pièce), Le principe de cette technique est simple : Il s'agit de créer un fort champ magnétique à l'intérieur de la pièce. Une poudre magnétique (Les aimants de fer) ou bien les particules ferromagnétiques très fines dans le liquide porteur (fer coloré ou poudre de magnétite) est alors uniformément répartir sur la surface de la pièce. À ce moment-là et avec l'existence d'un défaut sur son trajet, le champ magnétique est dévié et sa force augmente à la surface. Les particules noires ou fluorescentes s'accablent sur le champ de fuite au niveau du site du défaut, le rendant entièrement visible comme l'illustre la figure I.8 :

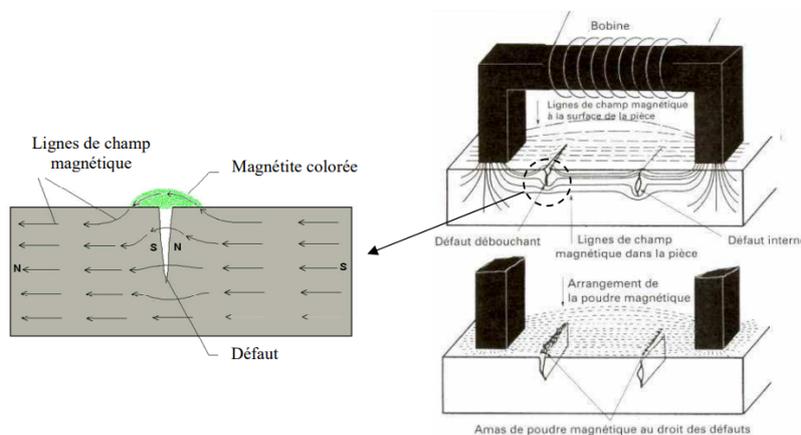


Figure I.8: Inspection par magnétoscopie [10]

Un courant électrique crée un champ magnétique dans un matériau conducteur. Il est alors possible d'engendrer un champ magnétique en contrôlant la direction du courant électrique magnétisant. Il existe 2 types de magnétisation:

- La magnétisation circulaire : elle permet de détecter des défauts obliques par rapport à une génératrice. Le principe est : un courant électrique passant à travers un conducteur axial crée un champ magnétique circonferentiel autour du tube. Les lignes de champ sont toujours perpendiculaires à la direction du courant qui induit le champ magnétique.
- La magnétisation longitudinale : le courant électrique passe à travers une bobine, le champ magnétique est parallèle à l'axe de la bobine. Cette méthode permet la détection de défauts traverses et circonferentiels [11].

Avantages :

- Procédé de contrôle économique ;
- Méthode de mise en œuvre rapide que le ressuage ;
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents ;
- Résultats quasi immédiats ;
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaire au champ.

Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (>2 mm de profondeur) ;
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;
- Risque de microfissuration sur certains aciers sensibles ;
- Limitation de contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

Domaine d'application

La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle:

- Des pièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles;
- Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement;

- Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées. Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures [9].

I.6.f/Thermographie

Cette technique comme l'illustre la figure I.9, consiste à chauffer la surface du matériau inspecté par apport d'énergie (mécanique, air chaud, lampes flash) et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge.

L'inspection en thermographie infrarouge peut se faire selon deux approches : la thermographie active et passive. Dans les deux cas, l'investigation consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut, gradient qui peut-être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température. En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une stimulation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Par opposition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation extérieure, l'objet ou le défaut à détecter générant un gradient thermique naturellement. L'approche active comporte principalement trois volets : la stimulation thermique du spécimen, l'acquisition temporelle de la réponse thermique et l'analyse numérique de la réponse.

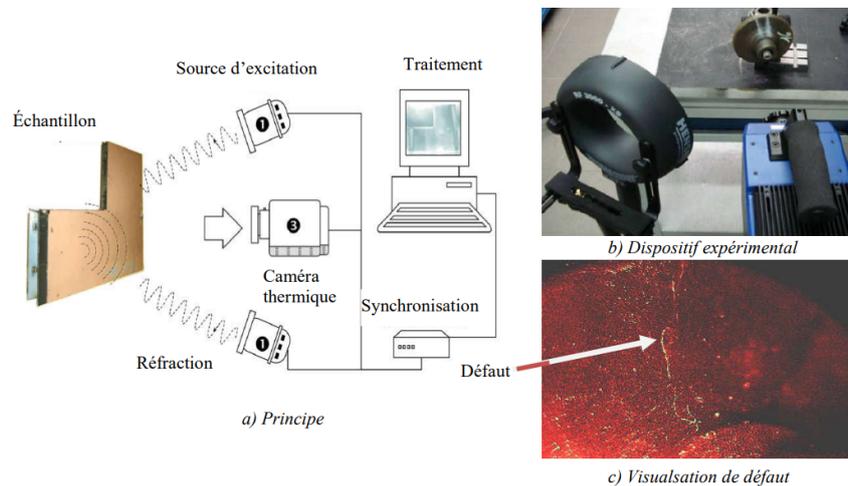


Figure I.9: CND par thermographie [15]

Les techniques d'inspection par thermographie infrarouge ont été développées et continuent d'être améliorées dans le domaine de la thermographie active. Les trois principales techniques sont la thermographie pulsée (TP), elle consiste à générer une impulsion thermique de courte durée. La thermographie modulée (TM) en régime permanent thermique, la température de la

surface varie périodiquement avec un module et un déphasage distinct entre les zones saines et les zones défectueuses et la thermographie de phase pulsée (TPP), combinaison entre les deux précédentes techniques [12, 13, 14].

Cette technique est idéale pour détecter les défauts potentiels dans les métaux et les matériaux composites. Cependant, elle ne peut pas détecter les défauts profonds car sa sensibilité diminue avec l'épaisseur et la géométrie de la pièce à inspecter doit être relativement simple.

Avantages

- Sans contact, rapide, modulable ;
- Facilement personnalisable en fonction des besoins ;
- Facilité de mise en œuvre ;
- Conservation des clichés (fichiers informatiques) ;
- Obtention de températures fiables des surfaces contrôlées pour les matériaux de forte émissivité (proche de 1) ;
- Compatible avec de nombreux types de matériaux (métaux, plastiques, composites) ;
- Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) sont bien détectées ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions.

Inconvénients

- Fiabilité des contrôles dépendant fortement des conditions météorologiques (contrôle pendant la nuit ou par temps couvert et en l'absence de fortes chaleurs) ;
- Dépend également des états de surface (corrosion ou coulure par exemple) pouvant perturber l'interprétation des clichés (différences d'émissivité) ;
- Températures peu fiables des surfaces pour les matériaux de faible émissivité ;
- 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 ;
- Contrôle possible uniquement sur des équipements déjà « alimentés » en chaleur (impossible à mettre en œuvre sur une pièce non raccordée ou pendant un arrêt de production).

Domaine d'application

Le CND infrarouge permet un gain de temps et une réduction des coûts de contrôle, sur de petites surfaces comme sur des pièces industrielles de grandes dimensions. Moins contraignant techniquement et écologiquement que des techniques comme le ressuage ou la magnétoscopie, le CND infrarouge est 100% sans contact et ne nécessite aucune action sur la pièce avant ou après le contrôle. Il est donc une alternative intéressante à ces méthodes conventionnelles.

I.6.g/ Bruit de Barkhausen:

La technique de CND Bruit de Barkhausen est une méthode non-destructive utilisée pour détecter les microfissures et la fatigue des matériaux ferromagnétiques. Cette technique repose sur l'analyse des variations du champ magnétique induit dans le matériau lorsqu'il est soumis à un champ magnétique alternatif. Le principe de la technique Bruit de Barkhausen est basé sur l'émission de bruits magnétiques par les microfissures présentes dans le matériau. Ces bruits sont détectés par un capteur placé à proximité du matériau, et leur analyse permet de déterminer la présence et la profondeur des microfissures.



Figure I.10: CND par Barkhausen [11]

Le contrôle par bruit Barkhausen réside dans la mesure et l'analyse d'un signal généré lorsqu'un champ magnétique alternatif est appliqué à un matériau ferromagnétique. Cette technique a été inventée et étudiée dès la première partie du 20ème siècle.

Les avancées en matière de traitement informatique des données et le développement commercial d'équipements d'analyse ont permis à partir du début des années 1980 de considérer cette technique comme une méthode de contrôle non destructive apte à détecter les dommages thermiques. Elle a continué à s'imposer comme une technique fiable pour un

nombre croissant d'applications, en particulier pour les défauts thermiques induits par exemples par des opérations de meulage ou de traitements thermiques.

L'aptitude de cette méthode à identifier des changements de microstructure dans un matériau ou le niveau des contraintes qu'il subit fut établie à la fois dans des spécifications d'essais mises en œuvre dans l'industrie et dans la littérature scientifique.

Aujourd'hui, il s'agit bien d'une technique reconnue dans divers secteurs à des fins d'optimisation des procédés, de contrôle qualité, et de suivi en temps réel des opérations de fabrication [16].

I.6.h/ Courants de Foucault

Les courants de Foucault par hommage à Jean Bernard Léon Foucault 1851 sont des courants électriques créés dans une région conductrice, soit par un déplacement de cette région dans un champ magnétique, soit par un champ magnétique variable dans le temps. Ces courants créent un champ magnétique qui s'oppose la cause de la variation du champ extérieur [8] comme c'est illustré sur la figure I.11 :

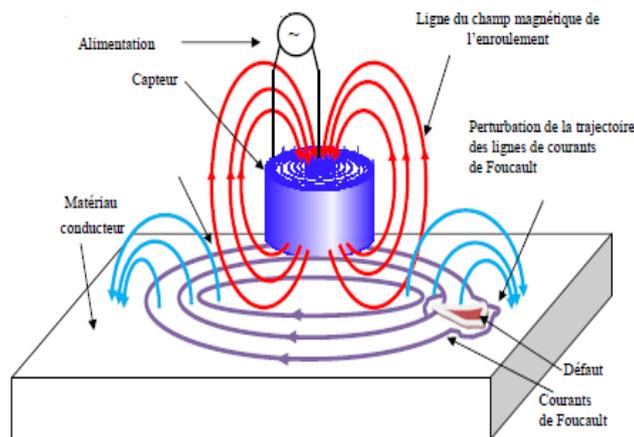


Figure 1.11: Présentation des courants de Foucault [15]

1/ Principe de contrôle par courant de Foucault

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

Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler, la trajectoire de ces courants sera perturbé soit par la géométrie soit par les caractéristiques internes de la pièce. Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) [17], un défaut dans la pièce déviara la circulation des courants de Foucault et modifiera donc le champ magnétique résultant. La variation du champ magnétique est détectée à l'aide d'une bobine ou d'un capteur de champ magnétique [8]. Elle sera fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible, une mesure directe de ce champ ou d'une de ces grandeurs dérivées (tension, impédance...etc.) permettra de caractériser la cible [17].

2/ Mise en œuvre du contrôle

Dans un dispositif CND-CF, les informations topologiques des courants de Foucault générés au sein de la pièce sont riches. Cependant, ces courants ne peuvent pas être mesurés directement. Les informations nécessaires à la commande sont obtenues grâce à un capteur inductif constitué d'une inductance ou d'un ensemble de bobines. En effet, la variation d'impédance ou différence de potentiel aux bornes de la bobine représente le flux magnétique généré et la puissance dissipée du fait de la présence de courants de Foucault dans la pièce à contrôler. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Dans ce contexte, on peut classer les capteurs suivant leurs caractéristiques:

- ✓ Structure ;
- ✓ Forme ;
- ✓ Fonction ;
- ✓ Mode de contrôle.

3/ Effet de peau

L'intensité des courants de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ_e (en Sm^{-1}) et une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ_p (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques millimètres. L'épaisseur de peau est définie :

$$\delta_p = \sqrt{2/\mu\sigma_e\omega} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{I.2})$$

Cette profondeur est pure convention. Appelée profondeur de pénétration ou épaisseur de peau, seuls 63% des courants de Foucault circulent dans cette épaisseur, se sont les couches les plus importantes du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les défauts de surface.

Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan, et exprimé par la relation suivante :

$$J_z = J_s e^{(-z\sqrt{f\pi\sigma_e\mu})} = j_s e^{(-\frac{z}{\delta_p})} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

δ_p : L'épaisseur de peau [m],

f : La fréquence du courant [Hz],

μ : La perméabilité [H/m],

σ_e : La conductivité électrique [S/m],

z : La profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m],

J_s : Le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z=0$) [A/m^2],

J_z : La densité de courant dans une pièce.

Combinant les deux formules I.1 et I.2, on trouve :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\sigma\mu}} \quad (\text{I.4})$$

4/ Diagramme d'impédance normalisée

Effectivement, le diagramme d'impédance normalisé est souvent utilisé pour caractériser les propriétés électromagnétiques des matériaux conducteurs ce qui peut être utile dans de nombreuses applications industrielles. Cette méthode est particulièrement utile dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault, où l'on cherche à détecter des défauts ou des variations de propriétés dans des matériaux sans les endommager se fait par une mesure d'impédance de la bobine.

Le diagramme d'impédance normalisée est un outil pour étudier l'interaction entre une sonde et une cible [17]. Pour ne considérer que les variations dues à la présence de la cible, on

utilise l'impédance normalisée qui élimine certaines caractéristiques propres de la sonde. La mesure devient alors indépendante de la fréquence d'excitation et de la géométrie de la sonde. Au lieu de cela, elle dépend des paramètres de la cible tels que sa géométrie, sa conductivité électrique, sa perméabilité magnétique et la distance sonde/cible [17], il représente l'impédance complexe d'un matériau en fonction de la fréquence, normalisée par une impédance de référence. Il est tracé dans le plan complexe, avec la partie réelle de l'impédance normalisée (X_n) en fonction de la partie réelle de l'impédance complexe (R_n). La trajectoire parcourue par l'extrémité du vecteur impédance lors d'un déplacement de la bobine sera caractéristique des propriétés électromagnétiques et les paramètres du matériau tout changement dans l'un des paramètres de la pièce entraîne un déplacement du point représentatif de l'impédance de la sonde dans le plan et peut être utilisée comme signature pour l'identifier ou pour détecter des défauts.

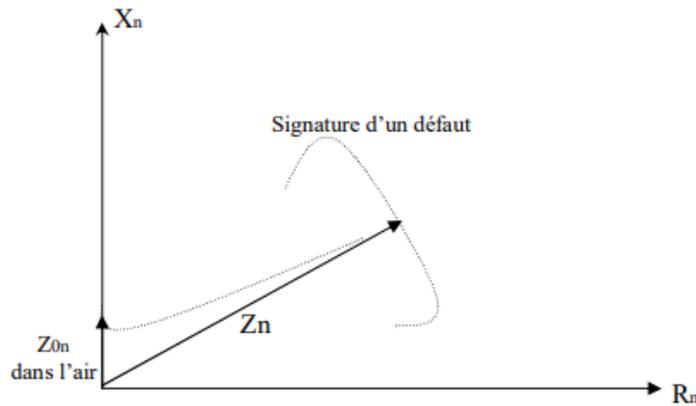


Figure I.12: Diagramme d'impédance normalisée [17]

- La réactance de la bobine seule X_0
- La résistance de la bobine seule R_0
- La réactance de la bobine en présence du matériau X
- La résistance de la bobine en présence du matériau R
- Impédance normalisée de la bobine au contact du matériau Z_n

$$Z_n = R_n + j X_n \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$X_n = X/X_0$: La réactance normalisée

$R_n = (R - R_0)/X_0$: La résistance normalisée

Et :

$$Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (\text{I.6})$$

Avec :

Z_0 : Impédance normalisée de la bobine à vide

La présence de défauts ou d'inhomogénéités de la cible induit une modification dans l'espace de l'un ou de plusieurs des paramètres influents (σ , *lift - off* . . .), qui se traduit dans le plan d'impédance (R_n, X_n), par un déplacement du point représentatif de la sonde [17].

5/ Types des capteurs pour le contrôle par CF

a / Définition d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (information entrante) une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps, électrique). Cette grandeur, représentative de la grandeur prélevée, est utilisable à des fins de mesure ou de commande description [18].

b/ Principe des capteurs

Le capteur d'élimination de courant de Foucault est un outil essentiel pour la détection et la mesure de défauts dans les matériaux conducteurs. Le principe de fonctionnement de ce capteur repose sur la variation du champ magnétique induit par le courant de Foucault généré dans le matériau.

Simplement, Les capteurs de courants de Foucault fonctionnent en émettant un champ électromagnétique à haute fréquence vers le matériau à tester. Ce champ électromagnétique induit des courants de Foucault dans le matériau, qui génèrent à leur tour un champ magnétique opposé au champ électromagnétique initial. Ce champ magnétique induit est mesuré par le capteur.

La mesure du champ magnétique induit permet de déterminer la conductivité électrique du matériau testé. Les variations dans la conductivité électrique du matériau peuvent être causées par des défauts tels que des fissures, des porosités ou des inclusions, ce qui permet de détecter ces défauts avec une grande précision.

Les capteurs à courants de Foucault utilisent les propriétés conductrices de la cible en regard de laquelle est placé un circuit magnétique de grande perméabilité (en ferrite généralement) sur lequel est bobiné un enroulement d'excitation alimenté avec des fréquences élevées de manière à réduire l'épaisseur de peau. A l'approche du circuit magnétique, cette cible devient le siège de nappes de courants surfaciques (dits de Foucault ou encore désignés

dans le monde anglo-saxon par eddy current “courants tourbillonnants”), elles-mêmes génératrices d’un champ magnétique qui s’oppose au champ incident, [19]

La conjonction des deux sources de champ entraîne une nouvelle répartition des lignes de champ qui se traduit par une modification de la réluctance au niveau du capteur. La détection se fait, soit par la mesure de l’amplitude des oscillations, soit par celle du courant consommé par l’oscillateur due à la variation de la réluctance, soit encore par un bobinage secondaire qui recueille la force électromotrice créée par la variation de la réluctance [20].

Pendant le contrôle par capteurs à courants de Foucault, l’analyse des changements d’impédance fournira des indications utilisables pour le contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l’intensité des courants de Foucault dépendent des propriétés physiques et géométriques de l’objet considéré et bien sûr des conditions d’excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On peut donc concevoir qu’un défaut constituant une discontinuité électrique perturbe la circulation des courants de Foucault, provoquant une modification du champ induit, qui est toujours opposé au champ excité (loi de Lenz). Par conséquent, le courant à travers la bobine d’excitation change. Autrement dit, l’impédance Z_0 de la bobine est modifiée comme c’est illustré par la figure I.13.

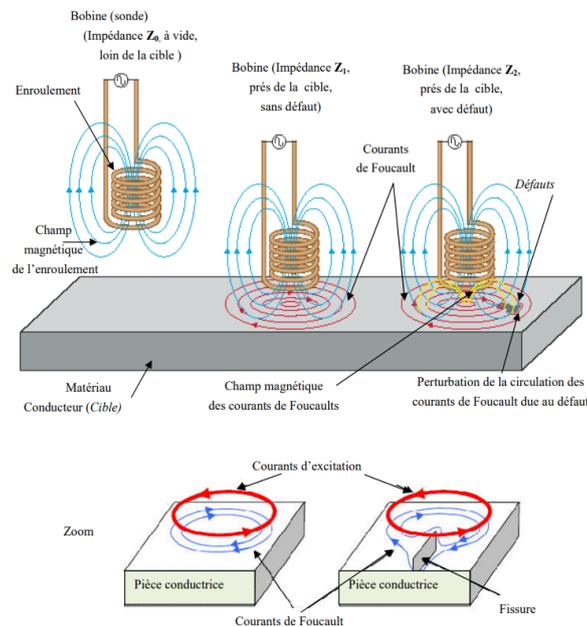


Figure I.13: Variation de l’impédance lors de l’apparition d’un défaut [15]

c/ Classification des capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle.

c.1/ Classification selon la géométrie

c1.a/ La bobine encerclante

La figure I.14 présente un dispositif destiné au contrôle lors du chargement de produits longs de formes simples et de diamètres modestes tels que fils, tige et tubes. Les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée alésée doivent avoir un diamètre très peu supérieur au diamètre du produit, afin d'obtenir un facteur de remplissage le plus proche possible de l'unité, Cette condition est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop élevé conduisant à une dégradation du rapport signal/bruit.

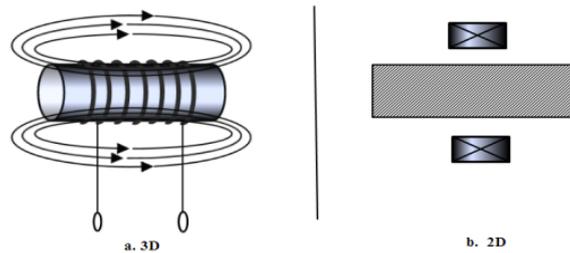


Figure I.14: Bobine encerclant [21]

c.1.b/ Sonde interne

La figure I.15 illustre un capteur utilisé pour contrôler un produit vide de l'intérieur, dont les bobines de mesure autour de l'axe translation. Ils fonctionnent avec ou sans noyau.

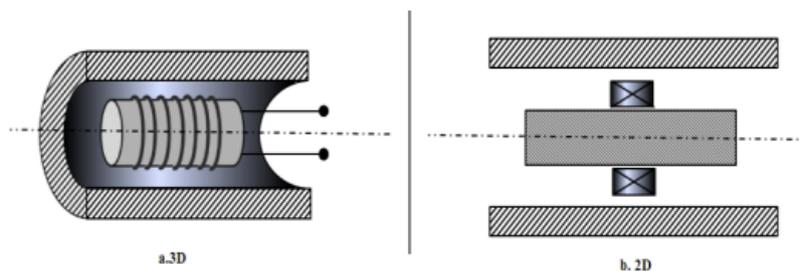


Figure I.15: Bobine interne glissante avec noyau [21]

c.1.c/ Sonde ponctuelle

La figure I.16 définit un capteur destiné à l'examen local de la pièce à partir de sa surface sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Les capteurs CF élémentaires sont constitués d'un ou de deux éléments inductifs (le plus souvent des bobines ou des mini-bobines) et sont dits "ponctuels" car la zone d'inspection qui leur est associée est spatialement limitée, elle est utilisée pour inspecter des objets à des emplacements spécifiques. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet un contrôle local des pièces, même des pièces aux géométries complexes.

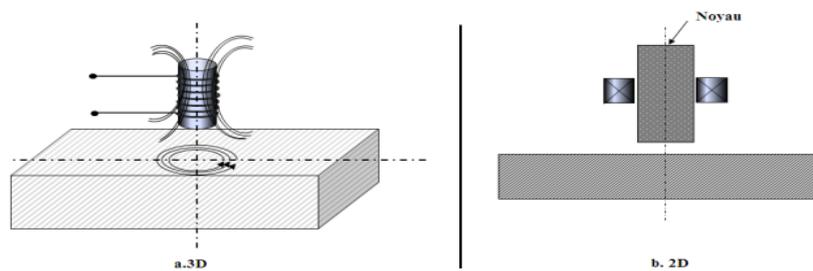


Figure I.16: Bobine simple avec noyau [21]

c.1.d/ Bobine plate

La figure I.17 présente une bobine plate qui est utilisée pour inspecter les surfaces planes de matériaux conducteurs. Elle se compose d'une plaque plane en forme de disque ou de carré, souvent en acier inoxydable, avec une bobine de fil de cuivre enroulée autour de son centre. Cette bobine est alimentée par un courant alternatif haute fréquence pour générer un champ magnétique qui pénètre dans le matériau inspecté. Les courants de Foucault induits dans le matériau créent leur propre champ magnétique, qui est détecté par la sonde plate.

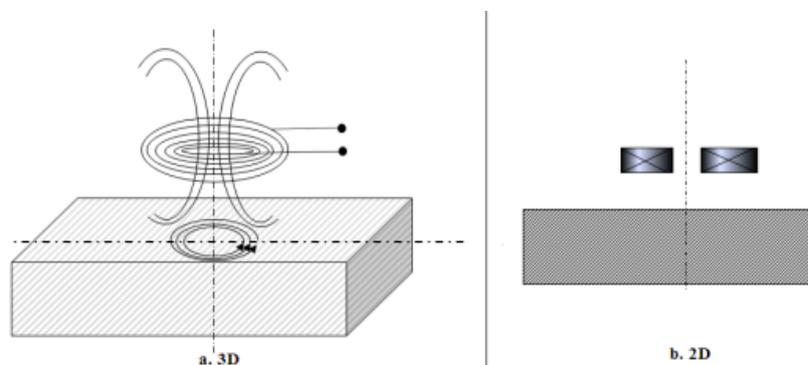


Figure I.17: Bobine plate [21]

Les sondes plates peuvent être utilisées pour détecter une grande variété de défauts sur des surfaces planes, tels que les fissures, les bosses, les rayures, les piqûres de corrosion, etc. Elles sont particulièrement utiles pour inspecter les surfaces en métal, en aluminium, en cuivre, en laiton et en titane. Les sondes plates sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale, la production d'énergie, l'industrie automobile et d'autres secteurs où la qualité des produits est essentielle.

c.1.e/ Sonde interne tournante

La figure I.18 mentionne une sonde interne tournante qui est utilisée pour inspecter l'intérieur des tubes, des tuyaux et des conduites. Contrairement aux sondes plates qui inspectent les surfaces planes, la sonde interne tournante est conçue pour être insérée à l'intérieur d'un tube et effectuer une inspection en tournant sur elle-même. La sonde interne tournante est composée d'une tête de capteur qui contient une bobine de fil de cuivre, un arbre central et des roulements à billes pour permettre la rotation de la sonde. La tête de capteur est insérée dans le tube à inspecter et est alimentée par un courant alternatif haute fréquence. La rotation de la sonde permet une inspection complète de la surface intérieure du tube ou du tuyau.

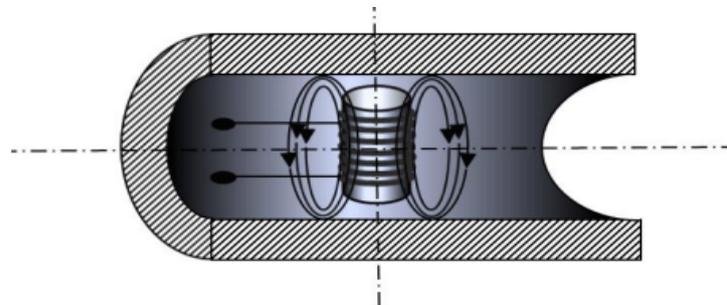


Figure I.18: Bobine plate [21]

c.2/ Classification selon la fonction

En origine, tous les capteurs remplissent deux fonctions : la fonction d'alimentation et de mesure. Si celui-ci est assuré par un seul bobinage, on parle de capteur à double fonction, sinon on parle de capteur à fonction séparée.

c.2 .a/ Capteur à double fonction

Le capteur à double fonction comme c'est présenté par la figure I.19 est aussi appelé système à simple bobinage, les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par le même bobinage. Il s'agit de montage le plus simple, constitué d'une seule bobine émettrice et réceptrice, à travers laquelle on fait passer un courant pour créer un flux alternatif qui produit un changement d'impédance qui peut être détecté en mesurant très finement sa tension complexe.

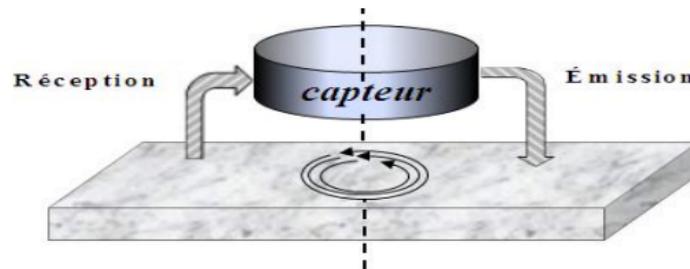


Figure I.19: Capteur à double fonction [21]

c.2.b/ Capteur à fonctions séparées

Pour la détection de défauts profonds, il est favorable d'augmenter les dimensions de la bobine d'excitation. Cependant, cet agrandissement de l'émetteur se fait au détriment de la résolution spatiale du capteur. Il faut donc trouver un compromis entre sensibilité et résolution. Ce compromis est facilité par l'introduction de capteurs à fonctions séparées.

Aussi appelé système à double bobinage, les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des bobinages séparés. Contrairement au premier, il est constitué de deux bobines, l'une pour générer le flux magnétique et l'autre pour collecter la variation de couplage liée à la variation de matière. C'est-à-dire utilisé uniquement pour la mesure comme c'est illustré sur la figure I.20.

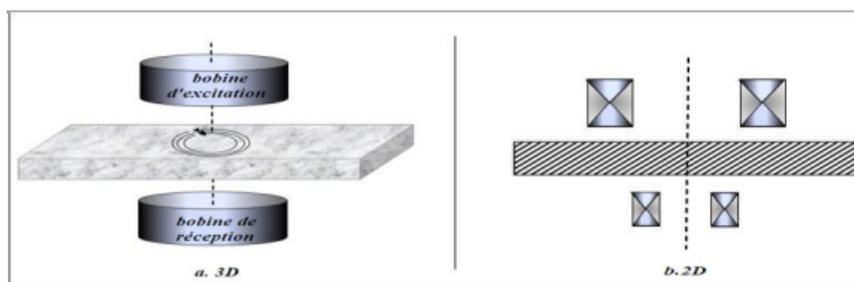


Figure I.20: Capteur à fonction séparée [21]

c.3/ Classification selon le mode de contrôle

Il existe deux modes de mesure en fonction de l'intensité du champ, en fonction des propriétés électromagnétiques et des perturbations de la pièce à identifier ou à tester.

c.3.a/ Mode absolu

Les capteurs absolus présentés par la figure I.21 sont conçus pour mesurer la valeur effective d'une caractéristique d'un produit testé par rapport à une référence fixe. Le signal capté par la bobine est très faible par rapport au signal transmis. Pour cette raison, des mesures comparatives sont effectuées lors des essais par courants de Foucault. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et effectue des mesures en comparant le signal reçu à une référence électronique artificielle.

Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément à des variables utiles et perturbatrices telles que la température, qui modifie la perméabilité et la conductivité du matériau testé.

Le schéma suivant montre la mesure en mode absolu par un pont d'impédance

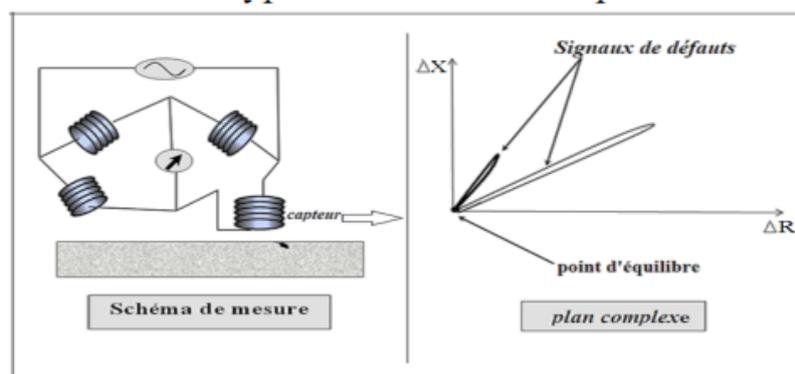


Figure I.21: Sonde absolue [21]

c.3.b/ Mode différentiel

Ils se composent d'au moins deux éléments de mesure connectés dans le capteur, Pour les capteurs à deux éléments, une mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément à deux endroits adjacents. Ce type de capteur permet de détecter des discontinuités, notamment lors d'un déplacement le long d'une pièce s'affranchissant des perturbations induites dues aux une variation d'épaisseur ou de conductivité.

La figure I.22 montre une mesure à l'aide d'un pont d'impédance.

- Deux branches du pont forment une bobine de sondage. Le pont est équilibré 'il n'y a pas de valeur par défaut.

- Un signal apparaît lorsque la sonde passe devant le défaut (courbe de Lissajous) dans le plan complexe.

L'amplitude du signal est fonction du volume du matériau. De même, les phases dépendent du type de fissure et de sa profondeur.

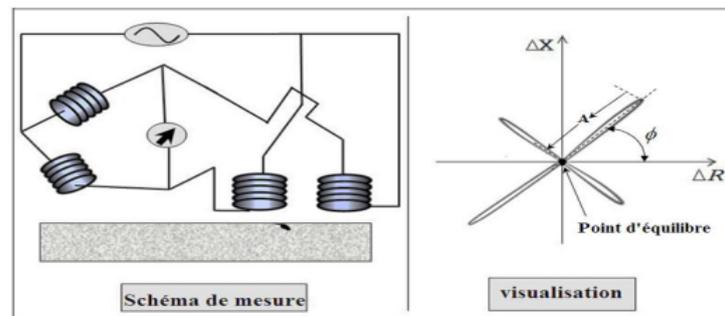


Figure I.22: Capteur différentiel à deux éléments [21]

Caractéristiques des sondes en mode différentiel:

- Composé de deux bobines côte à côte ou concentriques.
- Faible sensibilité au décolage.
- Détection d'erreur due à l'asymétrie
- Application: recherchez les défauts courts.

En pratique, il existe essentiellement trois types de capteurs à courants de Foucault :

c.3.c/ Capteurs encerclants

Les capteurs donnés par la figure I.23 sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elles analysent un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit.



Figure I.23: Différents modèles de capteurs encerclants [23]

Les capteurs encerclant sont destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques [22].

c.3.d/ Capteurs internes

Les capteurs internes présentés par la figure I.24 sont destinés à inspecter le produit de l'intérieur et les bobines sont coulées concentriquement à l'axe du produit. Ce type de capteur est principalement utilisé dans l'industrie nucléaire pour contrôler plusieurs tubes de petit diamètre formant des échangeurs de chaleur, des condenseurs ou des générateurs de vapeur.

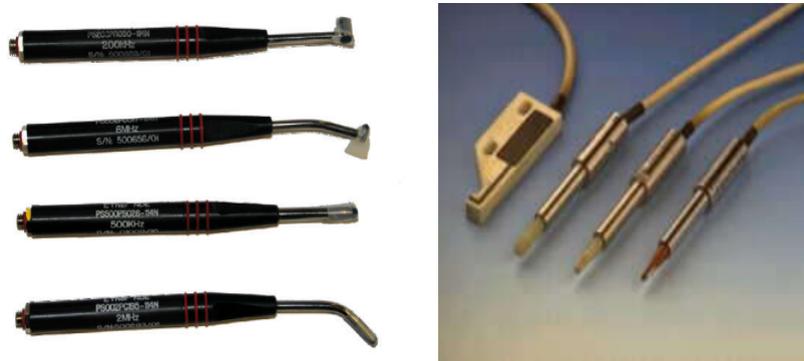


Figure I.24 : Capteurs internes réels [24]

c.3.e/ Capteurs sondes

Les sondes illustrées par la figure I.25 sont également connus sous le nom de palpeurs ou de bobines ponctuelles. Ces sondes consistent en un ou plusieurs enroulements et peuvent être placées sur ou près de la surface du composant testé. Généralement coulé dans un noyau de ferrite avec son axe perpendiculaire à la surface, il est très perméable aux faibles champs magnétiques alternatifs et reste en bon état de sensibilité ponctuelle pour la détection de défauts minuscules, Ils balayent une zone approximativement égale à la surface de la section transversale, Ils permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles.

La géométrie de la sonde dépend de la cible à tester et des dimensions de fissure souhaitées. Il existe donc des sondes à têtes plus ou moins grosses (embase plate) pour vérifier de grandes surfaces et des défauts plus importants. D'autre part, il existe des sondes avec des têtes très fines (tête de crayon) pour permettre l'inspection dans des espaces très restreints et pour détecter de petits défauts. Ils sont disponibles avec des bases droites ou inclinées pour une

manipulation facile, Ces capteurs conviennent à l'exploration ponctuelle sous contrôle manuel ou au balayage de grandes zones sous contrôle automatique.



Sondes à tête large

Sondes à tête fine

Figure I.25: Capteur sonde [15]

c.4/ Sondes particulières

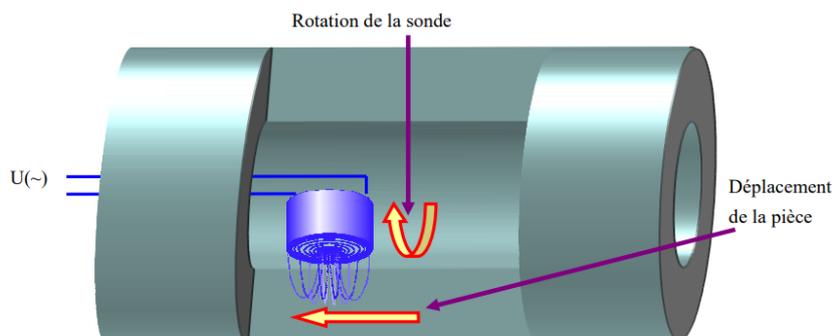
c.4.a/ Sonde tournante

C'est une sonde interne ou encerclante particulière, le produit à contrôler est déplacé longitudinalement à travers des sondes tournantes créant ainsi un pas d'inspection hélicoïdal. Les vitesses (translation et rotation) sont combinées pour avoir un recouvrement des zones contrôlées à chaque passage comme c'est présenté sur la figure I.26.

Plus sensible que les sondes encerclante avec une meilleure détection de fissures axiales, mais plus fragile en plus d'un allongement du temps d'examen, étant données, la vitesse de rotation (800 à 1500 tr/min suivant les modèles) et la distance entre sonde et cible [22].

La longueur minimale des défauts pouvant être systématiquement détectés dépend de la vitesse de rotation de la sonde et de la vitesse de déplacement du produit.

Utilisé pour détecter des défauts tels que des fissures dans des fils étirés à froid ou de longues barres.

**Figure I.26:** Sonde rotative [15]

c.4.b/ Sonde à bobines perpendiculaires

Elle est constituée de deux bobines disposées perpendiculairement l'une à l'autre telle qu'elle est présentée sur la figure I.27, elle est couramment utilisée en mode différentiel caractérisé par:

- Très sensible aux fissures le long d'un des axes de la bobine,
- Faibles effets de portance, conductivité, perméabilité,
- Faible sensibilité aux fissures en orientation 45° ou 135°

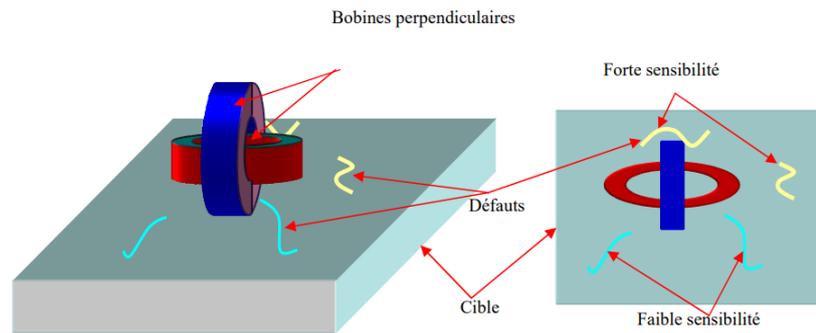


Figure I.27: Sonde à bobines perpendiculaires [15]

c.5/ Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND

Les courants de Foucault offrent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, et les fluctuations les plus faibles du signal sont fidèlement reproduites dans le second contrôle dans les mêmes conditions. Cette propriété est particulièrement intéressante pour la maintenance des équipements, notamment lors du suivi de leur évolution lors des contrôles réguliers.

L'automatisation des systèmes de contrôle, ainsi que l'archivage électronique et le traitement du signal des "signatures" d'erreurs, représentent des voies de développement actuelles qui simplifient l'utilisation de la technologie CND par courants de Foucault, Nous distinguons:

- Mesure de conductivité électrique;
- Mesure de l'épaisseur du revêtement isolant;
- Détection de fissures ;
- Inspection des tubes, tiges et fils.
- Détection d'objets métalliques dans des environnements isolés

6/ Avantages, inconvénients et limitation de la méthode

6.a / Avantages

Cette technique est largement utilisée dans l'industrie pour inspecter les pièces et les équipements critiques tels que les turbines, les avions, les trains, les pipelines, les moteurs, etc. Les avantages clés de la méthode CND par courants de Foucault sont les suivants :

- Inspection rapide et précise : La méthode CND par courants de Foucault permet une inspection rapide et précise des pièces et des équipements critiques. Cette technique peut détecter des défauts de l'ordre de quelques microns de profondeur, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité et la fiabilité des équipements.
- Sensibilité élevée : la méthode de courants de Foucault peut détecter des défauts très petits, même à une profondeur relativement grande sous la surface d'un matériau.
- Polyvalent : La méthode CND par courants de Foucault peut être utilisée pour inspecter une grande variété de matériaux conducteurs tels que les métaux ferreux et non ferreux, les alliages, etc. Cette technique peut également être utilisée pour détecter différents types de défauts tels que les fissures, les porosités, les inclusions, les zones de corrosion et les variations de densité.
- Possibilité de détecter des défauts de surface et subsurface : cette méthode permet de détecter les défauts de surface, tels que les fissures et les rayures, ainsi que les défauts subsurface, tels que les vides et les porosités.
- Capacité de mesure quantitative : la méthode de courants de Foucault peut fournir des informations quantitatives sur les propriétés du matériau, telles que l'épaisseur et la conductivité.
- Automatisable : La méthode CND par courants de Foucault peut être automatisée, ce qui permet d'effectuer des inspections à grande échelle de manière rapide et fiable.
- Transportabilité de l'équipement, coût faible;
- Aucun inconvénient pour l'environnement ou la sécurité
- Inspection sans contact ;
- L'efficacité de la technique malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre
- Possibilité de mesurer à des températures élevée (900°) et même sous l'eau.

6.b/ Inconvénients

Bien que la méthode de courants de Foucault (CND) présente de nombreux avantages, elle présente également certains inconvénients et, notamment :

- Dépendance à la conductivité électrique : la méthode de CND fonctionne mieux pour les matériaux conducteurs, tandis que les matériaux non conducteurs tels que les plastiques ou les céramiques ne peuvent pas être inspectés efficacement.
- Compétences spécialisées requises : la méthode de CND nécessite une formation spécialisée pour la mise en place et l'interprétation des résultats d'inspection. Les opérateurs doivent être bien formés et qualifiés pour obtenir des résultats précis.
- Épaisseur limitée : la méthode de CND peut être limitée par l'épaisseur du matériau inspecté. Les courants de Foucault ont une portée limitée et ne peuvent pas pénétrer profondément dans les matériaux.
- Sensibilité limitée à certaines formes de défauts : la méthode de CND peut ne pas être en mesure de détecter tous les types de défauts, tels que les fissures très fines ou les défauts très profonds.
- Perturbations environnementales : les perturbations environnementales telles que les variations de température, les champs électromagnétiques et les interférences peuvent affecter la précision des mesures de CND.
- La détection des erreurs est locale.
- La position du capteur par rapport à l'échantillon peut affecter l'efficacité de la détection des défauts.
- L'inspection parfaite de pièces aux géométries complexes est difficile à mettre en œuvre. (besoin de créer une sonde spéciale).

6.c/ Limitations

Les principales limitations de la méthode de courants de Foucault sont la dépendance à la conductivité électrique des matériaux inspectés, la limite d'épaisseur, la taille des défauts détectables, les perturbations environnementales, le coût et la nécessité de compétences spécialisées pour mettre en place et interpréter les résultats d'inspection.

Sur le plan scientifique, la méthode de courants de Foucault est limitée par les propriétés électromagnétiques des matériaux inspectés, ainsi que par les interactions entre les courants de Foucault et les défauts détectés. Ces interactions peuvent être difficiles à modéliser avec précision, ce qui peut rendre l'interprétation des résultats d'inspection plus complexe. De plus,

les mesures de CND peuvent être influencées par les conditions environnementales, telles que la température et les champs électromagnétiques, ce qui peut affecter la précision des mesures. Enfin, la méthode est limitée par la capacité des équipements à générer des courants de Foucault avec la puissance et la fréquence appropriées pour détecter les défauts ciblés.

I.7/ Conclusion

Le Contrôle Non Destructif est un ensemble des méthodes non dommageables, ces méthodes permettent de détecter, mesurer, positionner, dimensionner, caractériser des défauts internes et externes, elles permettent aussi d'une façon indirecte de mesurer les caractéristiques des matériaux sans les modifier ou altérer, ce sont des méthodes invasives, parmi ces méthodes : les courants de Foucault, les ultrasons, l'infrarouge, la diffraction des rayons X et le bruit de Barkhausen. Leur principe consiste à apporter une excitation et avoir une réponse. C'est l'examen par les courants de Foucault et les ultrasons qui constituent le sujet de ce travail. Le choix d'un tel contrôle est justifié par sa simplicité, réalisation pratique non coûteuse.

Réseaux de neurones

II.1/ Introduction

La méthode de réseaux de neurones qui sont un type de modèle d'apprentissage automatique inspiré du fonctionnement du cerveau humain. Ils sont utilisés pour résoudre une grande variété de problèmes de classification, de prédiction et de reconnaissance de modèles complexes. Le concept de base d'un réseau de neurones consiste à interconnecter un grand nombre de nœuds (neurones) qui fonctionnent ensemble pour effectuer des calculs complexes sur un ensemble de données d'entrée. Les neurones sont organisés en couches, où chaque couche traite les données de l'entrée à travers une série de transformations mathématiques pour produire une sortie. Les réseaux de neurones sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment la vision par ordinateur, la reconnaissance vocale, la traduction automatique et la prédiction de séries temporelles. Ils sont également utilisés dans les applications industrielles telles que les systèmes de recommandation, les détecteurs de fraude et les systèmes de contrôle de processus [25, 26].

II.2/ Historique

- L'idée de modéliser les réseaux de neurones artificiels a été introduite pour la première fois dans les années 1940 par le mathématicien Warren Mc Culloch et le neurophysiologiste Walter Pitts. Ils ont publié un article sur la théorie des réseaux de neurones qui décrit un modèle simplifié de neurones et leur interconnexion pour résoudre des problèmes de logique.
- Dans les années 1950, le psychologue Frank Rosenblatt a développé le Perceptron, un réseau de neurones artificiels à une seule couche capable de résoudre des problèmes de classification simples.
- Dans les années 1960 et 1970, l'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels a diminué en raison des limitations de l'époque en matière de puissance de calcul et de stockage de données.
- Dans les années 1980, l'apprentissage en profondeur a commencé à émerger avec des algorithmes tels que le réseau de neurones récurrents (RNN) et le réseau de neurones à propagation arrière (backpropagation), qui ont permis des modèles de réseaux de neurones plus complexes et plus profonds. Cependant, ces algorithmes ont encore été limités par les ressources informatiques de l'époque.

- Dans les années 1990, les réseaux de neurones ont été largement remplacés par des modèles d'apprentissage automatique basés sur des arbres de décision et des SVM. Cependant, la situation a changé dans les années 2000 avec l'évènement des processeurs graphiques (GPU) qui ont permis d'accélérer considérablement les calculs nécessaires pour les réseaux de neurones.
- Au cours de la dernière décennie, les réseaux de neurones sont devenus le modèle d'apprentissage automatique le plus populaire, en grande partie grâce à l'avènement de l'apprentissage en profondeur. Les réseaux de neurones profonds ont permis des avancées dans des domaines tels que la reconnaissance d'image, la reconnaissance vocale, la traduction automatique et la génération de texte.

II.3/ Neurone biologique

Un neurone biologique comme illustré la figure II.1 est une cellule spécialisée dans le traitement et la transmission de l'information électrochimique dans le système nerveux. Il se compose essentiellement de :

- Corps cellulaire (soma) : il est centré par un noyau, toutes les informations recueillies par les synapses sont acheminées vers le corps cellulaire
- Synapse : une synapse est une jonction entre deux neurones ; et généralement entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre neurone.
- Dendrites : ce sont de fines extensions tubulaires qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Elles captent les signaux envoyés au neurone.
- L'axone : qui est la partie qui s'occupe de la transmission de l'information issue du corps cellulaire ; conduisant des signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée d'un autre neurone [27].

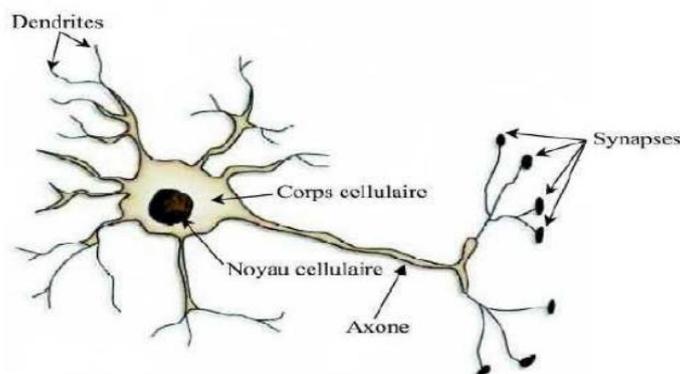


Figure II.1. Représentation schématique d'un neurone biologique [28]

II.4/ Neurone artificiel

Un neurone artificiel est une unité de traitement de l'information utilisée dans les réseaux de neurones artificiels, qui sont des modèles mathématiques inspirés du fonctionnement du cerveau humain.

Un neurone artificiel est un modèle simplifié de neurone biologique comme c'est présenté sur la figure II.2, ce modèle imite quelques fonctions du neurone biologique, comme la mémorisation associative, l'apprentissage et le travail en parallèle [29].

Le neurone artificiel « formel » est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. À chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire (neurone) est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. À chaque connexion d'entrée est associé un poids [30].

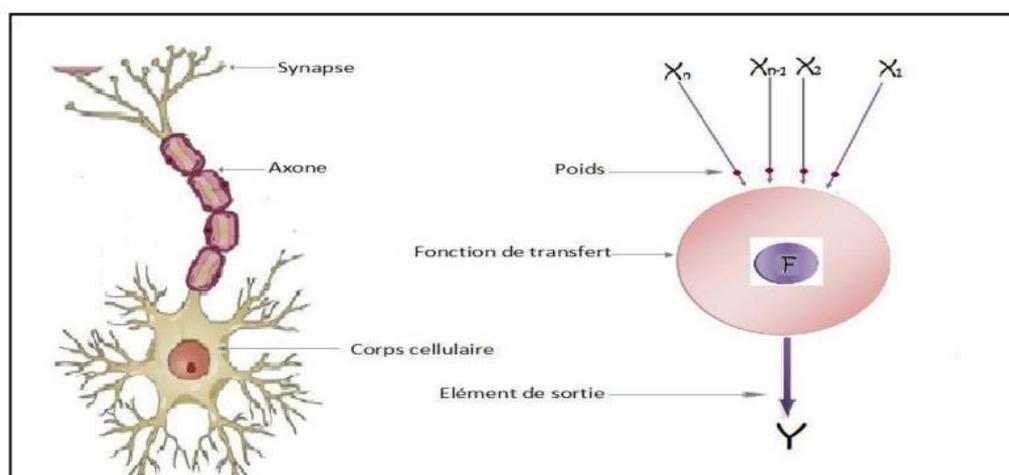


Figure II.2 Passage de neurone biologique au neurone artificiel [31]

Le neurone réalise alors trois opérations sur ses entrées [30]:

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

Par analogie avec la biologie, un neurone artificiel, reçoit l'information provenant des entrées x_i ($i = 1,2,3,4, \dots n$) par l'intermédiaire des connexions dont on affecte à chacune d'elles un

poids w abréviations de weight (poids en anglais) pondérant l'information, et aussi représentatif de la force de la connexion.

Le neurone artificiel fonctionne en deux étapes comme la figure II.3 illustre :

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

$$\vartheta_j = b_j + \sum_{i=1}^n \omega_{j,i} x_i \quad (\text{II.1})$$

Où :

$\omega_{j,i}$: Le poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée i

b_j : Terme constant appelé biais, il est considéré comme le poids d'une entrée 0 x égal à 1

Ainsi la relation (II.1) s'écrit plus simplement :

$$\vartheta_j = \sum_{i=0}^n \omega_{j,i} x_i \quad (\text{II.2})$$

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

$$S_j = g(\vartheta_j) = g\left(\sum_{i=0}^n \omega_{j,i} x_i\right) \quad (\text{II.3})$$

- Le choix de la fonction d'activation se révèle dans certains cas être un élément constitutif important des réseaux de neurones. Ainsi, le neurone peut être défini mathématiquement comme étant une fonction algébrique, a priori non linéaire (suivant g) et bornée, des entrées x_i et paramétrée par les poids $\omega_{j,i}$ [32] :

$$S_j = g(x_i, \omega_{j,i}) = g_{\omega_{j,i}}(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{II.4})$$

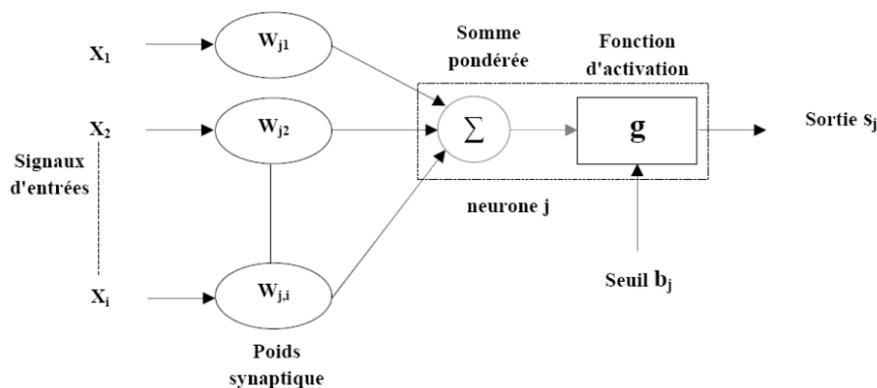


Figure II.3: Représentation d'un neurone artificiel [28]

II.5/ Fonctions d'activation

En apprentissage automatique, une fonction d'activation est une fonction mathématique appliquée sur la somme pondérée des entrées d'un neurone, qui permet de produire sa sortie. La fonction d'activation introduit de la non-linéarité dans le modèle et permet ainsi de modéliser des relations non-linéaires entre les entrées et les sorties. Il existe plusieurs types de fonctions d'activation qui sont utilisées dans les réseaux de neurones artificiels. Il existe plusieurs fonctions d'activations, les plus utilisées sont [28]:

a/ Fonction seuil asymétrique (Heaviside)

C'est une fonction discontinue en β prenant la valeur de 1 pour tous les réels supérieur à β et la valeur de 0 pour tous les réels inférieur ou égal à β .

Si $\beta = 0$ la fonction s'appelle la fonction de Heaviside.

$$f(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq \beta \\ 1 & \text{si } X > \beta \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Le graphique de la fonction seuil est donné par la figure II.4 :

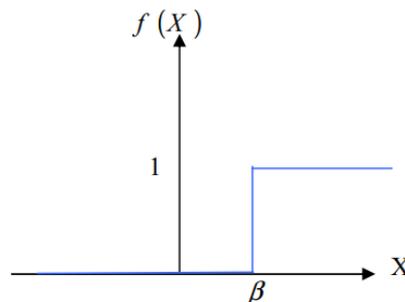


Figure II. 4 Fonction seuil [28]

b/ Fonction sigmoïde

C'est une fonction en forme de S qui transforme la somme pondérée des entrées en une sortie comprise entre 0 et 1. Elle est souvent utilisée pour les problèmes de classification binaire.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-bx}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

b : Gain de la fonction d'activation.

Le graphique de la fonction sigmoïde est présenté par la figure II.5 :

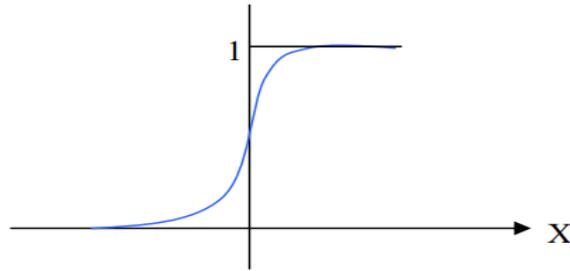


Figure II.5 : Fonction sigmoïde [28]

c/ Fonction saturation (Hardtanh)

C'est une fonction d'activation défini par :

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } X > \beta \\ X & \text{si } -\beta < X < \beta \\ -1 & \text{si } -\beta < X \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Le graphique de la fonction saturation est présenté par la figure II.6 :

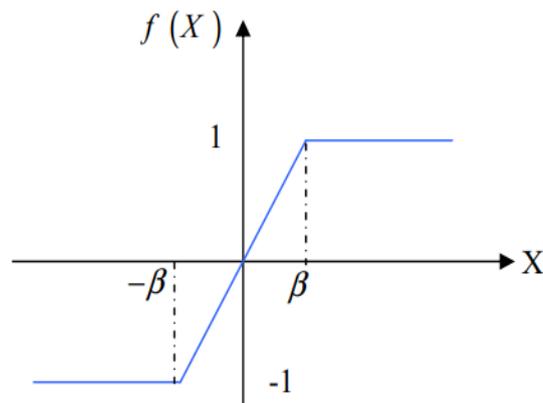


Figure II.6: Fonction saturation [28]

d/ Fonction gaussienne centrée

C'est une fonction en exponentielle de l'opposé du carré de l'abscisse. Elle a une forme caractéristique en courbe en cloche. Cette fonction est donnée par :

$$f(x) = \exp\left(\frac{-1 X^2}{2 \sigma^2}\right) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

σ : L'écart type de la gaussienne

Le graphique de la fonction gaussienne est présenté par la figure II.7 :

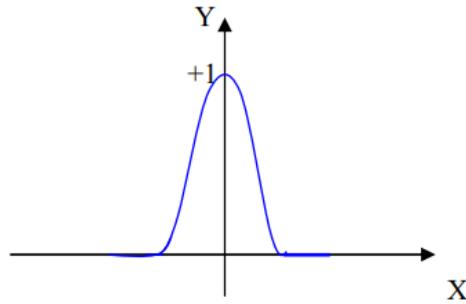


Figure II.7: Fonction gaussienne centrée [28]

e/ Fonction gaussienne ReLU

La fonction Relu est une des fonctions d'activation les plus utilisées. Elle est définie mathématiquement par :

$$f(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X < 0 \\ X & \text{si } X \geq 0 \end{cases}$$

Le graphique de la fonction ReLU est présenté par la figure II.8 :

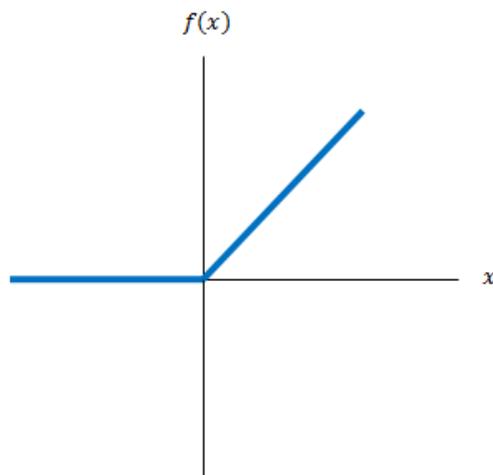


Figure II.8: Fonction ReLU centrée

f/ Fonction Softmax

C'est une fonction exponentielle normalisée qui converti un nombre un vecteur de n nombre réel en une distribution de probabilité sur n choix. Cette fonction est défini par :

$$\sigma(z)_j = \frac{e^{z_j}}{\sum_{k=1}^n e^{z_k}} \quad \text{avec } j \in \{1, \dots, n\}$$

II.6/ Composition d'un réseau de neurone

Un réseau de neurones est une architecture computationnelle inspirée du fonctionnement du cerveau humain. Il est composé de plusieurs couches de neurones artificiels interconnectés, qui travaillent en parallèle pour résoudre des problèmes complexes.

La composition d'un réseau de neurones comprend généralement les éléments présentés par la figure II.9 :

a/ Couche d'entrée (input layer) :

Cette couche reçoit les données d'entrée du réseau, qui peuvent être des valeurs numériques ou des images. Chaque neurone dans cette couche représente une caractéristique spécifique des données.

b/ Couches cachées (hidden layers)

Ces couches sont situées entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles sont responsables de l'extraction des caractéristiques importantes des données. Un réseau de neurones peut avoir une ou plusieurs couches cachées, en fonction de la complexité du problème. En général, les fonctions d'activations sont non linéaires sur ces couches.

c/ Couche de sortie (output layer)

Cette couche produit les prédictions finales du réseau de neurones. Le nombre de neurones dans la couche de sortie dépend du type de problème à résoudre. Par exemple, pour un problème de classification binaire, il peut y avoir un neurone avec une fonction d'activation sigmoïde pour représenter la probabilité d'appartenance à la classe positive.



Figure II.9 : Architecture d'un réseau de neurones

II.7/ Type des réseaux de neurones

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, nous citons principalement :

a/ Les réseaux de neurones monocouches

Les réseaux de neurones monocouches sont des réseaux de neurones artificiels qui ont une seule couche de neurones. Chaque neurone de la couche de sortie est connecté à toutes les entrées. Les neurones de sortie effectuent une combinaison linéaire des entrées pondérées par des poids et sont ensuite passés par une fonction d'activation pour produire la sortie.

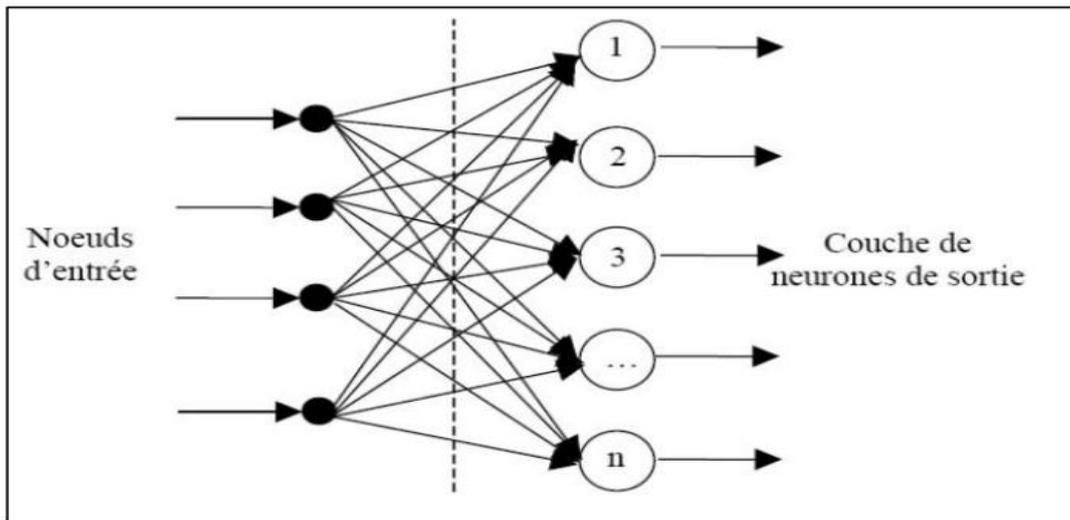


Figure II.10 : Réseaux à une seule couche [35]

a.1/ Perceptron monocouche (MLP)

Le perceptron est un algorithme d'apprentissage supervisé de classifieurs binaires schématisé par la figure II.11 (c'est-à-dire séparant deux classes). Il a été inventé en 1957 par Frank Rosenblatt. Ses travaux font suite à la première modélisation du neurone biologique proposée par Walter Pitts et Warren McCulloch en 1943. Rosenblatt propose un algorithme permettant d'adapter les paramètres du modèle d'un neurone en fonction d'exemples d'apprentissage [29].

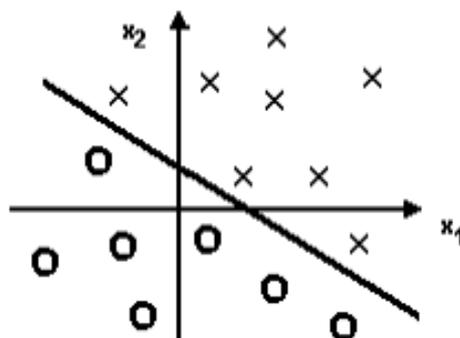


Figure II.11 : Schéma d'une classification [35]

Le Perceptron simple comme présenté par la figure II.12 est un réseau dit (feed-forward) car il propage l'information (l'activation des unités) de la couche d'entrée à la couche de sortie [Rosenblatt, 1958] il ne se compose que d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie et ne contient aucun cycle, donc le perceptron monocouche n'a qu'une seule sortie à laquelle toutes les entrées sont connectées. Les entrées et les sorties sont booléennes en d'autre terme le perceptron mono-couche est constitué d'un seul neurone qui agit par la fonction d'activation [28].

Considérant le neurone qui reçoit les deux entées x_1 et x_2 multipliées par les poids w_1 et w_2 respectivement qui donnent la valeur d'entrée a sans biais, où $a = w_1x_1 + w_2x_2$ puis l'activation de la fonction à seuil de l'entrée a donnée comme suit :

$$F(a) = \begin{cases} 1 & \text{si } a \geq 0 \\ 0 & \text{si } a < 0 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Dans ce cas, la sortie égale à 1, Si $a \geq 0$ et 0 sinon, alors :

$$w_1x_1 + w_2x_2 = 0 \quad (\text{II.10})$$

Donc :

$$x_1 = \left(\frac{-w_2}{w_1} \right) x_2 \quad (\text{II.11})$$

Cette équation présente la frontière de décision. On remarque qu'elle est une frontière linéaire. Durant le processus d'apprentissage le mouvement de la droite de décision est régi par la correction de l'erreur.

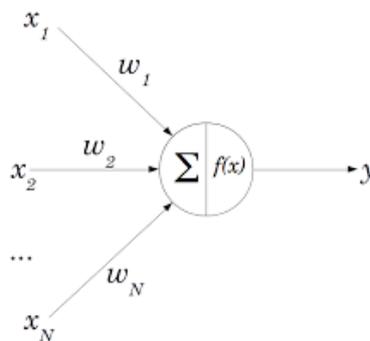


Figure II.12: Perceptron simple [34]

b/ Les réseaux neurones multicouche

Il existe beaucoup des modèles des neurones multicouches comme le réseau de Kohonen et le réseau d'Hopfield [35]. Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement au perceptron multicouche.

b.1/ Le perceptron multicouche (PMC ou MPC)

Le perceptron multicouche (PMC) appelé en anglais (MPC: Multilayer Perceptron) est un type de réseau de neurone artificiel, il est composé au minimum de trois couche, une couche d'entrée, une autre au milieu dite couche cachée, et une dernière en sortie comme illustré par la figure II.13. Ainsi les informations en entrée sont connectées à tous les neurones de la première couche, tous les neurones de la première couche sont connectés à tous les neurones de la seconde couche, et ainsi de suite jusqu'à la dernière couche, appelée couche de sortie. On peut avoir plusieurs couche cachées, chaque couche est composée de plusieurs nombre de neurone où chaque neurone utilise une fonction d'activation non linéaire, l'information reçue dans la couche d'entrée se propage vers la couche de sortie dans une voie unidirectionnel appelé (feed forward), la couche de sortie représente la sortie du réseau neuronal [36].

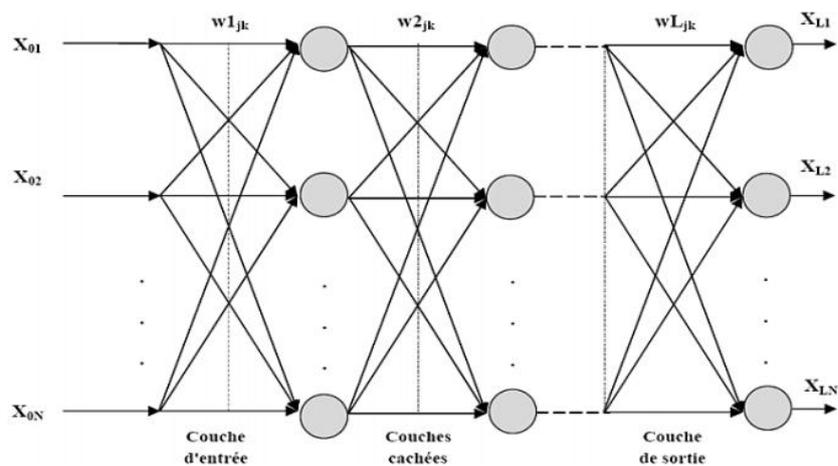


Figure II.13 : Réseaux perceptron multicouche [35]

II.8/ Architecture des réseaux de neurones

L'architecture décrit la structure d'interconnexion entre les neurones qui composent le réseau on parle aussi de topologie, les neurones peuvent être arrangés par couches. On distingue alors les couches cachées de neurones et la couche de neurones de sortie. Dans les réseaux non bouclés, les entrées des neurones d'une couche sont les sorties des neurones de la couche précédente et les entrées des neurones de la première sont reliées au « monde extérieur

». Dans les réseaux à connexions locales, les neurones d'une couche ne sont pas tous forcément reliés à la couche suivante. Les réseaux non bouclés propagent donc l'information de l'entrée vers la sortie (feedforward). Dans les réseaux bouclés appelés aussi réseaux récurrents, on retrouve le même type d'interconnexion entre neurones, mais avec des possibilités de retours en arrière (feedback). Ces réseaux sont ainsi utilisés pour la modélisation et la commande dynamique de processus, les rétroactions permettent à ce type de réseaux de présenter un comportement temporel.

Une architecture réseaux neurones est composée par :

- Nombre d'entrées.
- Nombre de sortie.
- Nombre de nœuds
- Façon d'interconnexion et d'organisation des nœuds.

On distingue deux structures de réseaux en fonction de leur connexion comme la figure II.14 illustre :

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

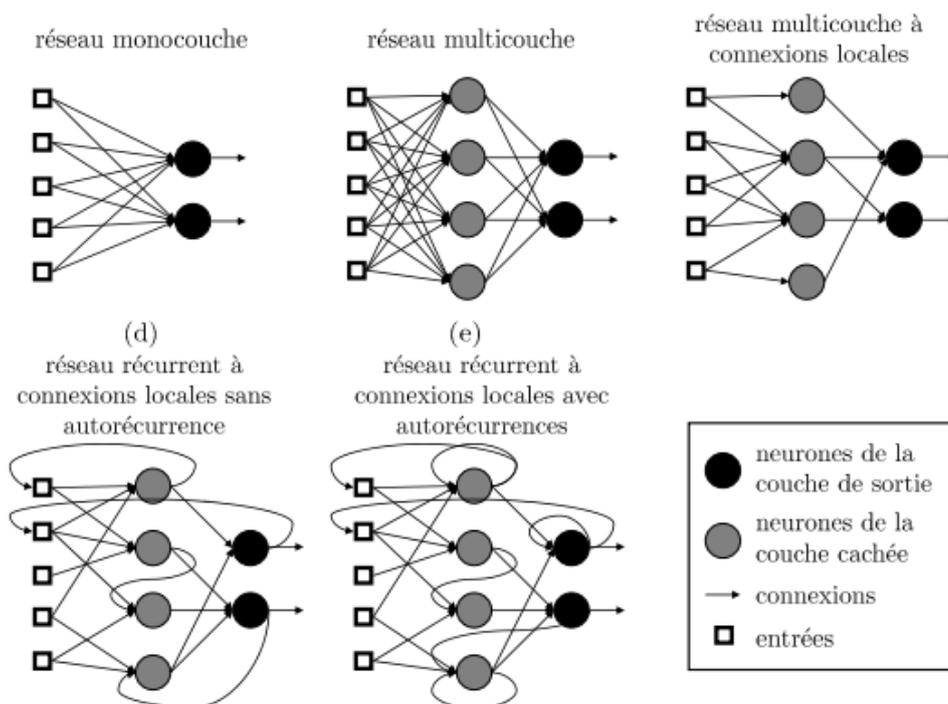


Figure II.14: Principaux types d'architectures et de structures d'interconnexions des réseaux de neurones [39]

a/ Réseaux de neurones non bouclé

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour en arrière" comme c'est illustré sur la figure II.15 et II.16.

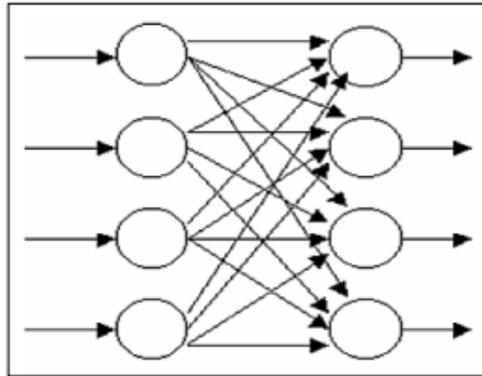


Figure II.15: Réseaux neurones non bouclé à connexions totales [35]

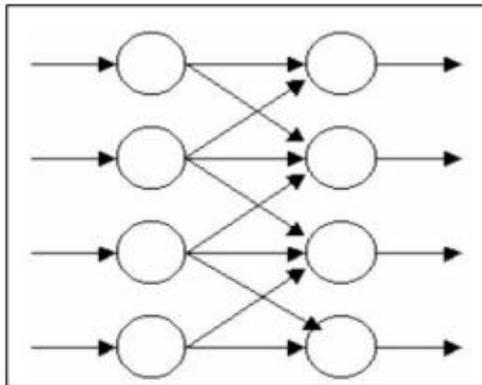


Figure II.16: réseaux neurones non bouclé à connexions partielles [35]

C'est à dire si l'on se déplace dans le réseau à partir d'un neurone quelconque en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ. Les réseaux de neurones non bouclés sont des outils statiques, utilisés principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonctions non linéaires et de modélisation de processus non linéaires [37].

b/ Réseaux de neurones bouclé

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou

plusieurs sorties comme c'est mentionné sur la figure II.17. Ce sont des réseaux qui ont un ou plusieurs rebouclages internes, leurs sorties à un instant donné dépendront des entrées aux mêmes instants, et aux instants antérieurs. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation [35].

Les rebouclages rajoutent donc un effet de mémorisation du passé. Ces réseaux de neurones bouclés constituent un système dynamique "à temps discret", régi par une (ou plusieurs) équation aux différences non linéaires, résultant de la composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions.

Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard [37]. La forme la plus générale des équations régissant un réseau de neurones bouclé est appelée forme canonique [35].

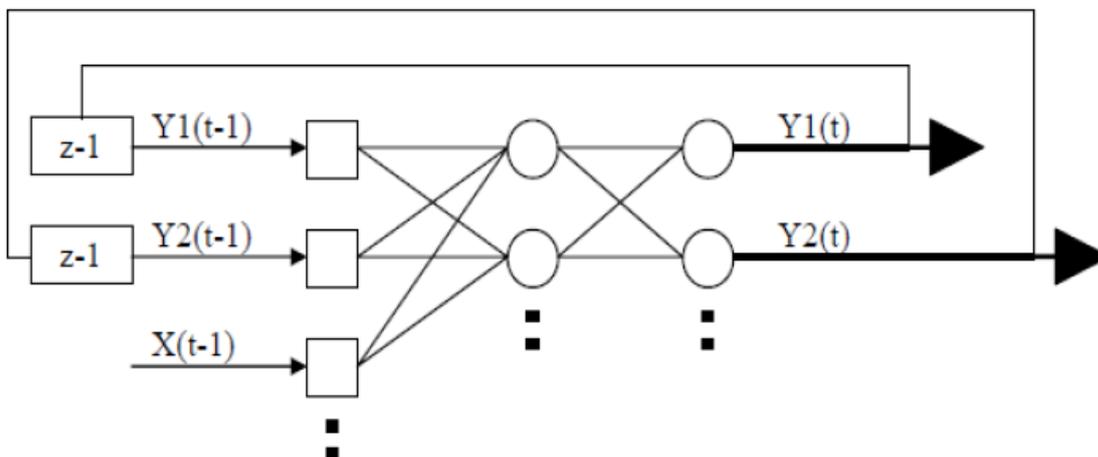


Figure II.17: Structure d'un réseau de neurones bouclés [38]

II.9/ Type d'apprentissage

Les progrès de l'intelligence artificielle (IA) dans le milieu des affaires n'ont fait que renforcer cette nécessité. Les systèmes de sécurité peuvent transformer les scans d'empreintes digitales et de visages en données biométriques permettant de déverrouiller les portes et les smartphones. Les systèmes bancaires sont capables de détecter les comportements d'achat inhabituels et d'envoyer automatiquement un message invitant le client à vérifier les transactions. Les assistants vocaux des smartphones utilisent le traitement du langage naturel pour analyser l'audio et répondre à une grande diversité de demandes. Toutes ces

technologies remarquables évoluent sans cesse grâce à l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage.

L'apprentissage, pour les réseaux de neurones formels, consiste à calculer les paramètres de telle manière que les sorties du réseau de neurones soient, pour les exemples utilisés lors de l'apprentissage, aussi proches que possible des sorties « désirées », qui peuvent être le code de la classe à laquelle appartient la forme que l'on veut classer, la valeur de la fonction que l'on veut approcher ou celle de la sortie du processus que l'on veut modéliser, ou encore la sortie souhaitée du processus à commander. Les techniques d'apprentissage des réseaux de neurones formels sont des algorithmes d'optimisation : ils cherchent à minimiser l'écart entre les réponses réelles du réseau et les réponses désirées, en modifiant les paramètres par étapes (appelées « itérations ») successives [40].

a / L'apprentissage supervisé

L'approche de l'apprentissage supervisé consiste à utiliser des jeux de données étiquetés qui entraînent des algorithmes pour classer les données ou prédire des résultats avec précision. Le modèle exploite les données étiquetées pour mesurer la pertinence des différentes caractéristiques afin d'affiner progressivement l'ajustement du modèle en fonction du résultat connu. L'apprentissage supervisé a la sortie désirée ou correcte du réseau à une entrée donnée est connue à priori. L'apprentissage du réseau consiste alors à mesurer la différence entre son comportement actuel et le comportement de référence (la sortie désirée) et corriger ses poids de façon à réduire cette erreur.

Il existe deux grandes catégories d'apprentissage supervisé :

a.1/ Classification

Un problème de classification utilise des algorithmes pour classer les données dans des segments spécifiques. Dans la vie quotidienne, il s'agit par exemple des algorithmes qui servent à rejeter les spam arrivant dans une boîte de réception principale.

a.2 / La régression

Il s'agit d'une méthode statistique qui s'appuie sur des algorithmes pour mesurer la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Avec les modèles de régression, l'utilisateur peut établir des prédictions de cause à effet basées sur différents points de données. Parmi les algorithmes de régression: la régression de réseau neuronal et la régression logistique .

b/ L'apprentissage non supervise

L'apprentissage non supervise (aussi appelé auto organisation) ou sans superviseur, Dans ce cas des algorithmes sont utilisés pour examiner et regrouper des jeux de données non étiquetés. Ces algorithmes peuvent révéler des schémas inconnus dans les données sans aucune supervision humaine. On modifie les poids du réseau en fonction de critères internes. Les comportements résultants de cet apprentissage sont en général comparables à Des techniques de classification non supervisée. Ce type d'apprentissage consiste à organiser les entrées présentées au système en classe Ou groupes présentant des caractéristiques communs. La distinction entre ces classes est Basée sur des mesures de similarité entre les entrées.

b.1/ Clustering

Les données non étiquetées sont regroupées à l'aide de techniques de regroupement en fonction de leurs similitudes ou de leurs différences. Par exemple, si une équipe travaille sur la segmentation du marché, l'algorithme de clustering k-moyennes attribuera des points de données similaires aux groupes qui représentent un ensemble de paramètres. Le regroupement peut se faire en fonction de l'emplacement, des niveaux de revenus, de l'âge des acheteurs ou de n'importe quelle autre variable.

b.2/ Association

La méthode d'association de l'apprentissage non supervisé est intéressante pour trouver des relations entre les variables d'un jeu de données. C'est la technique utilisée pour créer le message de type « les autres clients ont également consulté ». Elle est particulièrement adaptée aux moteurs de recommandation. Si 15 clients ayant acheté un nouveau téléphone ont également commandé un casque, les algorithmes recommandent un casque à tous les clients qui mettent un téléphone dans leur panier.

b.3/ Réduction de la dimensionnalité

Il arrive qu'un jeu de données comporte un nombre de caractéristiques exceptionnellement élevé. La réduction de la dimensionnalité permet de réduire ce nombre sans compromettre l'intégrité des données. Il s'agit d'une technique couramment utilisée avant le traitement des données. Cela sert par exemple à supprimer le bruit d'une image pour améliorer sa qualité. Le tableau ci-dessous représente la différence entre un apprentissage supervisé et non supervisé :

Tableau II.1: La différence entre un apprentissage supervisé et non supervisé

	Apprentissage supervisé	Apprentissage non supervisé
Données d'entrée	Données connues en entrée	Données inconnues en entrée
Complexité informatique	Complexe	Moins complexe
Domaines d'activités	Classification et régression	Clustering, l'association et réduction de la dimensionnalité
Précision	Produit des résultats précis	Génère des résultats modérés

c/ Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement ou (Reinforcement Learning models) est une méthode d'apprentissage basé sur l'expérience. Cette méthode consiste à laisser l'algorithme apprendre de ses propres erreurs, à partir d'expériences successives, ce qu'il convient de faire de façon à optimiser une récompense quantitative au cours du temps et à trouver la meilleure solution [41].

L'intelligence artificielle se retrouve directement confrontée à des choix. Si elle se trompe, elle est "pénalisée". Au contraire, si elle prend la bonne décision, elle est "récompensée". Afin d'obtenir toujours plus de récompenses, il permet de contourner certaines des limitations de l'apprentissage supervisé. Il consiste en un espèce d'apprentissage supervisé, mais avec un indice de satisfaction scalaire au lieu d'un signal d'erreur vectoriel. L'apprentissage supervisé permet de calculer un indice de satisfaction et d'estimer la direction pour ajuster les poids synaptiques grâce à un signal d'erreur fourni par un professeur. Cependant, dans l'apprentissage par renforcement, le manque de signal d'erreur rend impossible le calcul de cette direction. Pour l'estimer, le réseau doit essayer des actions et observer les résultats pour déduire la direction de changement des poids synaptiques, en implantant un processus d'essais et d'erreurs. Cela ralentit considérablement l'apprentissage et crée un dilemme entre

l'utilisation de l'information déjà apprise sur le mérite des différentes actions et l'acquisition de nouvelles connaissances pour mieux les choisir à l'avenir [42].

II.10/ Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage du perceptron multicouche est souvent réalisé par un algorithme supervisé basé sur la retro propagation du gradient.

La retro propagation du gradient est une méthode pour calculer le gradient de l'erreur pour Chaque neurone du réseau de neurones, de la dernière couche vers la première. Cette Technique utilise l'algorithme classique de correction des erreurs basée sur le calcul du Gradient grâce à la retro propagation D'une manière générale, on cherche à obtenir du réseau une réponse préétablie comme étant Correcte. On dispose pour cela d'une base de connaissance de type entrées /sorties désirées On Compare en suite la sortie de chaque neurones de sortie à la sortie attendue. On introduit une Fonction d'erreur pour chaque sortie que l'on va chercher à minimiser en modifiant les Poids du réseau. Une fois les poids définis par cet algorithme à partir d'exemples connus de l'utilisateur, On va chercher à extrapoler le réseau, en lui fournissant des entrées inconnues.

a/ Définition Rétro-propagation

Les calculs s'effectuent dans le sens inverse (de la sortie vers l'entrée) comme c'est mentionné sur la figure II.18. À la sortie du réseau, on forme le critère de performance E en fonction de la sortie réelle de système et sa valeur désirée. Puis, on évalue le gradient de E par rapport aux différents poids en commençant par la couche de sortie et en remontant vers la couche d'entrée.

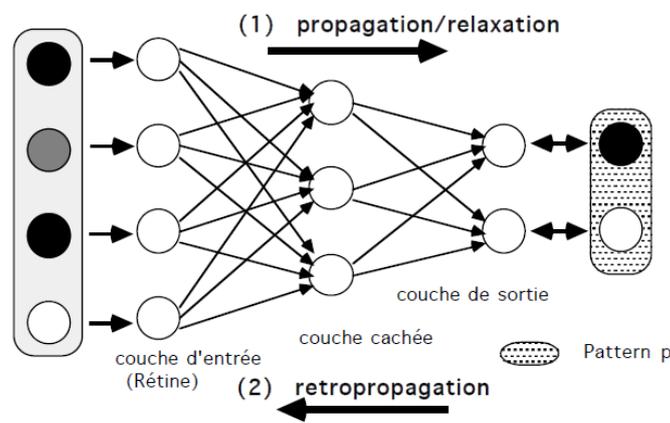


Figure II.18: (1) propagation (2) retro propagation [43]

L'algorithme de la rétro-propagation du gradient est un algorithme itératif conçu pour minimiser un critère quadratique d'erreur.

L'erreur est la différence entre la valeur désirée pour le neurone de sortie et sa valeur calculée par propagation. En effet, l'algorithme nécessite une fonction continue, non-linéaire et différentiable comme fonction de transfert du neurone [35].

b/Algorithme d'apprentissage par la descente de gradient

C'est un algorithme itératif conçu pour le but de minimiser l'erreur entre la sortie obtenue par le réseau multicouche et la sortie désirée :

$$F(x_i) \cong z_i \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$F(x_i)$: La sortie calculée

z_i : La sortie désirée

L'algorithme de la descente du gradient de l'erreur se résume par les étapes suivantes :

1/ Choix de la fonction d'activation et le réseau de neurones

2/ Initialisation des poids et le pas.

3/ Présentation des entrées et des sorties désirées de la base d'apprentissage

4/ Calcul de l'erreur locale et totale tel que :

$$E_i = (z_i - F(x_i))^2 \quad (\text{II.13})$$

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_1^N E_i \quad (\text{II.14})$$

5/ Tant que l'erreur est importante, on calcule les gradients de l'erreur :

$$\text{gradient } E_i = \left(\frac{\partial E_i}{\partial w_i} \right) \quad (\text{II.15})$$

6/ Calcul des nouveaux poids :

$$w_i(k+1) = w_{ij}(k) + \delta \left(\frac{\partial E_i}{\partial w_i(k)} \right) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$w_i(k+1)$: Le nouveau poids; $w_{ij}(k)$: L'ancien poids; δ : Le pas (le taux d'apprentissage).

7 /Retour à l'étape 2

II.11/ Conclusion

Nous avons tenté à montrer par ce chapitre bibliographique sur les réseaux de neurones que ces derniers sont susceptibles d'apporter des solutions efficaces et élégantes dans le domaine d'ingénierie notamment dans le traitement des données. Parmi les modèles les plus reconnus dans le domaine de recherche ceux du multicouche à retro propagation qui sont caractérisés par leurs capacité d'apprentissage. Les résultats de recherches obtenus prouvent que les réseaux de neurones surpassent les techniques empiriques actuellement utilisées.

Résultats et interprétations

III.1/ Introduction

Pour mieux caractériser les défauts par intelligence artificielle en utilisant le contrôle non destructif, une étude expérimentale a été mise en place. Cette étude est initiée par la réalisation des défauts 'débouchant artificiels' suivie de la construction d'une base de données qui repose sur les essais ultrasonores et une analyse des résultats d'essais du courant de Foucault. Une fois la base de donnée est réalisée, une implémentation sous Matlab est faite pour la reconstruction des défauts par les réseaux de neurones en utilisant l'algorithme de la descente du gradient.

III.2/ Généralités sur l'aluminium

Un alliage est formé par le mélange de deux ou plusieurs métaux différents, ou d'un métal avec un autre élément chimique tel que le cuivre ou le zinc. Les alliages d'aluminium sont extrêmement répandus dans l'industrie en raison de leurs propriétés uniques qui les rendent à la fois plus résistants et plus légers que l'aluminium pur.

Contrairement à l'aluminium pur, qui est un métal tendre et malléable, les alliages d'aluminium présentent une structure cristalline plus complexe, ce qui leur confère une résistance et une durabilité accrues. De plus, les alliages d'aluminium peuvent être conçus pour posséder des propriétés spécifiques, telles que la résistance à la corrosion ou la conductivité électrique.

La création des alliages implique l'ajout d'autres éléments à l'aluminium dans le but d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer de nouvelles propriétés. Dans le cas des alliages d'aluminium, cela implique l'incorporation d'éléments tels que le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc, à des concentrations combinées pouvant atteindre 15% du poids total de l'alliage. L'objectif principal de ces ajouts est d'accroître la résistance mécanique de l'aluminium.

Les alliages d'aluminium sont identifiés par un numéro à quatre chiffres, où le premier chiffre représente la série qui est caractérisée par les principaux éléments d'alliage utilisés. Cette classification permet de distinguer les différents types d'alliages et de mieux comprendre leurs caractéristiques et leurs applications spécifiques.

En explorant les propriétés et les compositions des alliages d'aluminium, nous pourrions approfondir notre compréhension de ces matériaux polyvalents et innovants, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour leur utilisation dans divers domaines industriels.

a/ Classification des alliages d'aluminium

Il existe plusieurs types d'alliages d'aluminium, chacun ayant ses propres caractéristiques et propriétés. Les alliages de la série 1000 sont principalement composés d'aluminium pur et sont utilisés pour leur résistance à la corrosion et leur conductivité électrique élevée. Les alliages de la série 2000 contiennent du cuivre et sont connus pour leur résistance aux chocs et leur durabilité. Les alliages de la série 3000 contiennent du manganèse et sont utilisés pour leur résistance à la corrosion et leur capacité à être soudés facilement. Les alliages de la série 5000 contiennent du magnésium et sont utilisés pour leur résistance à la corrosion et leur légèreté. Enfin, les alliages de la série 6000 contiennent du silicium et du magnésium et sont utilisés pour leur résistance à la corrosion et leur facilité de traitement [44].

Chaque type d'alliage a des utilisations spécifiques dans l'industrie. Par exemple, les alliages de la série 1000 sont souvent utilisés dans la production de produits alimentaires en raison de leur toxicité et de leur résistance à la corrosion. Les alliages de la série 2000 sont couramment utilisés dans la production d'avions et de voitures en raison de leur résistance aux chocs et à la corrosion. Les alliages de la série 3000 sont souvent utilisés dans la production d'échangeurs de chaleur en raison de leur capacité à être soudés facilement. Les alliages de la série 5000 sont utilisés dans la production de navires et de structures marines en raison de leur résistance à la corrosion. Enfin, les alliages de la série 6000 sont couramment utilisés dans la production de cadres de bicyclettes et de pièces automobiles en raison de leur facilité de traitement et de leur résistance à la corrosion.

b/ Les constituants d'alliage Aluminium série 2000

Lorsque l'aluminium est utilisé seul, ses caractéristiques mécaniques sont relativement faibles. Pour améliorer ces caractéristiques, on ajoute d'autres éléments lors de la fusion, ce qui donne naissance à un nouvel alliage. Selon les choix effectués, cet alliage peut devenir plus résistant, plus malléable, plus dur, etc. Cependant, il est essentiel de comprendre l'impact de chaque élément ajouté afin d'obtenir les propriétés souhaitées. Voici les principaux éléments d'alliage couramment utilisés avec l'aluminium :

- **Cuivre:** Les alliages de cette série contiennent un pourcentage compris entre 2,6 et 6,3 % de cuivre. L'ajout de cuivre favorise la formation de composés tels que CuAl_2 et CuMgAl_2 , renforçant ainsi l'alliage et lui conférant d'excellentes propriétés mécaniques. Le CuAl_2 est particulièrement important car il contribue au durcissement

des alliages. De plus, la présence de cuivre augmente la résistance mécanique de l'alliage, réduit le retrait lors de la coulée et améliore son usinabilité ;

- **Magnésium:** Les alliages de cette série peuvent contenir de 0,5 à 1,5 % de magnésium. La présence de magnésium contribue également au durcissement structural de l'alliage, améliorant ainsi ses propriétés mécaniques.
- **Silicium:** L'ajout de silicium, à des teneurs inférieures à 0,8 % ;
Sa principale caractéristique est d'améliorer la coulabilité du métal et, par conséquent, de limiter les risques de criques. En revanche, le silicium diminue l'usinabilité de la pièce et rend plus difficile le traitement anodique de décoration ;
- **Manganèse:** L'ajout de manganèse, à des teneurs inférieures à 0,8 %, favorise également, Il sert à augmenter la résistance mécanique à haute température des alliages de fonderie et à réduire le retrait lors de la solidification

Il est important de noter que les teneurs spécifiques en ces éléments varient selon les besoins et les applications spécifiques de l'alliage d'aluminium [44, 45, 46].

c/ Les caractéristiques d'alliage Aluminium série 2000

Les alliages d'aluminium série 2000 sont largement utilisés et surtout dans le domaine d'aéronautique grâce à leurs caractéristiques suivant :

- L'alliage d'aluminium séries 2xxx se caractérise par une haute résistance et des propriétés de résistance thermique. Il peut être utilisé comme composant à température d'exploitation de 150°C. Lorsque la température dépasse les 125°C, l'alliage d'aluminium séries 2000 offre une résistance plus élevée que celle de l'alliage d'aluminium séries 7075 ;
- Cet alliage d'aluminium présente une excellente performance de moulage lors de la trempe ou du recuit. Il peut être de haute dureté après processus de traitement thermique spécifique ;
- L'alliage d'aluminium séries 2000 ne présente pas une bonne résistance à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain et industriel. En le recouvrant par aluminium pur, l'alliage d'aluminium dispose d'excellentes propriétés de protection.
- Pendant le soudage, cet alliage peut se fissurer facilement. Pour éviter cela, il faut adopter des techniques de rivetage ou de soudage spéciales telles que le soudage par faisceaux d'électrons ;
- Les alliages de la série 2000 ont une bonne conductivité électrique ;

- La légèreté, C'est le meilleur des atouts de l'aluminium. Ce dernier est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg/m³, soit trois fois moindres que celle du fer ;
- La résistance à la traction varie de 186 à 427 N/mm² [44, 45, 46] ;
- La limite d'endurance varie entre 0,25 et 0,35 dans le cas des alliages de la série 2000 ;
- La ténacité est une propriété est caractérisée par le critère FIC lequel se situe entre 21 et 23 Mpa \sqrt{m} pour le 2017A.

Nous donnons ci-dessous quelques propriétés essentielles du 2017A utilisé dans notre travail.

Tableau III.1 : Compositions chimiques de 2017A.

Éléments	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn
Poids (%)	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,2-0,8	0,7	0,1	0,25

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques de 2017A.

Alliage	Module Young (Mpa)	Coeff de Poisson(Mpa)	Limite de rupture(Mpa)	Limite d'élasticité(Mpa)	Allongement %
2017A	74000	0.33	390	260	9

Tableau III.3: Les caractéristiques physiques de 2017A.

Alliage	Masse volumique (kg /m ³)	Température de fusion(C°)	Conductivité thermique (W/mk)	Module d'élasticité (Gpa)	Etat
2017A	2790	560°-640°	125-140	69-72	T451

d/ Utilité de l'alliage d'Aluminium série 2000

- **Aéronautique** : La raison essentielle de son utilisation dans le domaine aéronautique est la réduction du poids des appareils afin de minimiser la consommation ou augmenter la charge utile et le rayon d'action. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux utilisé en tonnage dans plusieurs secteurs économiques tels que l'aéronautique où la plupart des alliages utilisés sont issus de la série 2000. Dans cette famille d'alliages, la nuance 2024 reste la plus utilisée. Ce sont ses qualités de résistance à l'endommagement (qui se traduit par une longue durée de vie avant l'initiation des premières phases d'endommagement) qui font que les constructeurs l'utilisent sur toutes les structures. Il est principalement appliqué dans les cadres d'avion, telles que les longerons, les nervures, les poutres et les panneaux. Leur résistance élevée permet de supporter les contraintes et les charges subies pendant le vol, en plus dans les rivets, les composants des hélices. La technologie aéronautique a permis, par ses besoins de plus en plus pointus, de développer de nouveaux alliages et de nouvelles techniques de caractérisation des alliages d'aluminium. Cependant il présente des caractéristiques mécaniques pouvant être améliorées ;
- **Transports ferroviaires** : Le gain de poids est d'autant plus intéressant que dans ces matériels où la fréquence des arrêts est relativement élevée afin de réduire la consommation lors du démarrage et l'usure lors du freinage (métros récents, remorques d'autorail, etc.) ;
- **Automobile** : Les applications sont plutôt ciblées dans ce domaine. Telles que la réalisation des culasses, jantes, échangeurs thermiques, pistons et carters, étriers de freins, carrosserie, etc.

Nous pouvons indiquer aussi d'autres domaines d'utilisations des alliages d'aluminium à l'architecture et le bâtiment, l'industrie électrique et électronique et le domaine du conditionnement alimentaire.

III.3/ Réalisation des défauts débouchant artificiels

a / Matériau utilisé

L'alliage d'aluminium utilisé dans ce projet est l'alliage 2017A-T451 qui est un alliage de la série 2000 à durcissement structural, ces alliages sont largement utilisés pour les applications mécaniques.

b/ Réalisation des défauts

On a préparé six plaques d'aluminium de type 2017A de 10 mm d'épaisseur. Une plaque est laissée saine, tandis que sur les autres, on a créé 50 défauts artificiels dix sur chacune. Ces défauts sont de 2mm de diamètres et des profondeurs variantes entre 0,1mm à 5mm avec un pas de 0,1mm. Ces plaques sont illustrées par la Figure III.1 ci-dessous. On souligne que la création des défauts est réalisée à l'aide de la fraiseuse conventionnelle PMER VST300, illustrée par la Figure III.2.

III.4/ Construction de la base de données

La construction de la base de données est une étape primordiale car elle influe directement sur les résultats obtenus par le réseau de neurones. Notre base d'apprentissage utilisée a été élaborée à partir des résultats expérimentaux de CND. L'entrée représente la variation d'impédance qui se fait par l'analyse d'essais par courant de Foucault tandis que la sortie correspond aux profondeurs des défauts qui sont déterminés à l'aide des essais par ultrasons.



Figure III.1 : Echantillons avec défauts artificiels



Figure III.2 : Fraiseuse PMER VST300

a/ Détermination de l'entrée

L'entrée représente une variation d'impédance qui se fait à travers le traitement de test par courant de Foucault en utilisant la machine Rohmann Elotest M3 présentée par la Figure III.3. Cet instrument offre plusieurs données de performances exceptionnelles comme :

- Large gamme de fréquences de 10 Hz à 12 MHz ;
- Fonctions de filtre : Passe-bas, passe-haut et passe-bande sont standard ;
- Grands réglages de gain principal et de pré-gain de 60 dB ;
- Fonctionnement à double fréquence réglable indépendamment (sonde unique) ;
- Pictogramme intuitif guidé 10 opérations utilisateur clés ;
- Toutes les sondes couramment disponibles peuvent être commandées à partir de l'ELOTTEST M3 ;
- Fonction de fonctionnement optimisée du rotor incluse dans le package standard ;
- Ecran LCD de grande taille avec une luminosité étonnante.



Figure III.3 : Rohmann Elotest M3

1/ Etalonnage des signaux

Lorsque nous effectuons l'étalonnage Elotest M3, nous suivons une procédure soigneusement planifiée pour garantir des mesures précises et fiables en suivant les étapes suivantes :

- En premier lieu, Nous sélectionnons un matériau de référence dont les propriétés électriques sont bien connues et stables. Pour cela, nous optons dans notre cas l'aluminium 2017A. L'objectif est de choisir un étalon présentant une conductivité électrique suffisamment différente de celle du matériau testé pour permettre une distinction claire lors des mesures. Avant d'utiliser l'étalon, nous veillons à ce qu'il soit propre et exempt de toute contamination ou oxydation pouvant affecter les mesures. Nous mesurons également avec précision les dimensions et les caractéristiques géométriques de l'étalon, telles que son épaisseur et sa surface. Ensuite nous procédons à la vérification minutieuse des paramètres de la machine, tels que la fréquence d'excitation, l'amplitude du courant et la géométrie des capteurs. Nous nous assurons que les réglages sont appropriés pour les mesures d'impédance que nous souhaitons effectuer.
- En deuxième lieu, nous plaçons l'étalon dans la machine de courants de Foucault en veillant à ce qu'il soit bien positionné et en contact avec les capteurs appropriés. Nous effectuons ensuite plusieurs mesures d'impédance à différents points sur l'étalon pour obtenir une représentation plus précise des variations de conductivité.
- En troisième lieu, on passe vers l'analyse approfondie des données d'impédance obtenues à partir des mesures réalisées sur l'étalon. Nous comparons les valeurs d'impédance mesurées avec les valeurs d'impédance connues de l'étalon. Si nécessaire, nous effectuons des corrections en utilisant des facteurs de calibration appropriés afin d'ajuster les valeurs mesurées.

Un bloc d'étalonnage est illustré par la Figure III.4.



Figure III.4 : Bloc d'étalonnage

2/ Traitement de test par courant de Foucault

Après l'étalonnage de l'appareil, on réalise le test de courant de Foucault sur nos échantillons, ceci en utilisant le type d'affichage graphique x/y qui représente la perturbation en impédance du champ magnétique induit en fonction du temps selon la Figure III.5.



Figure III.5: Contrôle des défauts par Elotest M3

Le graphique de variation d'impédance qui se présente sous la forme d'une demi-ellipse ou d'un quart d'ellipse tel qu'il est présenté par la figure III.6 suivante :

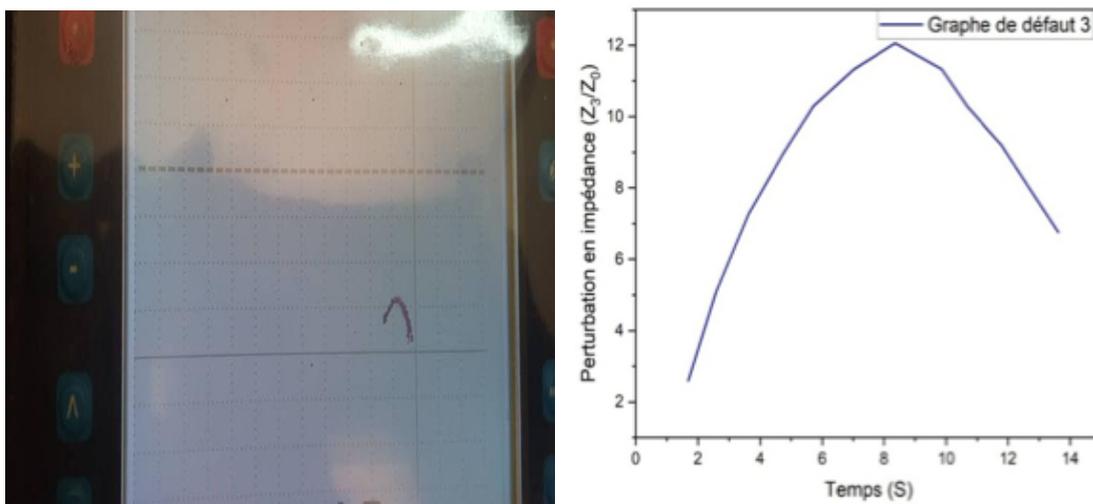


Figure III.6: Graphique de variation d'impédance du défaut 3 sur Elotest M3

Pour obtenir les valeurs d'impédance à partir de ces courbes, il est nécessaire de calculer la surface sous la courbe en utilisant une méthode d'intégration numérique telle que la méthode des trapèzes à l'aide du logiciel 'Origin'. Ces calculs permettent d'estimer l'impédance dans la région d'intérêt et d'obtenir des informations intéressantes sur les défauts.

La Figure III.7 illustre le cas de la détermination d'impédance par intégration numérique pour le défaut 3, cependant, Les calculs de variations d'impédances des 50 défauts sont présentés en Annexe 1.

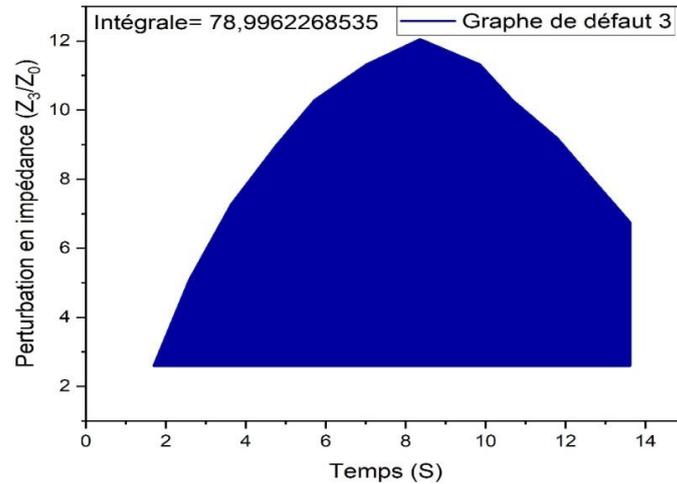


Figure III.7 : Détermination d'impédance par le calcul de l'intégration numérique pour le défaut 3

b/ Détermination de la sortie

Afin d'assurer la précision des profondeurs des 50 défauts, des essais par ultrason ont été réalisés à l'aide de la machine Olympus Omniscan MX2 présentée par la Figure III.8. Cette machine d'inspection offre beaucoup de solution comme :

- Inspection des pièces en matériaux composites ;
- Donne une cartographie de la corrosion ;
- Inspection des soudures de tubes de petits diamètres ;
- Inspection des soudures sous pression.



Figure III.8 : Olympus Omniscan MX2 & la sonde utilisée

La lecture sur la machine nous donne la vitesse de l'onde ultrasonore qui est égale à 60mm/s à travers la plaque en aluminium 2017A et nous donne aussi la profondeur du défaut mesurée entre les deux premiers pics du signal ultrasonore. L'ensemble des tests ultrasonores pour les 50 défauts se trouve en Annexe 2, tandis que l'affichage de la machine est illustré par la Figure III.9.



Figure III.9 : Le test ultrasonore de la profondeur 3mm

Il est à savoir que c'est la combinaison entre les valeurs de l'entrée et de la sortie en utilisant le contrôle CND par ultrason et courant de Foucault, qui fournit notre base de données correspondante aux 50 échantillons permettant de reconstituer les défauts. Une partie de cette base est illustrée par la Figure III.10 ci-dessous.

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1	222,08069	226,4658	226,56024	227,76719	228,05895	236,77263	237,31745	238,99726	242,89288	248,64758	248,92028	253,93612	255,36554	256,90406	256,97943
2	2,31	2,44	2,56	2,64	2,69	2,78	2,87	2,94	2,97	3	3,12	3,25	3,4	3,47	3,47

Figure III.10: Une partie de la base de données obtenue par des mesures de CND

III.5 / Implémentation des réseaux de neurones sous Matlab

Dans cette partie on va caractériser les profondeurs des défauts débouchant en utilisant les réseaux de neurones artificiels à partir d'une base d'apprentissage obtenue par contrôle non destructif par les ultrasons et les courants de Foucault. Les réseaux de neurones sont implémentés sous le logiciel Matlab.

a/ Choix de type de réseau de neurones

Dans notre étude on a adopté le Perceptron Multicouches caractérisé par :

- **Choix d'apprentissage**

L'apprentissage choisis pour notre cas est l'apprentissage supervisé c'est-à-dire pour chaque échantillon de la base de données correspond une valeur d'entrée et une valeur de sortie désirée. Dans ce contexte, l'algorithme d'apprentissage adopté est la descente du gradient.

- **Fonction cout**

La fonction choisie est l'erreur quadratique moyenne MSE (Mean Squar Error) donnée par l'équation II. 14.

b/ Résultats de l'implémentation sous Matlab

On a considéré que notre réseau de neurones est composé d'une seule couche cachée à plusieurs neurones avec une fonction d'activation de type sigmoïde. Pour la sortie, on a une seule couche de sortie avec un seul neurone avec une fonction d'activation linéaire. En ce qui concerne la base de donnée, elle est subdivisée en trois parties dont :

- 60% de données sont dédiées pour l'apprentissage ;
- 20% dédiées pour le test ;
- 20% pour la validation.

Cette division se réalise sur les échantillons d'une manière aléatoire en utilisant Random.

Afin d'étudier l'effet du nombre de neurones de la couche cachée, on établi quatre cas détaillés en ce qui suit.

1. Cas 1

Pour ce cas, on considère un nombre de neurones pour la couche cachée égal à '1'. Ceci correspond à l'architecture suivante :

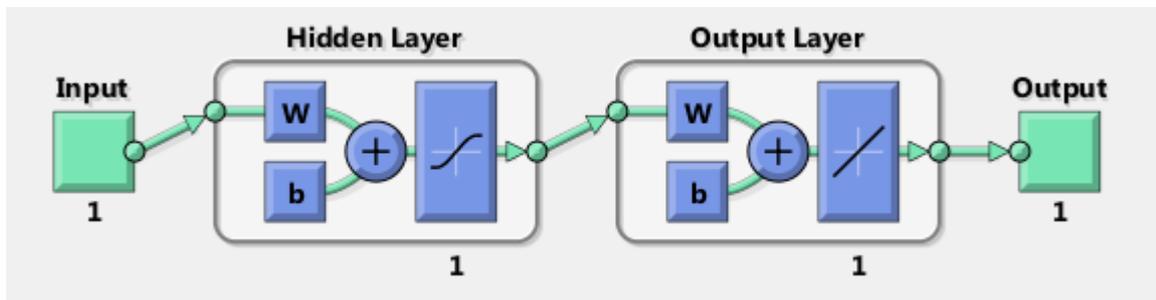


Figure III.11: Architecture du réseau de neurones pour le 1^{er} cas

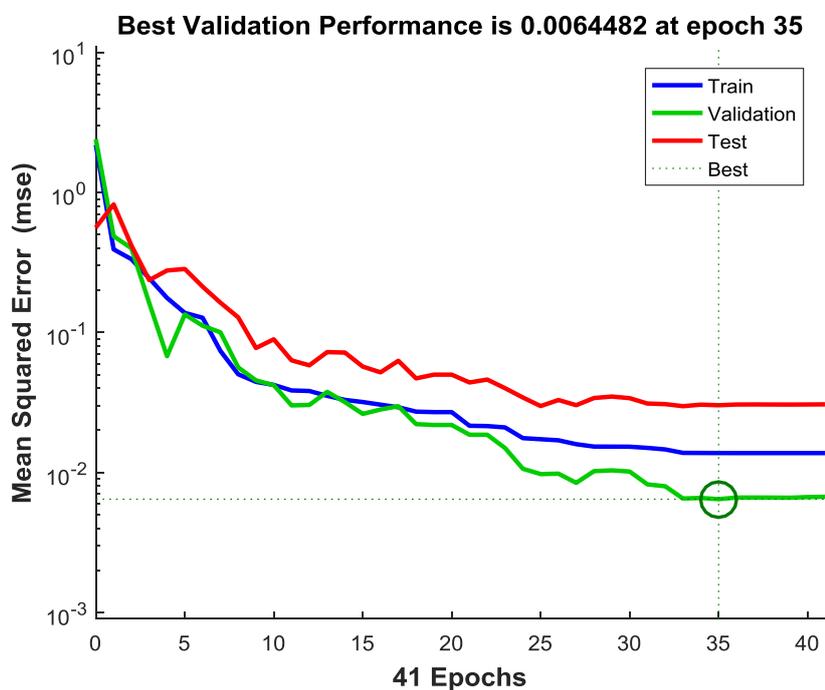


Figure III.12: Courbe de performance (MSE) pour le 1^{er} cas

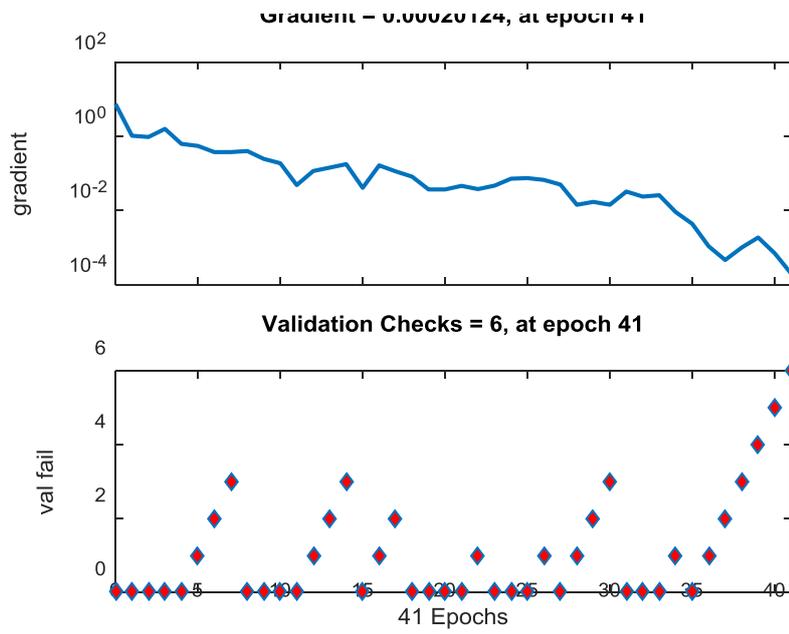


Figure III.13: L'évolution du gradient et convergence pour le 1^{er} cas

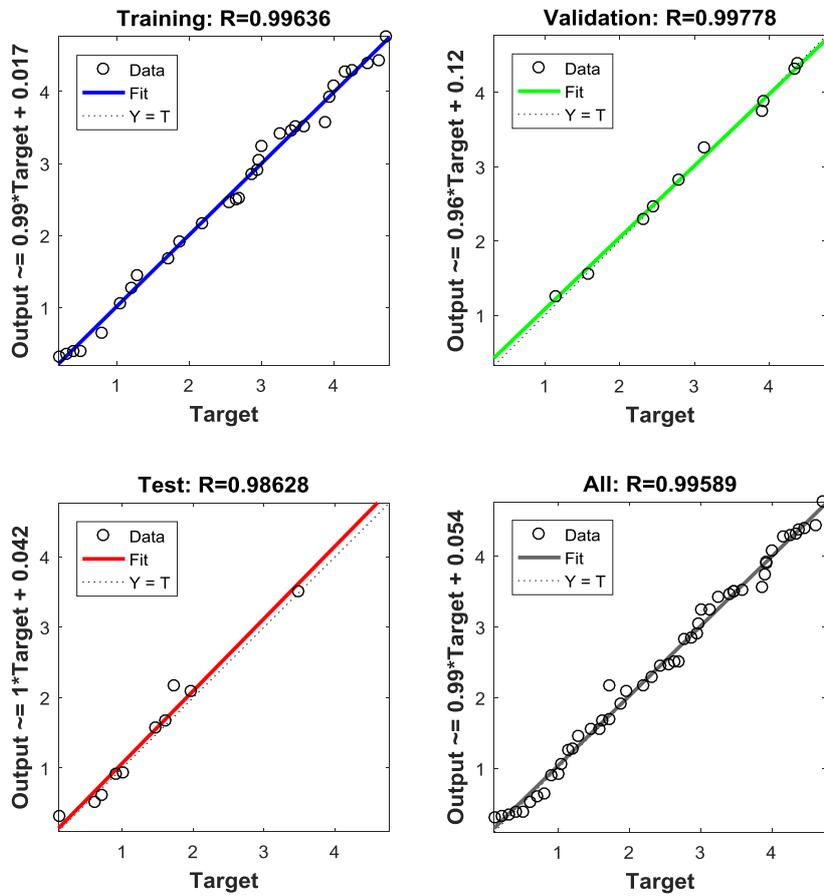


Figure III.14: Courbes de régression des données pour le 1^{er} cas

2. Cas 2

Pour ce cas, on considère un nombre de neurones pour la couche cachée égal à '5'. Ceci correspond à l'architecture suivante :

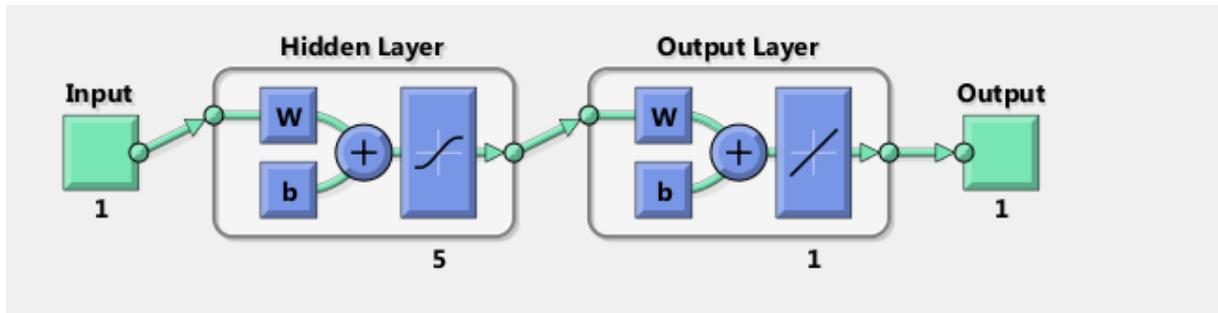


Figure III.15 : Architecture du réseau de neurones pour le 2^{ème} cas

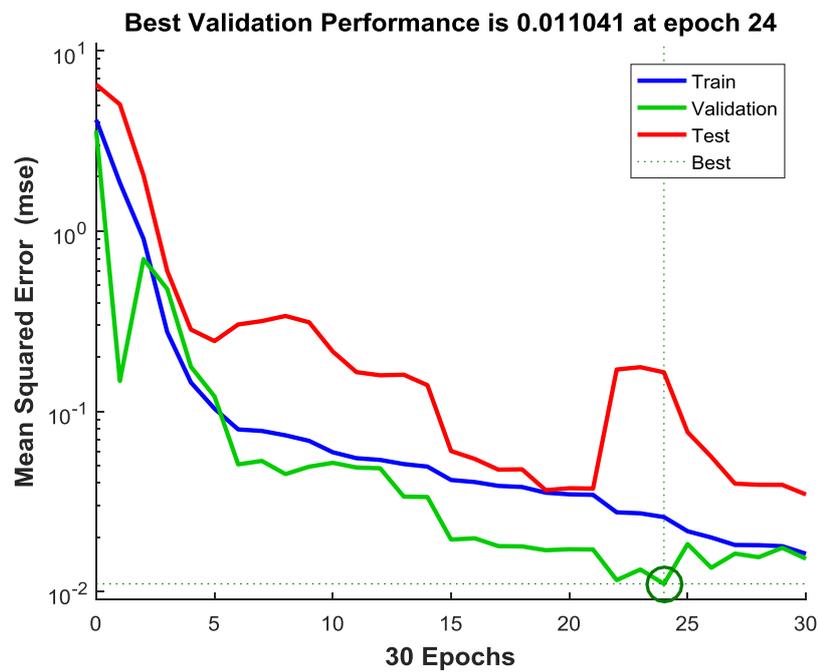


Figure III.16: Courbes de performance (MSE) pour le 2^{ème} cas

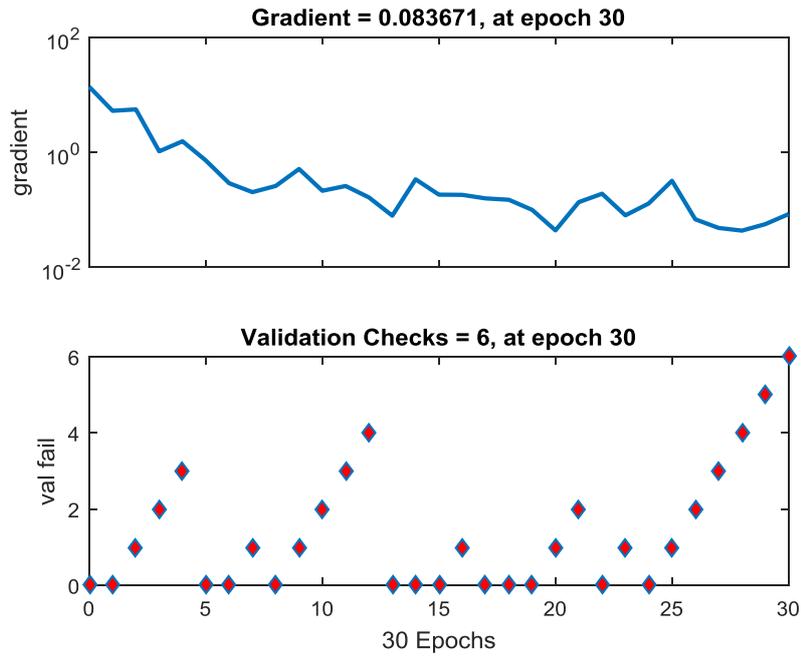


Figure III.17: L'évolution du gradient et convergence pour le 2^{ème} cas

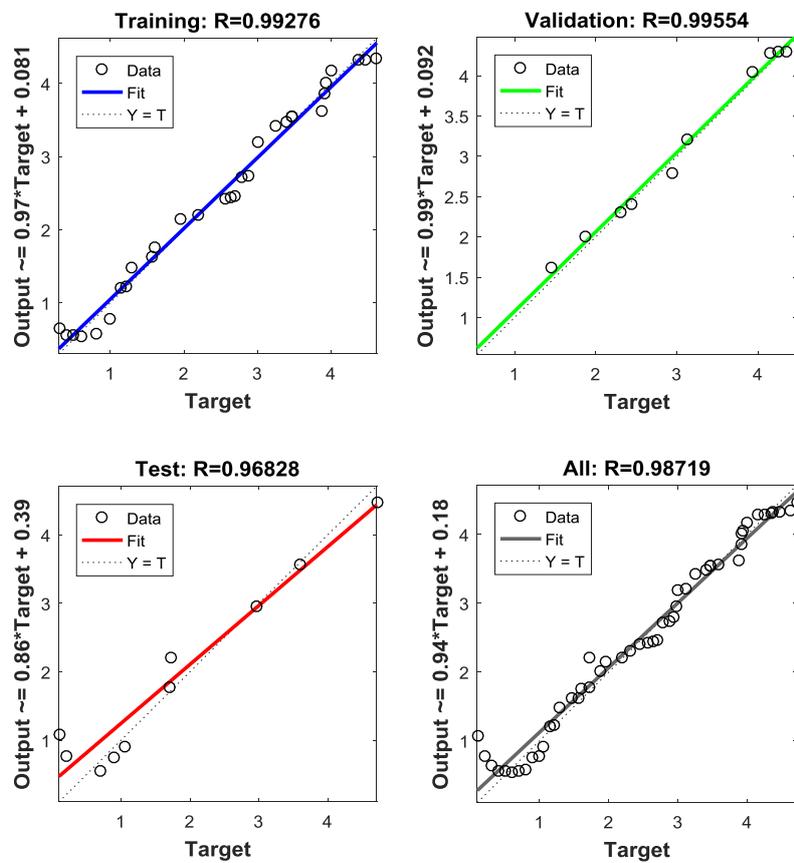


Figure III.18: Courbes de régression des données pour le 2^{ème} cas

3. Cas 3

Pour ce cas, on considère un nombre de neurones pour la couche cachée égal à '9'. Ceci correspond à l'architecture suivante :

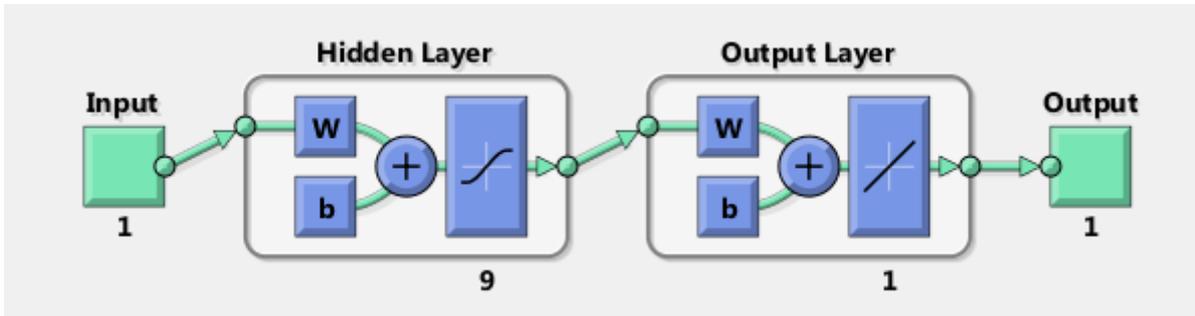


Figure III.19: Architecture du réseau de neurones pour le 3^{ème} cas

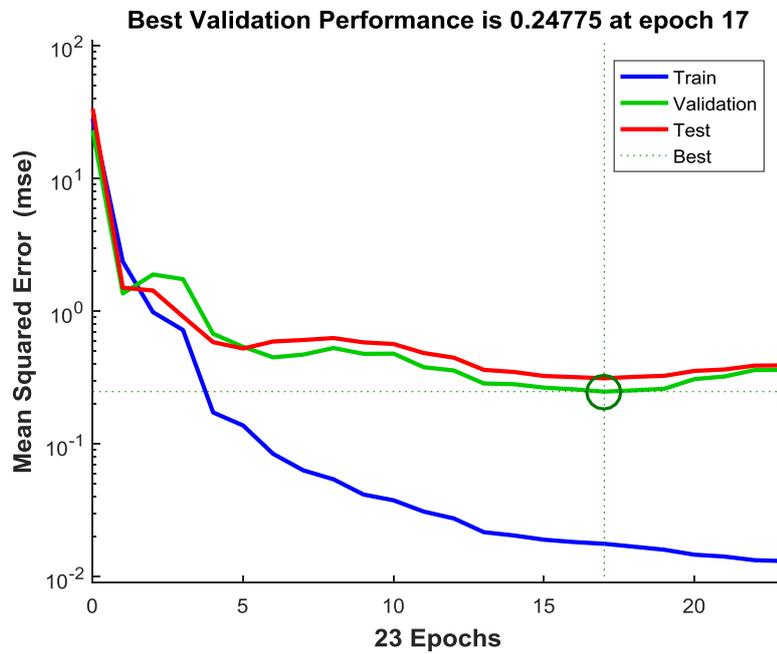


Figure III.20: Courbe de performance (MSE) pour le 3^{ème} cas

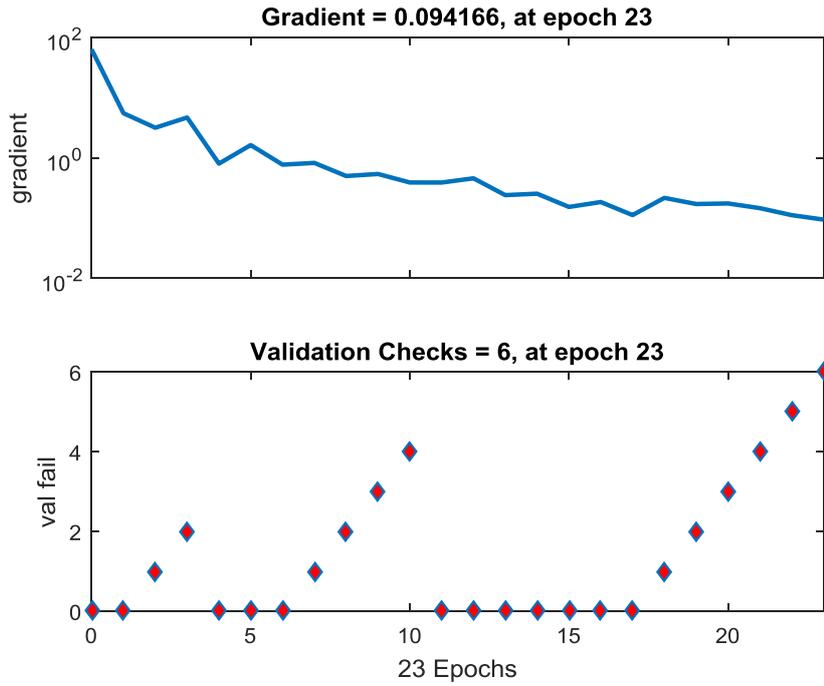


Figure III.21: L'évolution du gradient et convergence pour le 3^{ème} cas

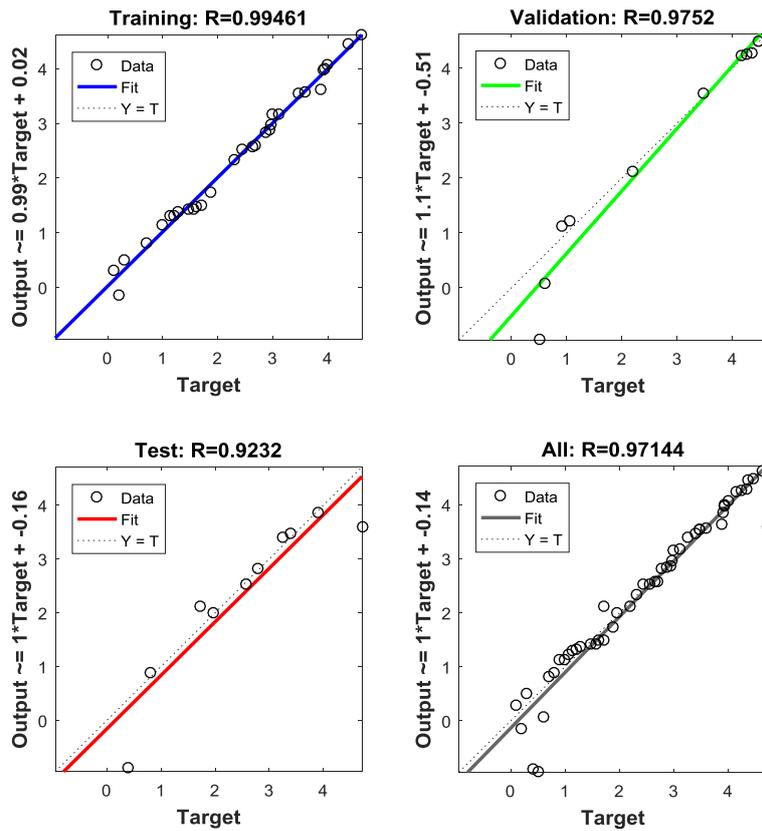


Figure III.22: Courbes de régression des données pour le 3^{ème} cas

4. Cas 4

Pour ce cas, on considère un nombre de neurones pour la couche cachée égal à '14'. Ceci correspond à l'architecture suivante :

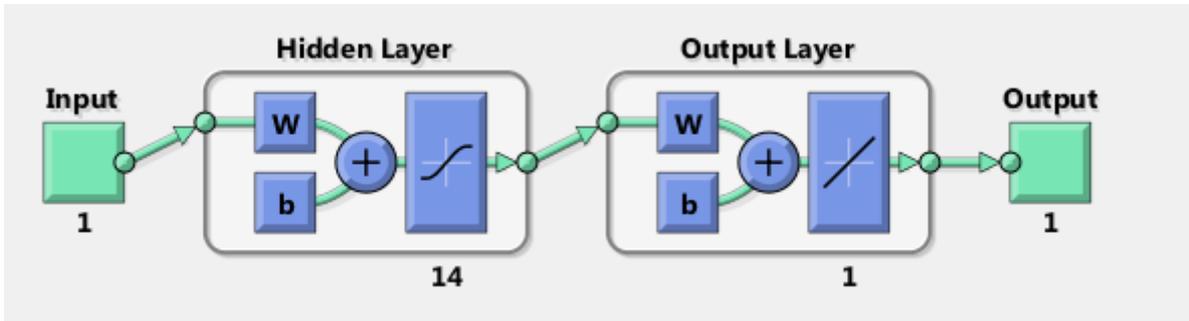


Figure III.23: Architecture du réseau de neurones pour le 4^{ème} cas

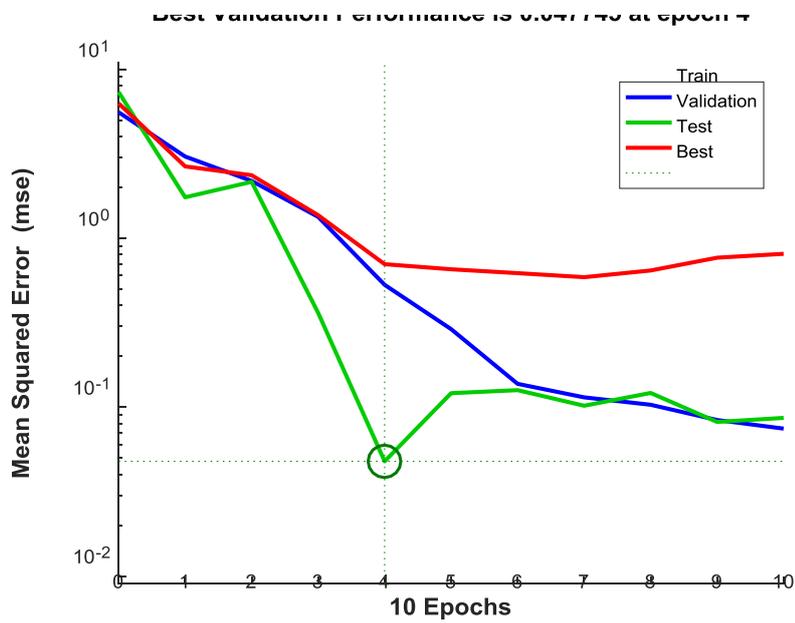


Figure III.24: Courbe de performance (MSE) pour le 4^{ème} cas

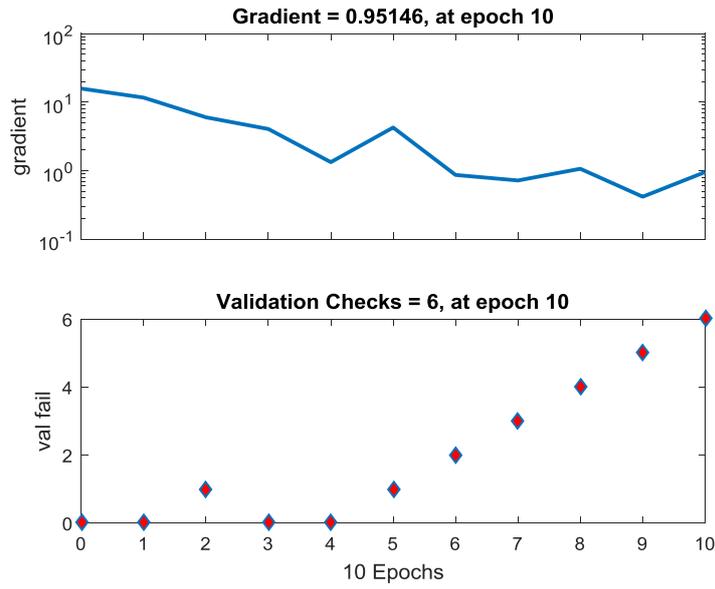


Figure III.25: L'évolution du gradient et convergence pour le 4^{ème} cas

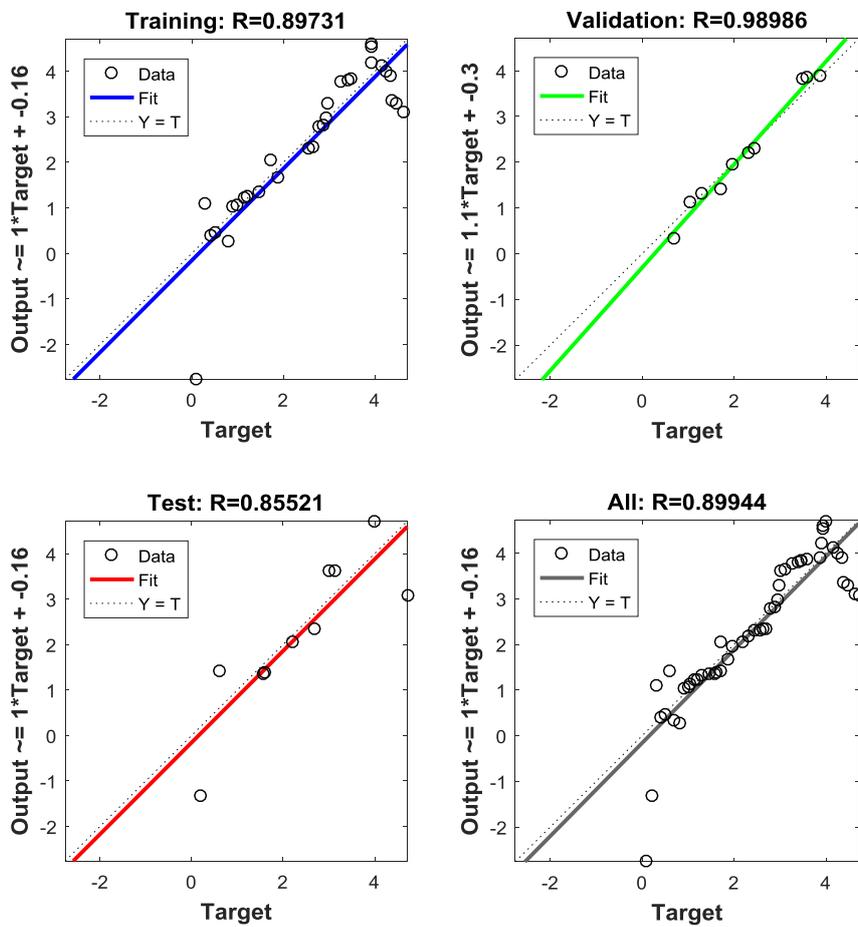


Figure III.26: Courbes de régression des données pour le 4^{ème} cas

En analysant les résultats présentés par les figures III.12, III.13, III.16, III.17, III.20, III.21, III.24 et III.25, on remarque que l'erreur quadrature moyenne MSE et le gradient descendent avec les itérations pour l'ensemble des cas présentés. Ceci traduit un bon choix de l'algorithme d'apprentissage, de la fonction d'activation et de l'architecture adoptée.

On remarque aussi que le nombre d'itérations de convergence diminue en augmentant le nombre des neurones en couche cachée, inversement l'erreur MSE ainsi que le gradient augmentent. Cela signifie que l'augmentation du nombre de neurones en couches cachées dégrade la qualité de la classification. On souligne que notre base de données n'est pas assez grande et que la meilleure performance en validation est obtenue pour un seul neurone en couche cachée avec une erreur de 0,006 et un gradient de 0,0002.

En examinant les courbes de régressions présentées par les figures III.14, III.18, III.22, III.26, on observe que les valeurs associées au coefficient de corrélation ' R ' établies entre la sortie et la valeur désirée est presque égale à '1' pour tous les cas. Ceci traduit le bon choix de l'algorithme d'apprentissage. On note que les meilleures valeurs sont obtenues pour un seul neurone avec $R=0,995$. On note aussi que la qualité de la classification diminue avec l'augmentation du nombre des neurones car la taille de notre base de données est petite.

III.6/ Conclusion

On peut conclure que dans notre cas les meilleures performances d'apprentissage permettant d'avoir la meilleure classification sont obtenues en utilisant un seul neurone en couche cachée avec fonction d'activation de type sigmoïd et un seul neurone en couche de sortie avec fonction d'activation linéaire. On souligne que l'algorithme de descente de gradient a été utilisé dans cet apprentissage supervisé.

De la technologie vers l'entreprise

IV.1/ Introduction

Le monde moderne est témoin d'une évolution sans précédent de la technologie et de l'intelligence industrielle, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines, y compris celui de l'industrie. Dans ce contexte, le contrôle et la maintenance des petits ou grandes installations industrielles complexes des défis cruciaux. Ces infrastructures nécessitent une approche innovante pour garantir leur bon fonctionnement, leur efficacité et leur durabilité.

Le secteur industriel tel que l'aéronautique ou de l'industrie sensibles sont particulièrement propices à l'innovation et à l'utilisation de nouvelles technologies. C'est un secteur industriel de plus en plus exigeant du point de vue des techniques de maintenance employées. En plus, les techniques de contrôles évoluent à cause de l'augmentation de complexité de structures.

Pour avoir une solution pour ces critères, des techniques de contrôle non-invasives, couramment appelées techniques de contrôle non-destructif (CND) ont été élaborées. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, courants de Foucault, et la thermographie. Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs comme les propriétés physiques de la pièce à vérifier, la nature des informations recherchées et les conditions d'exécution et chaque méthode a ses limitations en termes d'efficacité en temps, de coûts et de risques. La complexité des configurations et la nécessité d'effectuer des inspections régulières pour prévenir les fuites ou les dommages potentiels ajoutent une couche de complexité supplémentaire à ces défis industriels.

C'est dans ce contexte que la convergence entre la technologie et l'intelligence artificielle (IA) prend tout son sens. L'IA offre des solutions innovatrices pour automatiser les tâches répétitives et laborieuses, libérant ainsi du temps et des ressources pour se concentrer sur des activités à plus forte valeur ajoutée.

L'impact de l'intelligence artificielle sur l'industrie est révolutionnaire. Grâce à l'analyse en temps réel des données capturées par les capteurs et les drones, l'IA permet de détecter rapidement les problèmes potentiels et de prédire les défaillances, facilitant ainsi la prise de mesures préventives et l'amélioration de la maintenance prédictive. L'intelligence artificielle constitue également un formidable outil d'aide à la décision.

IV.2/ Solution proposée

Les techniques de contrôles non destructif évoluent à cause de l'augmentation de complexité de structures qui s'accompagne d'une préoccupation évidente en matière de sécurité pour des composants de grands ou petits dimensions (joints soudés, pipeline, panneaux solaires, aubes, disques de turbines etc), comme c'est présenté sur la figure IV.1 ci-dessous :



a) Champ des panneaux solaires



b) Lampadaire solaire



c) Les pipelines en Algérie



d) Inspection de CND des turbines



e) Joints soudés d'un fuselage d'avion



f) Structure aéronautique

Figure IV.1: Quelques structures à inspecter par notre Startup

L'utilisation de l'intelligence artificielle joue un rôle important dans le domaine du contrôle des grandes installations solaires et des pipelines comme dans le contrôle des petites structures telles que les aubes de turbines et les joints. Les algorithmes d'IA peuvent analyser les données collectées par les capteurs et les drones, détecter les anomalies, faire des rapports prévenir des pannes potentielles et optimiser les opérations de contrôle, en prenant en compte la taille et la complexité des installations.

L'utilisation des drones équipés de caméras infrarouges de haute résolution sont également des technologies qui peuvent être exploités pour l'inspection des installations complexe comme les panneaux solaires et des pipelines souterraines ou difficile d'accès.

IV.3/ Présentation du projet

Notre entreprise propose des services de Contrôle Non Destructif (CND) innovants grâce à l'utilisation de plusieurs méthodes d'inspection comme les courants de Foucaults et les ultrasons ainsi que l'utilisation des drones équipés de caméras infrarouges. Ce derniers sont spécialisés de la détectons les défauts et les anomalies dans les structures, les installations électriques. Nos inspections précises et fiables à base d'intelligence artificielle permettent d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques. Avec des rapports détaillés et des recommandations, nous aidons nos clients à prendre des mesures correctives efficaces pour assurer la sécurité et optimiser les performances.

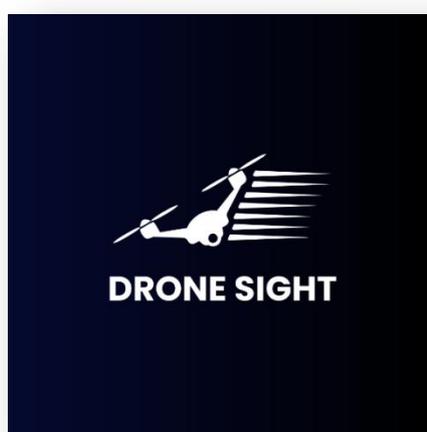


Figure IV.2 : Logo du Startup

IV.4/ La valeur ajoutée

Notre Startup se distingue par son approche révolutionnaire dans le domaine du Contrôle Non Destructif (CND). Nous utilisons des drones équipés de caméras infrarouges, le contrôle par courant de Foucault et les ultrasons pour offrir des services d'inspection de qualité supérieure. Cela signifie que nous sommes en mesure de détecter les défauts et les anomalies, même dans les endroits difficiles d'accès ou invisibles à l'œil nu. Nos clients peuvent avoir une confiance totale dans la fiabilité de nos résultats grâce à l'utilisation des appareils de haute précision. La valeur ajoutée pour notre startup se résume en :

- Grâce à l'utilisation de drones, nous pouvons effectuer des inspections beaucoup plus rapidement par rapport aux méthodes traditionnelles. Les drones sont capables de couvrir de vastes zones en un temps réduit, réduisant ainsi les délais d'inspection. Cela permet à nos clients de gagner un temps précieux et d'optimiser leur productivité.
- L'inspection aérienne permet d'effectuer des inspections à distance, réduisant les risques pour les inspecteurs qui n'ont plus besoin d'accéder à des zones potentiellement dangereuses. Cette approche garantit la sécurité de nos travailleurs.
- Nos inspections préventives permettent de détecter les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques. En identifiant les défauts et les anomalies à un stade précoce, nous aidons nos clients à prendre des mesures correctives efficaces, évitant ainsi des pannes coûteuses, des interruptions de service et des réparations d'urgence.
- En utilisant des logiciels avancés d'intelligence artificielle pour analyser et interpréter rapidement les données lors des inspections. Après chaque inspection, nous fournissons à nos clients des rapports détaillés qui mettent en évidence les défauts détectés, accompagnés de recommandations précises pour les mesures correctives à prendre. Ces informations leur permettent de prendre des décisions éclairées et d'optimiser les performances de leurs installations.
- Sur le plan d'économies financières, les inspections traditionnelles de CND impliquent souvent une équipe d'inspecteurs qui doivent se déplacer physiquement sur le site, à l'hébergement et au logistique, ce qui entraîne des coûts de main-d'œuvre élevés. En utilisant un drone, une seule personne peut piloter le drone et effectuer l'inspection à distance, ce qui réduit les coûts liés à la main-d'œuvre en plus. Les méthodes traditionnelles de CND peuvent impliquer des risques pour la sécurité des inspecteurs, en particulier lorsqu'ils doivent accéder à des zones dangereuses ou

difficilement accessibles. L'utilisation d'un drone permet de réduire ces risques en évitant l'exposition directe des inspecteurs à des conditions potentiellement dangereuses, ce qui peut entraîner des économies en termes de sécurité et d'assurance. Moins d'accidents signifient moins de blessures potentielles, ce qui peut se traduire par des économies sur les coûts des soins médicaux, des indemnités et des réclamations d'assurance(en réduisant les risques d'accidents, les primes d'assurance, les réclamations liées aux accidents du travail et les coûts de formation spécialisée).

IV.5/ Objectifs

Les objectifs de notre startup se résument comme suit :

- Établir « DroneSight » comme un fournisseur de confiance et leader de CND innovant et inspection par drone dans les trois prochaines années.
- Conquérir une part de marché significative dans des secteurs cibles clés et élargir notre clientèle.
- Développer des partenariats stratégiques pour améliorer nos capacités technologiques et notre présence sur le marché.
- Favoriser l'innovation et l'amélioration continues de nos produits et services.
- Atteindre la rentabilité et une croissance durable.

IV.6/ Présentation des porteurs du projet

a/ L'équipe d'encadrement du groupe du travail

Tableau IV.1: Equipe d'encadrement

Equipe de l'encadrement du groupe principale (à titre indicatif)	Spécialité	Faculté
Dr. Sari ElKahina	Aéronautique Contrôle non destructif	Institut d'aéronautique et des études spatiales Blida 1
Dr. Boudifa Hakima	Commerce	Ecole des hautes études commerciales

b/ L'équipe du projet du groupe du travail**Tableau IV.2:** Equipe du projet

Photos	Equipe du projet du Groupe principale (à titre indicatif)	Spécialité	Faculté
	Etudiante J'étais stagiaire au sein de la Direction Technique Air Algérie et à la ERMA au niveau de CRD.	Bataoui Rania M2 Aéronautique - structure d'avion	Institut d'aéronautique et des études spatiales -Blida 1-
	Etudiante J'étais stagiaire au sein de la Direction Technique de Tassili Airlines, acquérant une expérience pratique en maintenance et réparation des aéronefs.	Bahloul Sirine M2 Aéronautique - structure d'avion	Institut d'aéronautique et des études spatiales -Blida 1-
	Etudiant Ingénieur maintenance industrielle chez Biocare Biotech	Loucif Amir M2 en maintenance industrielle	Maintenance Industrielle Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi

c/ Carte d'information➤ **Prénom et nom :****Equipe du projet :**

- 1- Bahloul Sirine,
- 2- Bataoui Rania,
- 3- Loucif Amir

Equipe d'encadrement :

Dr. Sari Elkaihina
Dr. Boudifa Hakima

- **Titre du Project:**
Caractérisation et maintenance des anomalies par CND à base des réseaux de neurones (Dronesight)
- **Numéro de téléphone :** +213 5 59 69 79 89
- **Adresse :** www.dronesightsevice@gmail
- **Ville ou commune d'activité :** Incubateur- université Blida 1.
- **Nature de Projet :** Service.

IV.7/ La nature des innovations liées à notre projet

La nature innovatrice de notre projet telle qu'elle est présentée par la figure IV.3, se manifeste à :

a/ Innovations technologiques

- Utilisation de drones équipés de caméras infrarouges pour couvrir de vastes zones permettant la rapidité des inspections.
- Logiciel d'analyse de contrôle à base d'intelligence artificielle qui fait la reconstitution des défauts, et cela offre une solution innovante pour déterminer avec précision les dimensions des anomalies dans les matériaux en améliorant les performances de la partie soft des appareils.
- Nous avons révolutionné l'approche de nos clients en introduisant une application mobile conviviale pour lancer leurs demandes d'inspection. Cette plateforme intuitive permet aux clients de soumettre des requêtes en quelques clics et de recevoir des rapports détaillés instantanément. Cette innovation numérique simplifie grandement le processus et augmente l'efficacité opérationnelle.

b/ Innovations du marché

- Application mobile conviviale pour lancement de demandes.
- Approche proactive de prévention des problèmes grâce à la détection précoce des anomalies, aidant les clients à éviter les coûts élevés de réparation et de maintenance.

c/ Innovations Incrémentielles

- Amélioration de l'efficacité opérationnelle grâce à l'utilisation de drones pour les inspections, réduisant les délais et les coûts associés.

d/ Innovations radicales

L'inspection aérienne basée sur l'utilisation des drones.

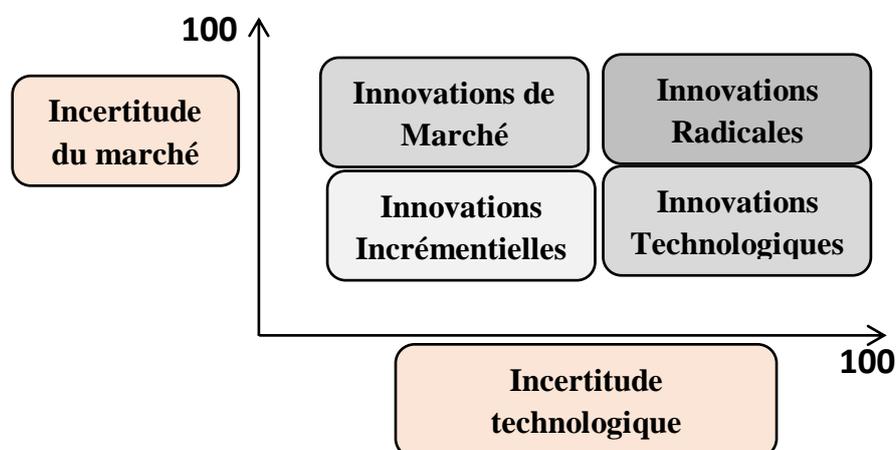


Figure IV.3 : La nature innovatrice de notre projet

IV.8/ Les valeurs proposées selon les critères

Les valeurs proposées selon les critères sont données par le tableau IV.3 suivant :

Tableau IV.3: Les valeurs proposées selon les critères

Valeur personnalisée	Moyenne
Rapport qualité/prix	Moyenne
Valeur par conception	Haute
Valeur de haute performance	Haute
Valeur de service complète	Haute
Précieux autre	Moyenne

IV.9/ Le Business Model Canvas (BMC)

Le canevas du modèle de commerce est donné par les tableaux suivants :

Tableau IV.4: Le Business Model Canvas (BMC)

Business Model Canvas (BMC)		
Porteurs du projet	Encadreur du projet	Code du projet
1-Bahloul Sirine 2-Bataoui Rania	Encadreur : Sari Elkahina Co-Encadreur : Boudifa Hakima	05_15_3151

Coûts	Revenus
<p>Flotte de drones et équipement : Budget pour l'achat, l'entretien et la mise à niveau des drones, et des matériels de CND.</p> <p>Main-d'œuvre : Affecter des ressources à l'embauche et à la formation en CND, d'opérateurs de drones et d'experts en analyse de données.</p> <p>Logiciels d'analyse des données : investir dans des logiciels spécialisés pour le traitement et l'interprétation des données de contrôle.</p> <p>Marketing et promotion : Affecter des fonds à des campagnes de marketing, à la publicité en ligne et à la participation à des événements industriels afin de sensibiliser le public et d'acquérir des clients.</p>	<p>Services d'analyse thermographique : Générer des revenus en offrant des services de CND, en facturant les clients en fonction de l'étendue du projet ou par inspection.</p> <p>Proposer des rapports complets détaillant les résultats, les idées et les recommandations, disponibles en tant que service unique ou par le biais de modèles d'abonnement.</p> <p>Vente et location d'équipement : Proposer la vente et la location des équipements connexes aux clients qui préfèrent effectuer leurs propres inspections.</p>

Partenaires clés	Activités Clés	Propositions de valeur	Relation Client	Clients
<p>Fabricants de drones : Établir des partenariats avec les fabricants de drones pour obtenir des drones équipés de caméras infrarouges et d'autres équipements nécessaires.</p> <p>Fournisseurs de technologies des équipements de CND: Collaborez avec des entreprises spécialisées dans la technologie de CND pour accéder à des capteurs et des logiciels de pointe.</p> <p>Experts en analyse de données : S'associer avec des professionnels ou des entreprises expérimentés dans l'analyse des données par CND.</p>	<p>Personnalisation des drones et équipements de contrôle : Personnalisation des drones a caméras infrarouges ainsi que le matériel d'inspection nécessaires pour le contrôle des infrastructures.</p> <p>Analyse des données : Analyser et interpréter les données d'inspection recueillies par les appareils de CND pour identifier les anomalies, détecter les problèmes structurels et fournir des informations exploitables.</p> <p>Rapports et recommandations : Générer des rapports complets et des recommandations basées sur l'analyse afin d'aider les clients à prendre des décisions éclairées.</p>	<p>Analyse de CND précise et efficace : Fournissez des analyses de CND précises et rapides à l'aide des appareils très performants et de drones, offrant une efficacité accrue.</p> <p>Inspections rentables : Proposez des solutions rentables en minimisant le besoin d'inspections manuelles et en réduisant les dépenses opérationnelles.</p> <p>Des informations exploitables : Proposer des recommandations exploitables aux clients sur la base de l'analyse des données thermiques, ce qui leur permet de résoudre rapidement les problèmes et d'optimiser la consommation d'énergie.</p>	<p>Approche consultative : S'engager avec les clients pour comprendre leurs besoins spécifiques et proposer des solutions d'analyse thermographique sur mesure.</p> <p>Rapports opportuns : Fournir des rapports détaillés et opportuns aux clients, en mettant en évidence les principales conclusions et les recommandations pour la suite.</p> <p>Soutien continu : Offrir un soutien post-analyse, notamment en répondant aux questions, en fournissant des informations supplémentaires ou en effectuant des inspections de suivi</p>	<p>Entreprises de construction et d'infrastructure : Le secteur de construction, du développement immobilier ou l'entretien des infrastructures a besoin d'une analyse de CND pour le contrôle de la qualité, les audits énergétiques ou l'entretien préventif.</p> <p>Entreprises du secteur de l'énergie et des services publics : Le secteur de l'énergie cherche à optimiser la consommation d'énergie, à identifier les lacunes en matière d'isolation ou à détecter les anomalies électriques.</p> <p>Entreprise de transport : Les secteurs de transport et surtout l'aéronautique sont particulièrement propices l'utilisation de nouvelles technologies de CND pour avoir plus de matière de sécurité.</p>

	Ressource clés		Canaux	
	<p>Equipements de CND & logiciels : Fournir des équipements de CND très performants et les capteurs ainsi que des logiciels de qualités et de traitements de données</p> <p>La main-d'œuvre qualifiée Employer des experts en CND permettant qui peuvent interpréter efficacement les résultats d'inspection.</p> <p>Flotte de drones : Acquérir une flotte de drones équipés de caméras infrarouges et d'autres équipements nécessaires.</p>		<p>Site web et présence en ligne : Maintenir un site web professionnel pour présenter les services, partager des études de cas et générer des prospects.</p> <p>Ventes directes : Employer une équipe de vente pour établir des relations avec des clients potentiels, effectuer des démonstrations de produits et négocier des contrats.</p> <p>Partenariats industriels : Collaborer avec des entreprises de construction, des consultants en énergie ou des courtiers en assurance afin d'élargir la base de clientèle et d'atteindre des publics pertinents.</p>	

a/ Activités clés

Les activités clés de notre startup se manifestent à :

- Inspections avancées et non destructives grâce au matériel de CND très performant et des drones équipés de caméras infrarouges de haute précision ;
- Prévention des risques, économies de coûts et amélioration de la durabilité des installations ;
- Analyse les résultats, donne des rapports détaillés ;
- Proposition des solutions et des recommandations ;
- Marketing.

b/ Partenaires clés

La liste de nos partenaires clés est représentée par le tableau IV.5 ci-dessous :

Tableau IV.5: Liste des partenaires du projet

Partenaire	Contacte	Rôle
DJI MAVIC entreprise série	www.dji.com www.hexadrone.fr https://advexure.com China	Livraison des drones a caméra thermique
A-BOT spécialiste drones PRO	0235003880/0658828911 www.abot.fr/linkedin formation@abot.fr 130 Rue Nicole Oresme ZAC, 76230 Isneauville, France	Formation télé pilote de drone
TESTIA an AIRBUS company	www.formation@testia.com www.certification@testia.com Par téléphone : +33 (0) 5 34 36 12 00 Les lundi, mardi, jeudi et vendredi de 9h à 16h.	Formation contrôle non destructif en thermographie pour avoir la certification
CND direct	Téléphone: +33(0)62863 4157 Email: cnndirect@orange.fr	Livraison des appareils d'inspection ultrasonore
Evident Olympus	www.aeroexpo.online/fr/soc/evident-olympus-scientific-solutions-172101.html	Livraison des appareils de courant de Foucault

c/ Propositions de valeur :

- Inspections par les méthodes conventionnelles de CND comme les ultrasons et les courants de Foucault et non conventionnelle comme l'inspection aérienne.
- Prévention des risques, économies de coûts et amélioration de la durabilité des installations.

d/ Clients

Avec le développement des infrastructures industrielles en Algérie et dans de nombreux pays africains, il existe un besoin croissant d'inspections régulières pour assurer la sécurité, la conformité aux normes et la maintenance efficace des installations. Les services d'inspection de DroneSight peuvent offrir une solution plus rapide, précise et sûre grâce à l'utilisation de nouvelles techniques de contrôle et des drones, ce qui en fait une opportunité de croissance significative pour l'entreprise. Notre projet Startup cherche à cibler les clients suivant :

- Sonatrach : pour détecter les anomalies et les problèmes potentiels dans leurs pipelines, leurs réservoirs de stockage, leurs installations de production et leurs équipements mécaniques.
- Sonelgaz : pour inspecter leurs installations électriques, leurs lignes de transmission et leurs sous-stations afin de détecter les défauts, les surcharges, les problèmes d'isolation, etc
- Usines sidérurgiques Comme Sider El-Hadjar.
- Le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie, GICA.
- Algérie Télécom: l'inspection de leurs infrastructures de télécommunication, notamment les tours, les antennes et les équipements de transmission (identifier les problèmes de surchauffe, de corrosion et d'autres anomalies pouvant affecter leurs performances).
- Les compagnies aériennes comme Air Algérie et Tassili pour les inspections des structures d'avion ainsi que l'inspection aérienne thermographique des infrastructures aéroportuaires, des bâtiments, des installations électriques.
- COSIDER.
- Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers, ENTP.
- Sarl Algeria go solar systems.
- Algerian Solar Company.
- Milltech SPA.
- Eclairage solaire.

d/ Carneaux

1/ Site web

Créer un site web convivial au contenu informatif, optimisé pour les moteurs de recherche.

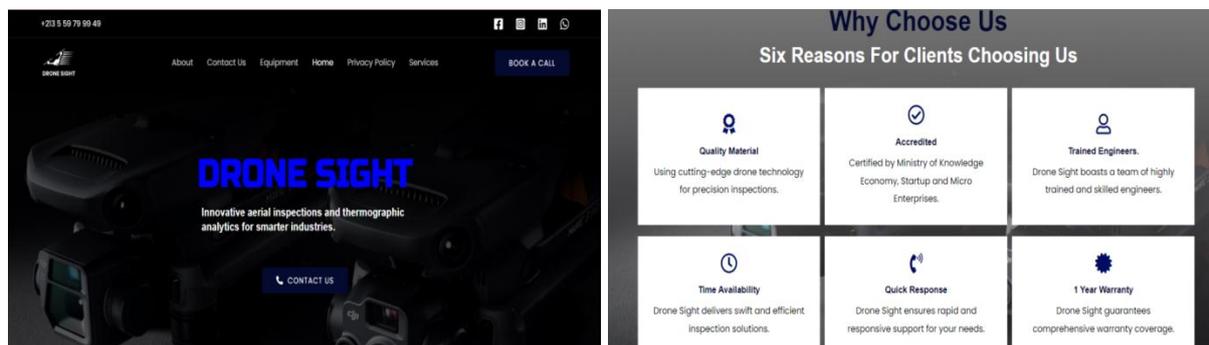
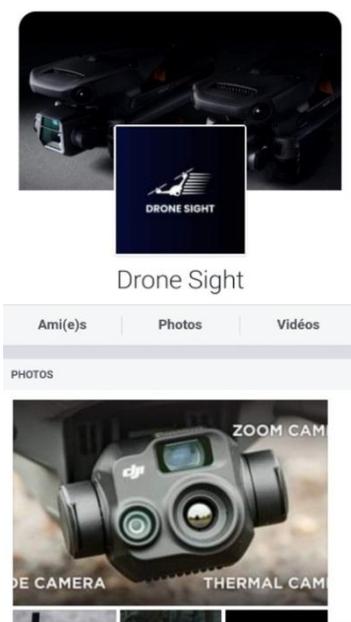


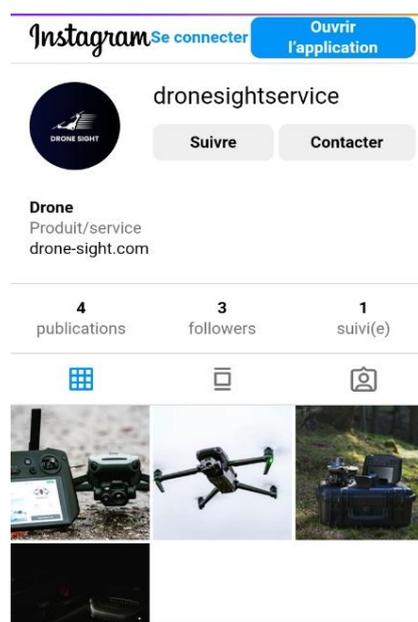
Figure IV.3 : Site web de la Startup Drone Sight.

2/ Médias sociaux

Utiliser des plateformes telles que LinkedIn, Twitter, Instagram et des forums spécifiques à l'industrie pour communiquer avec notre public cible, partager des idées et faire connaître la marque.



a) La page Facebook de l'entreprise



b) Instagram de l'entreprise.

Figure IV.4 : Les média sociaux utilisés pour notre Startup

3/ Application mobile pour lancer les commandes

L'application mobile DroneSight, une pièce maîtresse de notre startup qui simplifie et améliore considérablement l'expérience de nos clients dans le domaine de l'inspection non destructive. Cette application incarne notre engagement envers l'innovation et l'efficacité, en offrant une interface conviviale pour gérer toutes les étapes de vos besoins d'inspection. L'application doit passer par les étapes suivantes telles qu'elles sont présentée par la figure IV.5 suivante:



Figure IV.5 : Les étapes de l'application mobile

Création du Compte:

- Les utilisateurs débutent en créant un compte personnel sécurisé sur l'application. Cette étape permet l'authentification et l'accès à toutes les fonctionnalités de l'application.
- Remplirez vos information personnels tel que nom, prénom, type utilisateur...

Soumission de la Demande:

- Une fois connectés, les clients peuvent soumettre leurs demandes d'inspection en fournissant les détails nécessaires tels que le type d'infrastructure, l'emplacement et les spécifications spécifiques de l'inspection.

Sélection des Services:

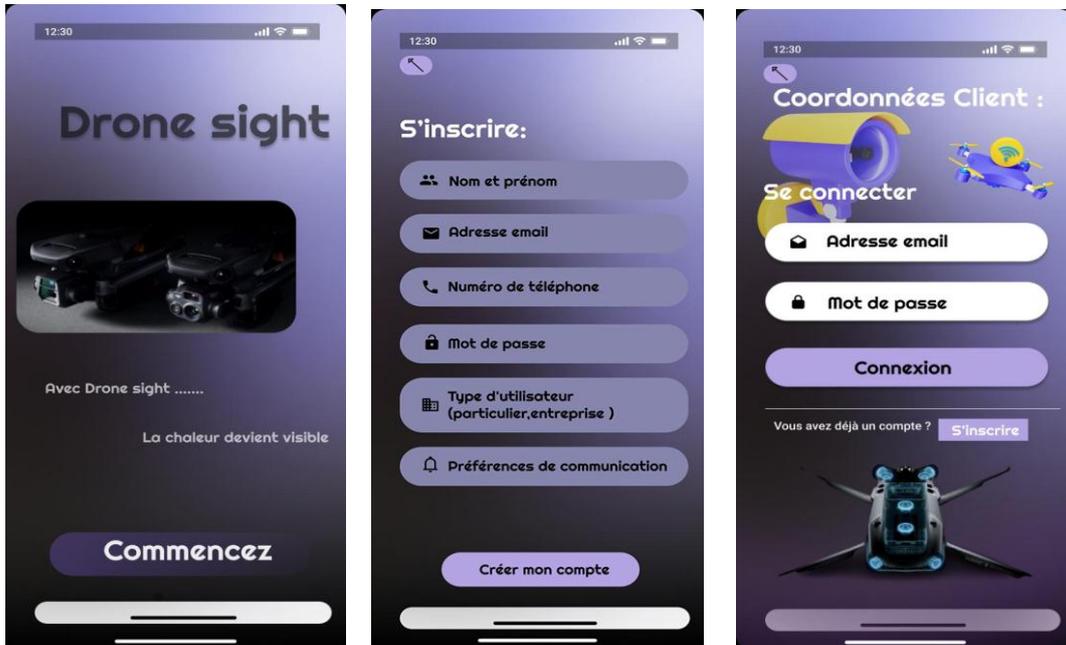
- En fonction des informations fournies, les clients peuvent choisir les services précis dont ils ont besoin, tels que l'inspection des panneaux solaires, des pipelines, etc

Planification et Coordonnées:

- Après la sélection des services, les clients peuvent choisir une date et une heure qui leur conviennent pour l'inspection. Les coordonnées exactes de l'emplacement à inspecter sont également saisies dans l'application.

Confirmation et Suivi:

- Une fois la demande soumise, le client reçoit une confirmation instantanée avec les détails de l'inspection programmée



-1-

-2-

-3-



-4-



-5-

Figure IV.6 : Le prototype application mobile « Dronesight »

4/ La carte visite de l'entreprise

La carte visite de notre startup est représentée par la figure IV.7 ci-dessous :



Figure VI.7 : La carte visite de la Startup « Drone Sight »

5/Email

L'email de la startup Dronesight est le suivant :

Email: www.dronesightservice@gmail.com

6/ Evènement et salon

Participer à des salons professionnels, des conférences et des ateliers pour présenter notre solution et établir des liens avec l'industrie.

7/ Partenariats

Collaborer avec des influenceurs du secteur, des associations et des fournisseurs de technologies complémentaires afin d'étendre notre portée.

e/ Rescouses clés

- Des équipements de CND de hautes performances des logiciels et des capteurs
- Une flotte de drones équipés de caméras infrarouges de haute qualité Recruter
- Formation du personnel qualifié en CND, y compris des opérateurs de drones expérimentés,
- Développement des algorithmes d'intelligence artificielle pour traiter les informations d'inspection.

f/ Coûts

- Equipements de CND avec ses capteurs comme l'appareil ultrasonore et courant de Foucault.
- Équipement de drone avec caméra infrarouge avec haute performance.
- Logiciels de traitement de données et de qualité associés aux équipements d'inspection.

- La formation du personnel qualifié : des pilotes de drones certifiés, des experts en thermographie, en courant de Foucault et en ultrason.
- Les coûts de marketing : la création d'un site web, la publicité en ligne, la participation à des salons professionnels ...
- Un espace de bureau et des équipements informatiques (des ordinateurs, imprimante...).
- Un véhicule de service nécessaire pour les déplacements.

g/ Revenus

Les revenus de « **DroneSight** » sont :

- Prestations d'inspection: DroneSight génère des revenus grâce à ses services d'inspection de CND de structures industrielles, installations électriques, pipelines, et équipements mécaniques
- Contrats de maintenance préventive : En proposant des inspections régulières et préventives, DroneSight assure des contrats de maintenance avec ses clients. Ces contrats garantissent un suivi continu de l'état des installations, permettant de détecter les défauts potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques.
- Consulting: DroneSight peut proposer des services de consulting pour aider les entreprises à mieux comprendre et utiliser le CND et l'inspection aérienne.
- Expansion géographique : En développant ses activités dans d'autres pays africains, DroneSight peut augmenter sa clientèle et ses revenus en proposant ses services innovants sur de nouveaux marchés.
- Services personnalisés et sur mesure : En offrant des services personnalisés répondant aux besoins spécifiques de chaque client, DroneSight peut facturer des tarifs adaptés, générant ainsi des revenus variables en fonction des prestations fournies.
- Abonnements et forfaits: DroneSight peut proposer des forfaits d'inspection périodiques ou des abonnements, permettant aux clients de bénéficier de services réguliers à des tarifs préférentiels, contribuant ainsi à la stabilité des revenus de l'entreprise.
- Location du matériel du CND et drone: Le service de location du matériel du CND et de drones proposé par DroneSight offre aux clients la possibilité de bénéficier de la technologie de pointe des drones sans avoir à investir dans l'achat et l'entretien du matériel.
- Des formations à la carte en CND pour les entreprises intéressées.

IV.10/ Analyse du marché

Bien que le marché du CND soit compétitif, notre combinaison de l'inspection conventionnelle et de l'inspection aérienne, nous distingue en Algérie et en Afrique.

Nos principaux segments de marché cibles comme c'est présenter par la figure IV. 8 sont les suivant :

- Gestion de l'énergie : Les entreprises de services publics, les fournisseurs d'énergie renouvelable et les consultants en énergie.
- Inspections d'infrastructures: Entreprises de construction, sociétés d'ingénierie et fournisseurs de services d'entretien des infrastructures.
- Sécurité publique : Services d'incendie, forces de l'ordre et équipes d'intervention en cas de catastrophe.
- Industrie automobile : Les inspections par courants de Foucault sont utilisées pour détecter des défauts dans les pièces métalliques, les soudures et les assemblages, assurant ainsi la qualité des véhicules.
- Construction navale : Les coques de navires, les soudures et les structures métalliques sont inspectées pour s'assurer de leur solidité et de leur sécurité en mer.
- Industrie ferroviaire : Les rails, les pièces mécaniques et les composants critiques sont inspectés pour prévenir les défaillances et assurer la sécurité du transport ferroviaire.
- Industrie aéronautique : Elle propice l'utilisation de nouvelles technologies de CND pour avoir plus de matière de sécurité.

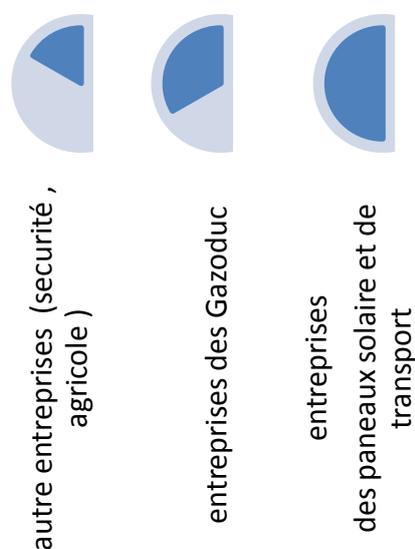


Figure IV.8 : Etude du marché provisionné

a/ Analyse SWOT

L'analyse SWOT du marché est donnée par la figure IV.9 suivante :

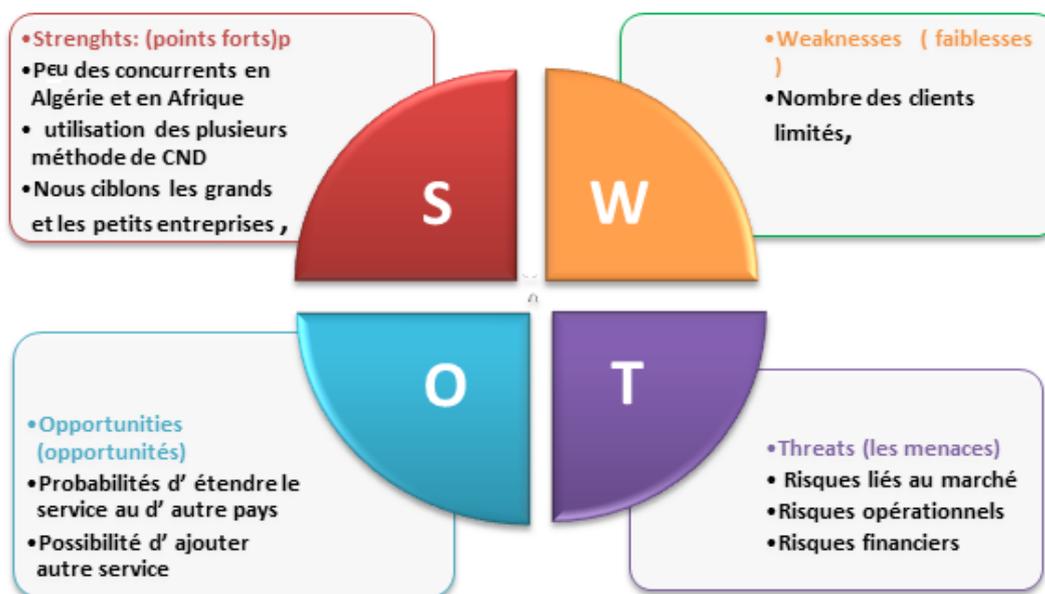


Figure VI.9 : L'analyse SWOT du marché de notre Startup

b/ Analyse PESTEL du projet

L'analyse PESTEL est un outil utilisé pour évaluer les facteurs macro-environnementaux qui peuvent influencer une entreprise ou une industrie. Chaque lettre de l'acronyme PESTEL représente un type de facteur à examiner : Politiques, Économiques, Sociaux, Technologiques, Environnementaux et Légaux. Voici notre analyse :

1/ Politiques

Réglementations gouvernementales : Les réglementations en matière d'utilisation de drones et d'inspection industrielle peuvent avoir un impact sur nos opérations. Des licences et des autorisations spécifiques pour les opérations de drones peuvent être nécessaires.

2/ Economiques

Les fluctuations des coûts de l'énergie solaire peuvent affecter la demande d'inspection des panneaux solaires.

3/ Sociaux

Acceptation des drones : L'acceptation sociale des drones et des nouvelles technologies peut jouer un rôle dans la confiance des clients envers nos services.

4/ Environnementaux

La demande croissante d'énergie renouvelable et de solutions durables peut augmenter la demande d'inspection aérienne des panneaux solaires et des installations connexes.

5/ Technologique

Les évolutions technologiques dans le domaine des drones, comme l'autonomie accrue, la stabilité en vol et la précision, peuvent améliorer l'efficacité de nos opérations, ainsi que l'évolution dans le domaine de l'intelligence artificielle peut améliorer la performance de la partie soft de nos appareils et faciliter la décision.

6/ Légaux

Les règles et les réglementations de l'aviation civile concernant l'utilisation commerciale de drones doivent être strictement respectées pour opérer légalement (Enregistrement des drones, Autorisations...).

IV.11/ Analyse technique et économique

L'analyse technique et économique se manifeste de la présentation des moyens immobiliers et équipements, les moyens humains, les fournisseurs et les moyens de transports.

a/ Moyens immobiliers, et équipements :

La liste des équipements et moyens immobiliers se présente par le tableau IV.6 suivant :

Tableau IV.6 : Liste des équipements et moyens immobiliers

Liste des équipements et moyens immobiliers	
Nom de l'équipement	Montant facture pro-forma en HT (DZD)
Drone	1 200 000
Caméra infrarouge	40 0000
Logiciels	80 000
Formation 1(télé pilote)	1 200 000
Formation 2 (CND)	1 800 000
Appareil ultrason	59 0551.70
Cales	4 4100
Couplant ultrason (250ml*5)	5880
Appareil courant de Foucault	65 0000
Total	597 0531.7

b/ Moyens humains

La liste des équipements et moyens immobiliers se présente par le tableau IV.7 suivant :

Tableau IV.7: Liste des moyens humains avec le nombre nécessaire

Moyens humains	
Nom du poste	Nombre de personne
Spécialiste en CND	3
Pilote de drone	1
Responsable en marketing	1
Ingénieur en informatique	2
Responsable Financier	1
Responsable Commercial	1
Total	9

c/ Fournisseur

Les délais client /Fournisseur se représente par le tableau IV.8 suivant :

Tableau IV.8 : Délais client / fournisseur

Délais client/Fournisseur	
Délai accordé aux clients	1 mois
Délai de paiement fournisseur	40 jours
Délai de rotation de stock	1 An

d/ Moyens de transport

Une voiture pour déplacer et transporter les équipements nécessaires d'inspection.

IV.12/ Analyse financière

L'analyse financière se représente par l'évaluation du cout du projet, la charge salaire et le chiffre d'affaire annuel :

a/ Evaluation du cout du projet**a.1/ Frais préliminaires prévisionnels en DZD pour une année**

Les frais préliminaires prévisionnels en DZD pour une année sont :

1. Frais d'enregistrement de l'entreprise et de constitution de la société 5 0000
2. Honoraires de conseil juridique pour la rédaction des documents juridiques 10 0000.
3. Budget pour la création d'un site web professionnel 1 0000
4. Coûts de conception et d'impression de supports marketing tels que des brochures et des dépliants. 2 0000
5. Frais pour l'obtention des assurances nécessaires, y compris la responsabilité civile professionnelle.7 0000
6. Frais des bureaux et d'espaces de travail. 60 0000
7. Salaires initiaux pour le personnel clé, y compris les opérateurs de drones, les analystes thermographiques et les experts en données.488 3760
8. Budget pour des campagnes publicitaires en ligne et hors ligne afin de promouvoir nos services et d'attirer des clients 10 0000
9. Frais généraux pour le fonctionnement de l'entreprise, y compris les frais de communication, les fournitures de bureau, etc. 115000

Le total : 594 8760 DZD

a.2/ Fond de roulement

Le fond de roulement de 30 jours est donné par le tableau IV.9 suivant :

Tableau IV.9 : Fond de roulement pour un fonctionnement de 30 jours

Fond de roulement	
Nature des dépenses	Besoin mensuel (30 jours)
Charges salariales	406 980
Services extérieurs	35 7000
Total	763980

L'évaluation du cout du projet se représente par le tableau IV.10 suivant :

Tableau IV.10 : Structure de coût pour l'entreprise.

Coût initial du projet	
Nature des couts	Montant Hors Taxes
Equipements	305 0531.7
Logiciels et autres	3 080 000
Mobilier de bureaux	60 0000
Matériel roulant	2 000 000
Frais préliminaires	594 8760
Fond de roulement	76 3980
Total	1 392 4511.7

b/ Charges salariales

Les charges salariales estimées pour notre projet est donnée par le tableau IV.11 suivant :

Tableau IV.11 : Estimation des salaires du projet

Nom du poste	Nombre de salariés	Salaire de base	charge patronale 26%	Charge salariale mensuelle	Charge salariale annuelle
Spécialiste en CND	3	39 000	10 140	147 420	1 769 040
Pilote de drone	1	33 000	8 580	41 580	498 960
Responsable en marketing	1	32 000	8 320	40 320	483 840
Ingénieur en informatique	2	38 000	9 880	95 760	1 149 120
Responsable Financier	1	33 000	8 580	41 580	498 960
Responsable Commercial	1	32 000	8 320	40 320	483 840
Total	9	207 000	53 820	406 980	4 883 760
Année	2024	2025	2026	2027	2028
Masse salariale	4 883 760	4 883 760	4 883 760	4 883 760	4 883 760

c/ Chiffres d'affaires prévisionnels

Le nombre de services réalisé par an est donné par le tableau IV.12 suivant

Tableau IV.12 : Nombre de commande par mois et le nombre de jour travaillés par an

nombre de services réalisés par an	1er mois	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M 10	M 11	M 12	Total An
2024	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	35
2025	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	48
2026	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	55
2027	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	60
2028	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	96

Donc le chiffre d'affaire prévisionnel annuel est donné par le tableau IV.13 suivant :

Tableau IV.13 : Prévion de chiffre d'affaire.

Chiffre d'affaire annuel				
	service	Nombre de service par an	Prix unitaire (DZD)	Total (DZD)
2024	Inspections	35	40 0000	1 400 0000
2025		48	40 0000	1 920 0000
2026		55	45 0000	2 475 0000
2027		60	45 0000	2 700 0000
2028		96	45 0000	4 320 0000

Le chiffre d'affaire prévisionnel sur 5 ans est donné par figure IV.10 suivante :

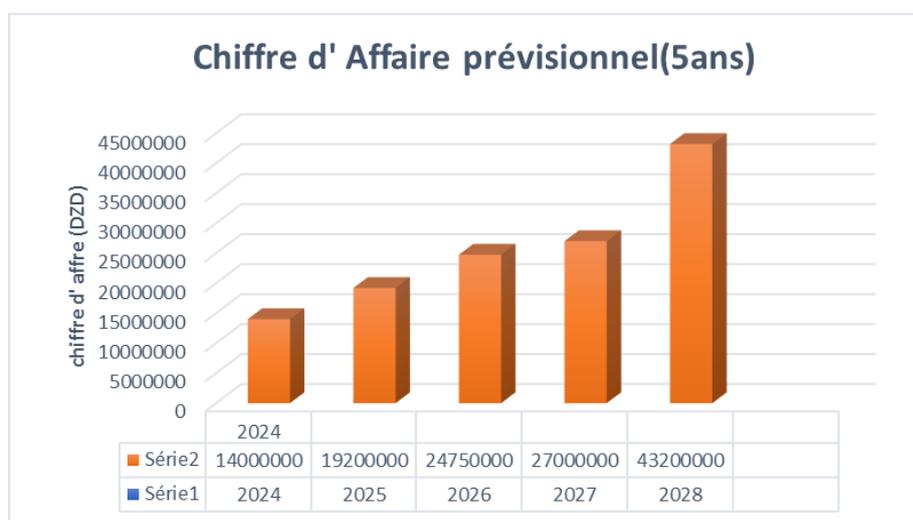


Figure IV.10 : Présentation chiffre d'affaire 2024-2028

d/ Achats et Consommations

Les achats pour chaque année sont donnés par le tableau IV.14 suivant :

Tableau IV.14 : Les achats pour chaque année (DZD)

Produit	Quantité	Prix unitaire (DZD)	Montant annuel (DZD)
Drone	2	1200000	240 0000
Caméra infrarouge	2	40 0000	80 0000
App ultrason	1	64 0531.7	64 053.7
App CF	1	65 0000	65 0000
Total			449 0531.7

e/ Services extérieurs

Les services extérieurs sur 5 ans sont donnés par le tableau IV.15 suivant :

Tableau IV.15 : Services extérieurs

Services extérieurs	2024	2025	2026	2027	2028
Sous-traitance générale	0	0	0	0	0
Loyer	0	0	50 000	50 000	70 000
Entretien, réparation, maintenance	0	20 000	20 000	40 000	40 000
Prime d'assurance	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000
Honoraire Notaire	100 000	100 000	100 000	100 000	150 000
Publicité et frais marketing	70 000	70 000	70 000	70 000	10 000
Déplacements et missions	10 000	20 000	20 000	20 000	30 000
Electricité, Gaz, Eau	120 000	15 000	15 000	15 000	25 000
Téléphonie + connexion internet	7 000	7 000	7 000	8 000	8 000
Total	357 000	282 000	332 000	353 000	383 000

f/ Amortissement :

L'amortissement de l'entreprise est donné par le tableau IV.16 suivant :

Tableau IV.16 : Amortissement d'entreprise.

Immobilisation	Montant brut	Durée d'amortissement	Amortissement
Drone	1200000	2	600000
Equipements	1 310 000	5	262 000
Mobiliers de bureau	615 000	5	123 000
Matériel roulant	2 000 000	5	400 000
App ultrason	64 0531.7	5	12 8106.34
App CF	65 0000	5	13 0000
Total	641 5531.7		164 3106.34

IV.13/ Conclusion

En conclusion de ce chapitre dédié à notre startup, nous avons établi les fondations d'une entreprise ambitieuse et innovante. Nous avons minutieusement exploré la vision, la mission et les objectifs de notre startup, mettant en lumière notre engagement envers la fourniture de services de contrôle non destructif (CND) de la plus haute qualité, tout en incorporant des technologies avant-gardistes telles que les drones avec caméra thermique. En approfondissant notre analyse, nous avons examiné en détail les éléments essentiels de notre offre, notamment notre gamme diversifiée de services et notre plateforme d'application mobile conviviale. À travers cette exploration, nous avons clairement démontré comment nous offrons une valeur ajoutée considérable à nos clients en termes d'efficacité, de rapidité et de précision dans les inspections industrielles.

Fortement axée sur le client, «Drone Sight » est prête à révolutionner le secteur de CND grâce à sa technologie de pointe. Nous croyons fermement en l'opportunité considérable qui s'ouvre devant nous sur le marché. Soutenus par une équipe exceptionnelle et un plan d'affaires solide, nous sommes confiants dans notre capacité à réaliser une croissance significative, à atteindre la rentabilité et à devenir un leader dans notre industrie.

En s'appuyant sur notre engagement envers l'excellence et l'innovation, nous aspirons à créer un impact durable et positif, non seulement dans notre entreprise, mais aussi dans l'industrie de l'inspection non destructive dans son ensemble. Grâce à notre technologie révolutionnaire, à notre dévouement envers nos clients et à notre détermination à repousser les limites, nous sommes prêts à façonner l'avenir avec succès.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Connaître les dimensions du défaut est un paramètre très essentiel pour que les ingénieurs prennent des décisions sur l'avenir de la pièce. En effet, la plupart des méthodes d'inspection non destructives conventionnelles ne fournissent pas des informations suffisantes sur la forme du défaut. De plus, il existe actuellement une forte demande afin de réaliser la caractérisation quantitative des défauts, il s'agit principalement d'une évaluation non destructive pour reconstruire leur forme. Dans ce cas, on s'intéresse au problème inverse, généralement difficile à résoudre. Notre travail propose une solution dans ce contexte basée sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels en faisant une amélioration des performances de détection des défauts pour l'appareil Rohmann Elotest M3.

Notre étude concerne en premier lieu la réalisation des défauts 'débouchant artificiels' puis la construction d'une base de données issue des essais ultrasonores et une analyse des résultats d'essais du courant de Foucault, ceci par le biais de l'appareil Rohmann Elotest M3. Une fois la base de donnée réalisée, une implémentation sous Matlab est faite pour la reconstruction des défauts par les réseaux de neurones en utilisant l'algorithme de la descente du gradient. Les résultats obtenus montrent :

- L'erreur quadratique moyenne ' MSE ' et le gradient descendent avec les itérations pour l'ensemble des cas présentés. Ceci traduit un bon choix de l'algorithme d'apprentissage, de la fonction d'activation et de l'architecture adoptée ;
- Le nombre d'itérations nécessaire pour la convergence diminue si on augmente le nombre des neurones en couche cachée. Inversement, l'erreur ' MSE ' ainsi que le gradient augmentent. Cela signifie que l'augmentation du nombre de neurones en couches cachées dégrade la qualité de la classification pour notre base de données ;
- La meilleure performance en validation est obtenue pour un seul neurone en couche cachée car notre base de données n'est pas assez grande ;

- Les valeurs associées au coefficient de corrélation 'R' établies entre la sortie et la valeur désirée est presque égale à '1' pour l'ensemble des cas traités. Ceci traduit le bon choix de l'algorithme d'apprentissage ;
- La qualité de la classification diminue avec l'augmentation du nombre des neurones car la taille de notre base de données est petite.
- Les meilleures performances d'apprentissage supervisé permettant d'avoir la meilleure classification sont obtenues en utilisant un seul neurone en couche cachée avec fonction d'activation de type sigmoïd et un seul neurone en couche de sortie avec fonction d'activation linéaire.

Ce modeste travail nous a amené à la création de notre ambitieuse et innovante entreprise Dronesight qui est prête à révolutionner le secteur de CND grâce à sa technologie de pointe telle que l'inspection aérienne avec des drones et l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse des données. Nous avons examiné en détail les éléments essentiels de notre offre, notamment notre gamme diversifiée de services et notre plateforme d'application mobile conviviale. Nous croyons fermement en l'opportunité considérable qui s'ouvre devant nous sur le marché. Soutenus par une équipe exceptionnelle, un plan d'affaires solide et un matériel de hautes performances.

Perspective et recommandation :

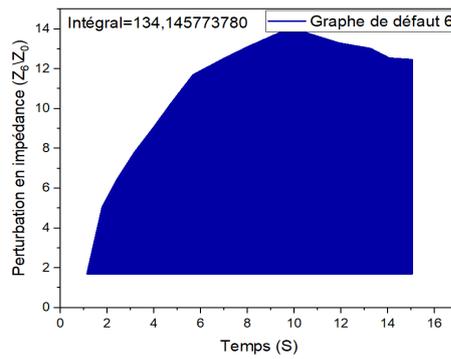
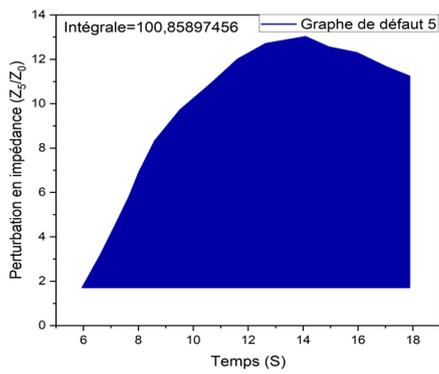
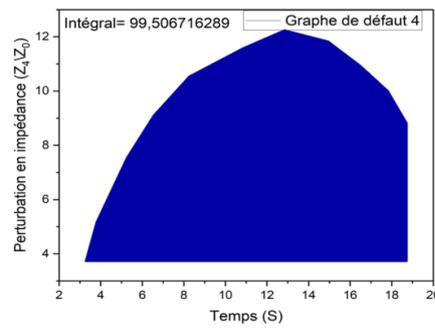
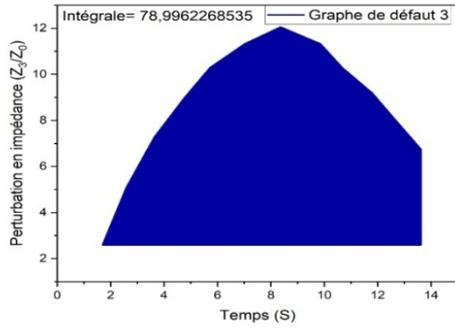
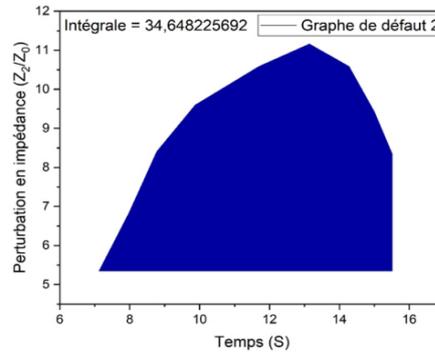
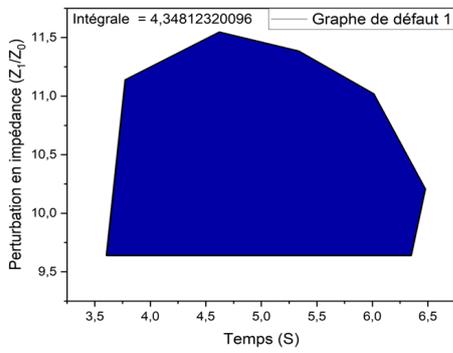
Comme perspective à cette étude, les travaux suivants peuvent être proposés :

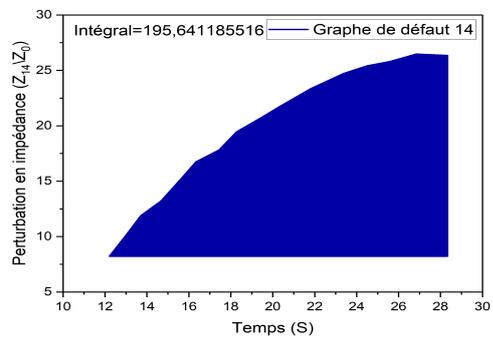
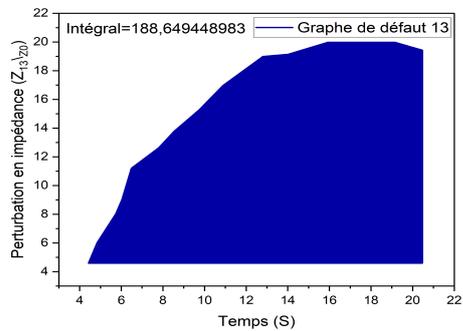
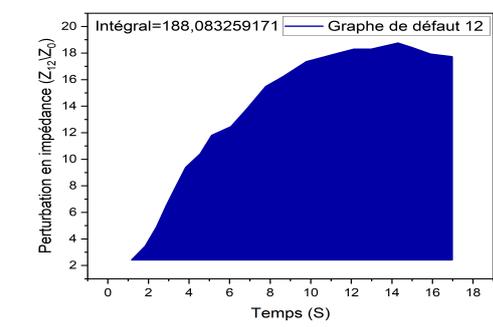
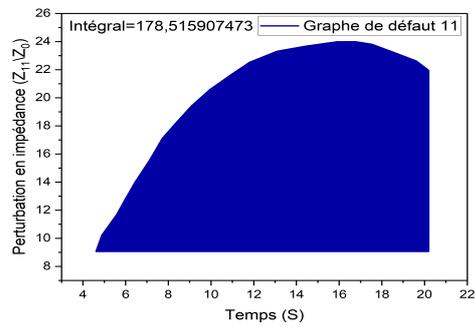
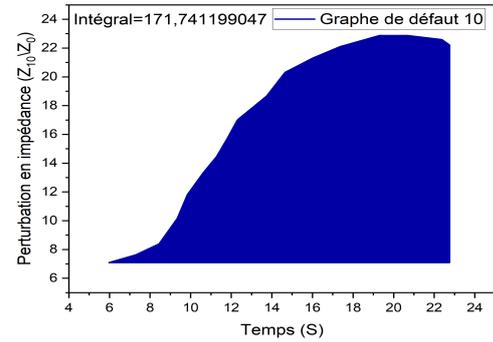
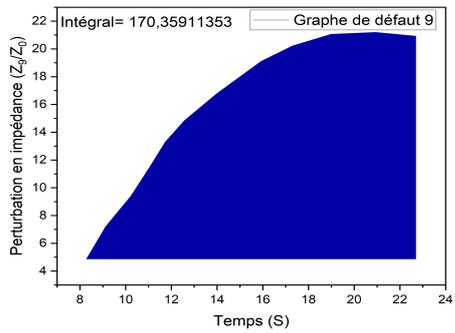
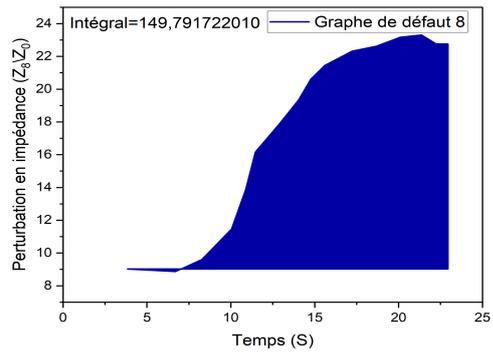
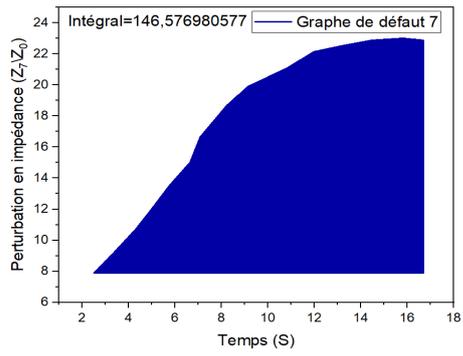
- Etudier les cas d'autres alliages en utilisant des bases de données synthétiques ;
- Utilisation d'autres méthodes de CND pour les mêmes défauts telles que la détection infrarouge et les hyperfréquences ;
- Traiter le cas des différentes formes des défauts.

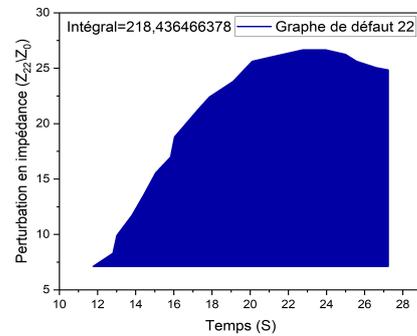
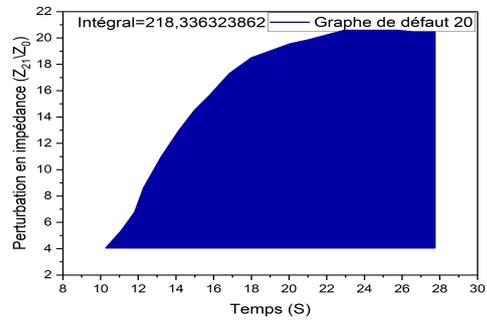
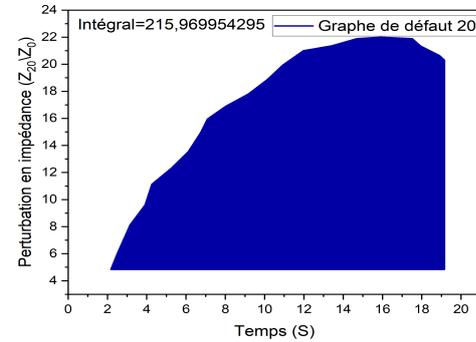
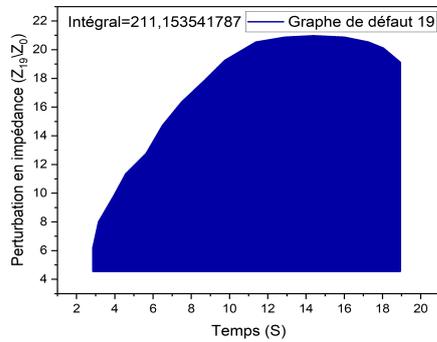
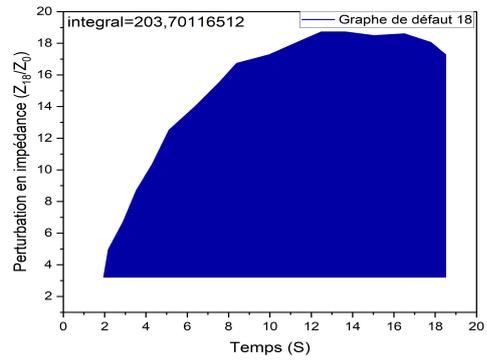
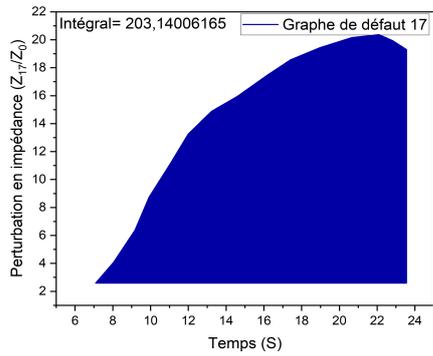
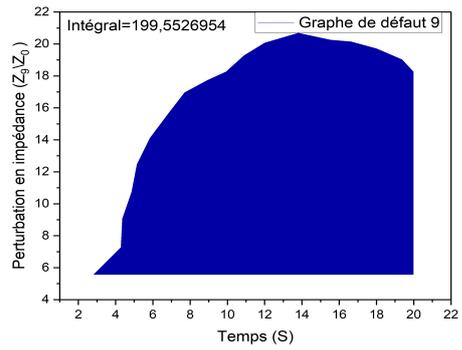
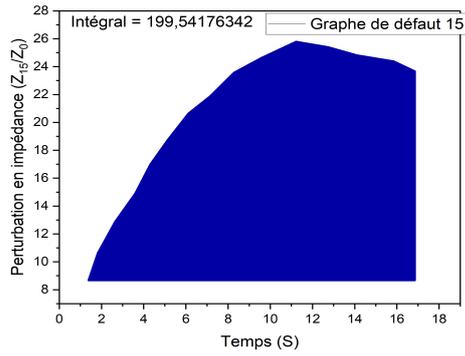
ANNEXES

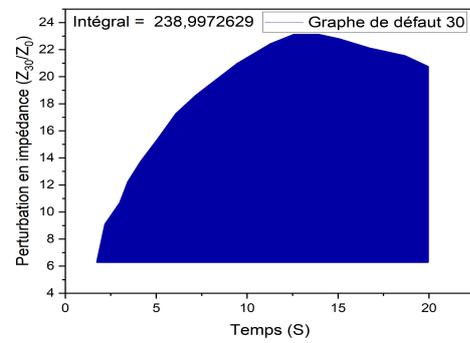
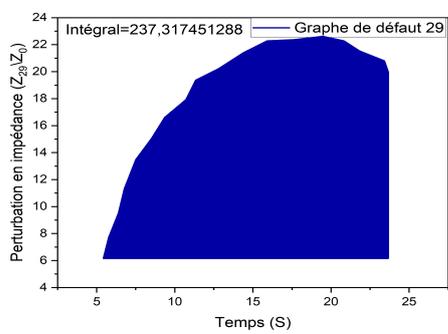
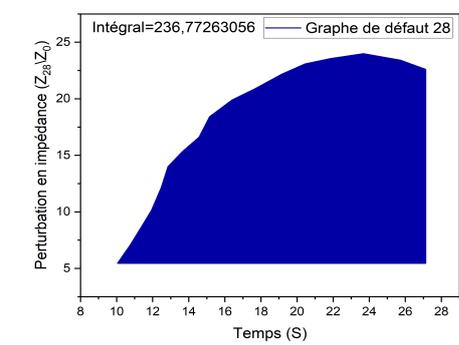
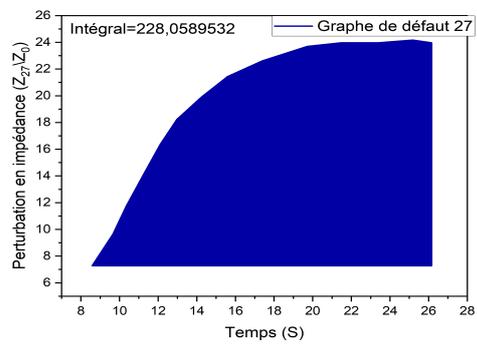
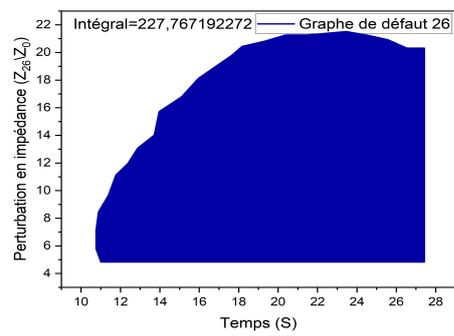
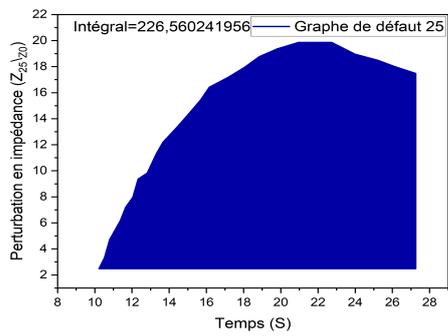
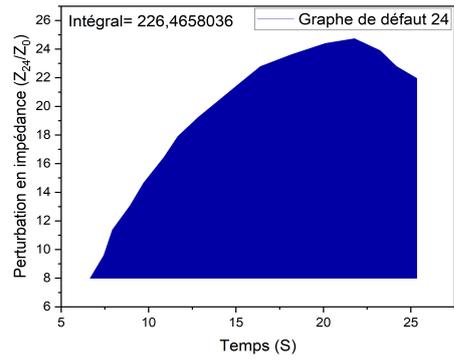
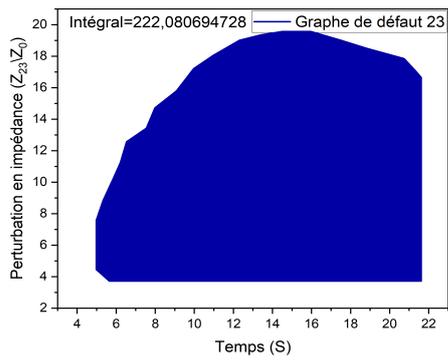
ANNEXE 1

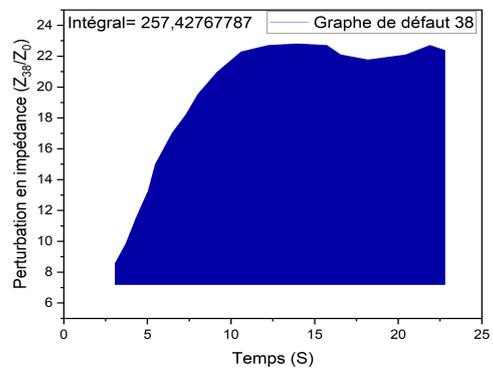
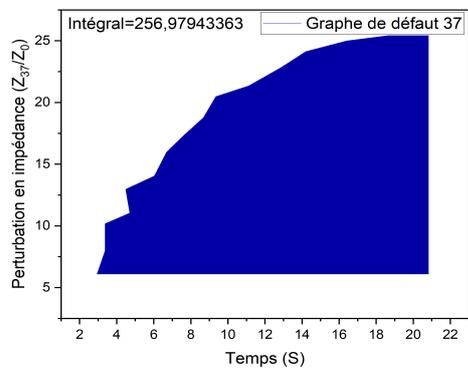
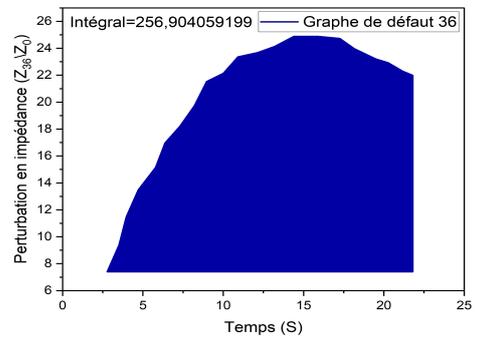
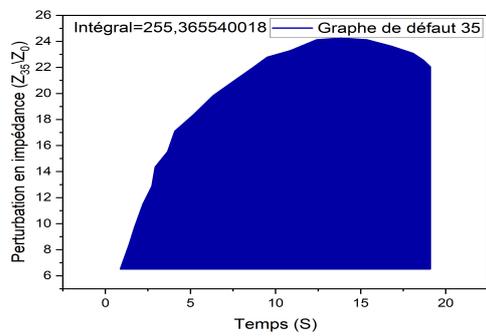
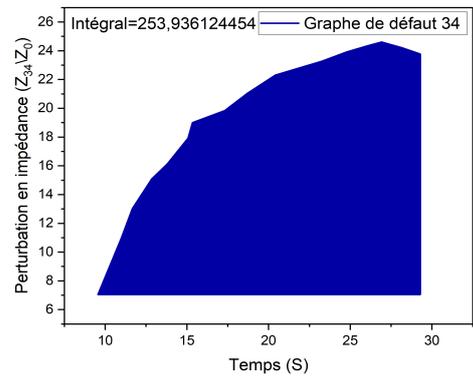
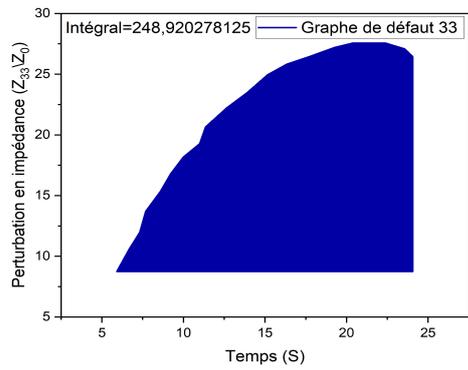
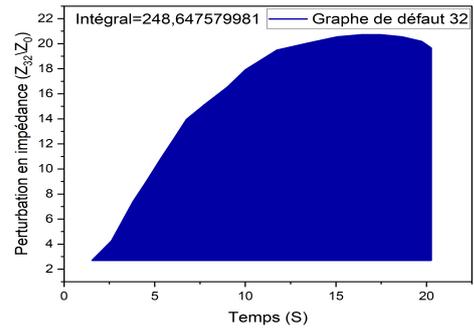
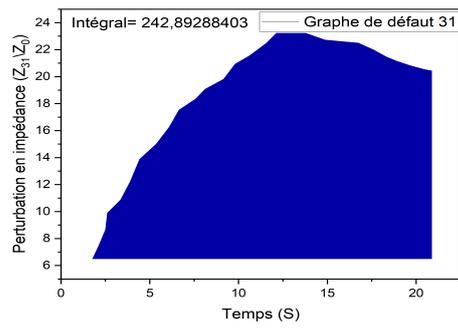
Calcul de perturbation d'impédance

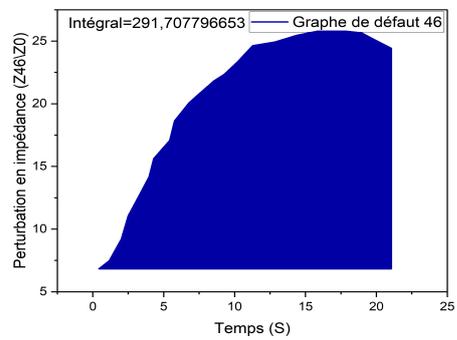
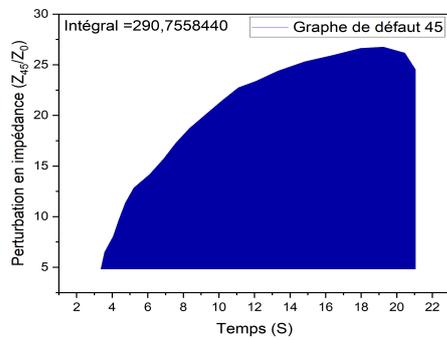
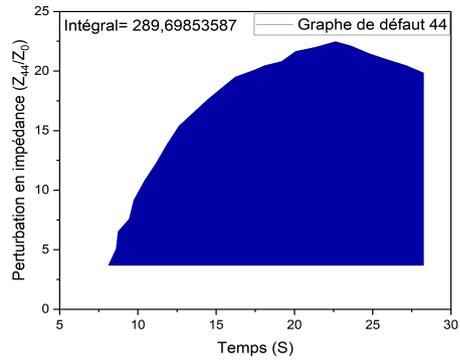
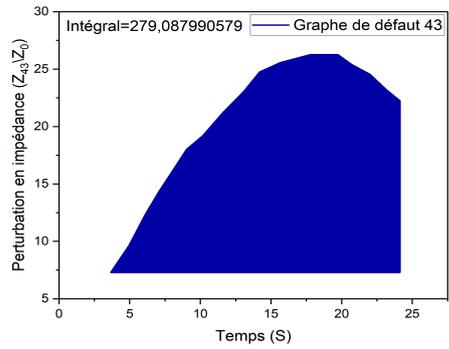
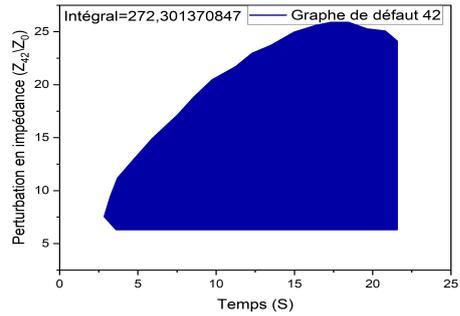
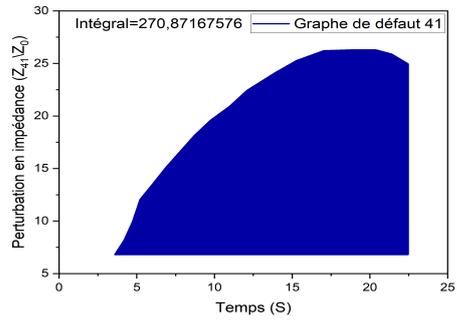
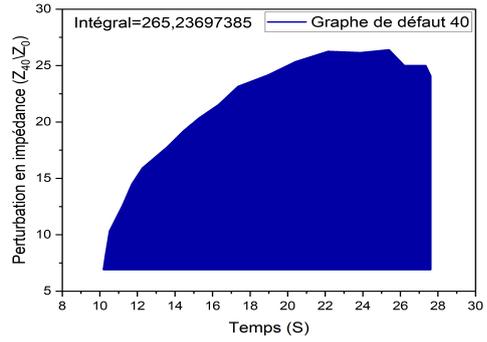
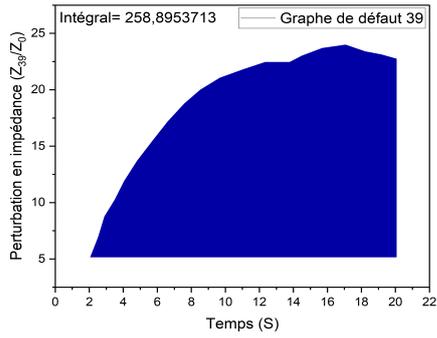


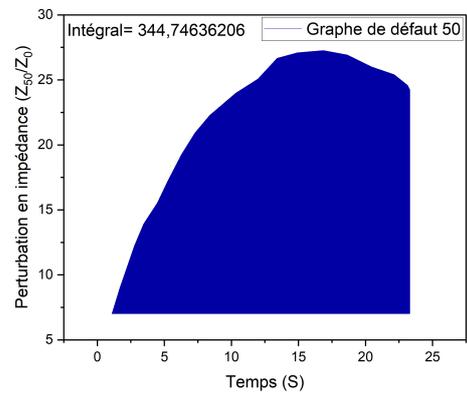
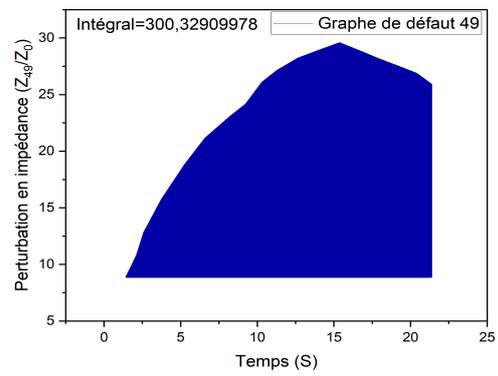
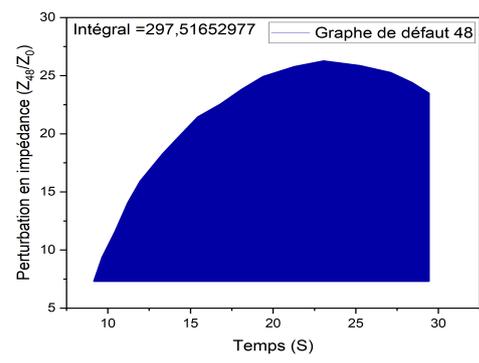
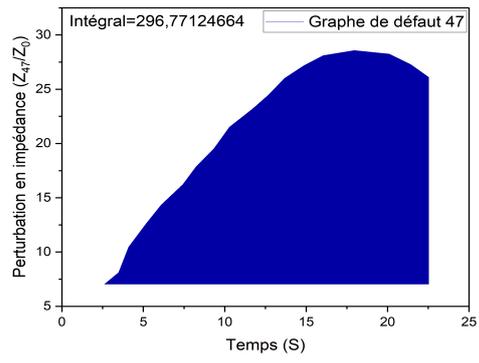












ANNEXE 2

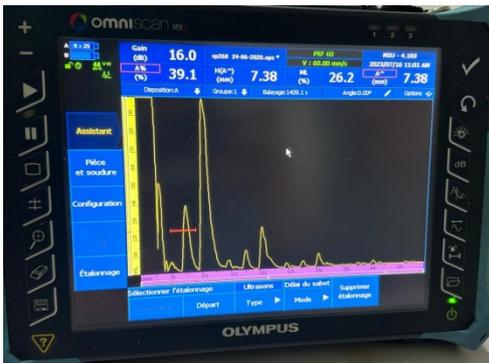
Résultats des essais ultrasonores



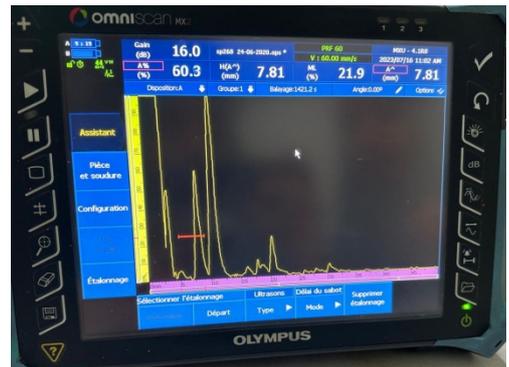
Défaut 1



Défaut 2



Défaut 5



Défaut 4



Défaut 5



Défaut 6



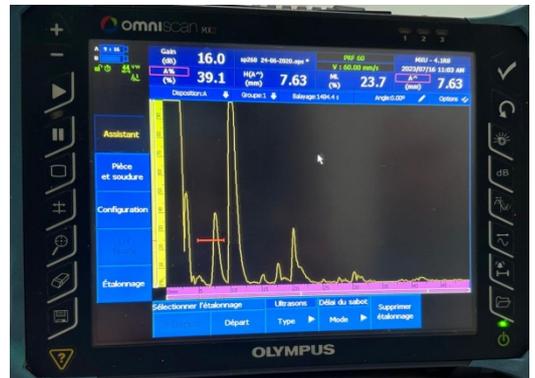
Défaut 7



Défaut 8



Défaut 9



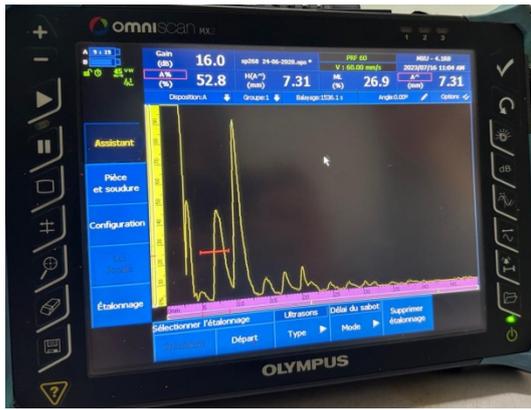
Défaut 10



Défaut 11



Défaut 12



Défaut 13



Défaut 14



Défaut 15



Défaut 16



Défaut 17



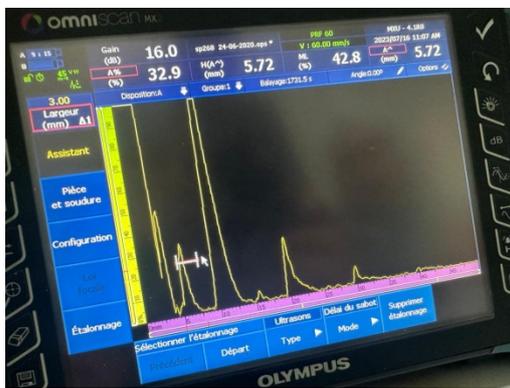
Défaut 18



Défaut 19



Défaut 20



Défaut 21



Défaut 22



Défaut 23



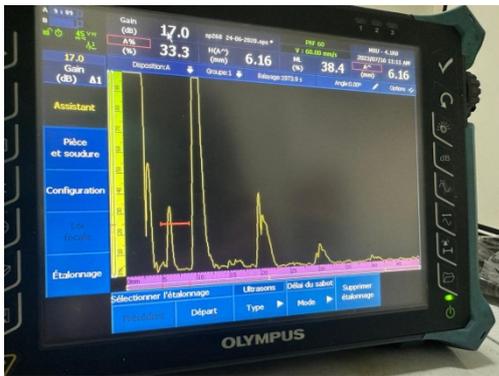
Défaut 24



Défaut 25



Défaut 26



Défaut 27



Défaut 28



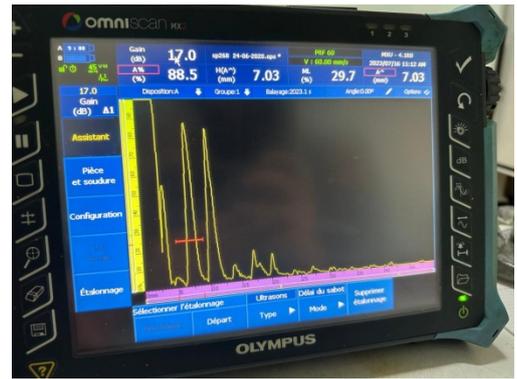
Défaut 29



Défaut 30



Défaut 31



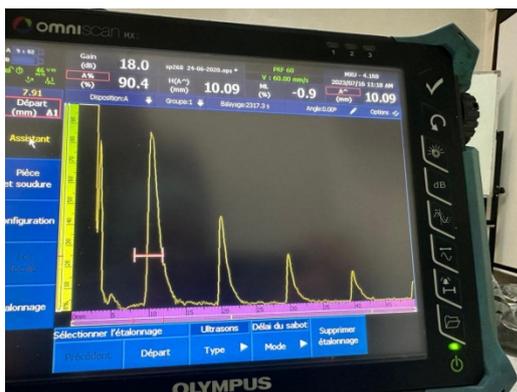
Défaut 32



Défaut 33



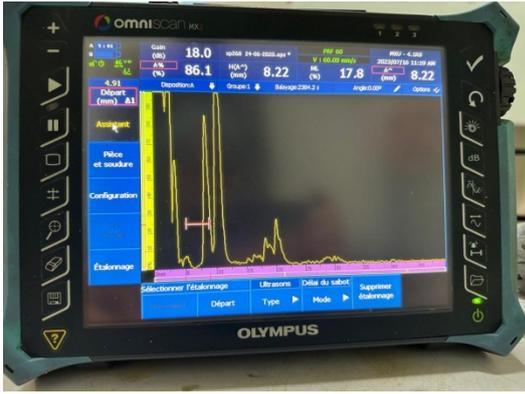
Défaut 34



Défaut 35



Défaut 36



Défaut 37



Défaut 38



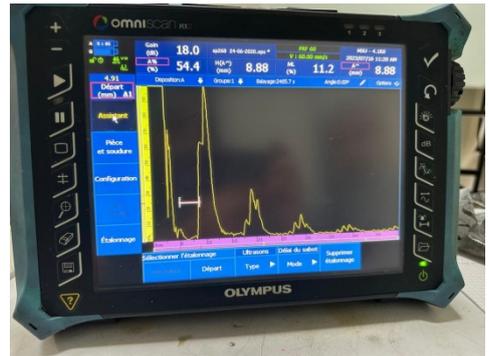
Défaut 39



Défaut 40



Défaut 41



Défaut 42

Références

Références

- [1] Dumont-Fillon J, « Contrôle non destructif (CND) », Technique de l'ingénieur, 1996.
- [2] Aggab Mouhamed El Amine « étude de contrôle non destructif par courant de Foucault et simulation par la méthode des éléments », Mémoire de Mastère, Université Larbi Ben M'hidi de Oum El Bouaghi, 2016.
- [3] Titouah Lounis, Ziane Abdeslam, « Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés », Mémoire de Mastère, 2014.
- [4] M. Lacroix, "Essais non destructifs", Techniques de l'ingénieur 7-1986.
- [5] Eric Kuhn, « Contrôle non destructif d'un matériau excité par une onde acoustique ou thermique observation par thermographie », Thèse du Doctorat, Université de Paris Ouest Nanterre la Défense, 2013.
- [6] Ali Raid, « contrôle non destructif ressuage, magnétoscopie, radiographie, courants de Foucault et ultrasons », 2018.
- [7] Loïc Brancheriau, « Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites»,
- [8] Houda Zaid « Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples », Thèse du Doctorat, Université Paris-Sud, 2013.
- [9] Nabil Benhadda, « Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault », Mémoire de Magistère, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.
- [10] Ala-Eddine lakhdari, « Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- [11] M. Mephane, « Modélisation de contrôle ultrasonore de tube d'acier présente des défauts», direction de l'information scientifique et technique, Gif-sur-Yvert France, 1998.
- [12] Abelhak Abdou, « Contrôle non destructif par courant de Foucault; Etude et réalisation d'un capteur inductif », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.

- [13] Paul E. Mix, "Introduction to nondestructive testing: a training guide", Wiley Interscience, 2nd edition, United States of America, 2005.
- [14] Yahya Choua, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université de Paris-Sud, 2009.
- [15] Abdelhak Abdou, « Contrôle non Destructif (CND) : Étude et Modélisation d'un capteur inductif a courants de Foucault », Thèse du Diplôme de Doctorat en science en Électrotechnique, Université Batna 2, 2018.
- [16] Gubbels W, American Stress Techniques, Pittsburgh, Materials Evaluation, vol.78, n°6, pp. 618-624 (7 pages), en anglais », juin 2020.
- [17] Bakai Lakhdar, Layachi Amel, « Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. : Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage » mémoire de Mastère, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018.
- [18] Zorni Chiara, «Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieu Ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction», de l'université paris-sud 11, 2012.
- [19] Bouchala T, « Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault » : Thèse de Doctorat. Université El-Hadj Lakhder, Batna, 2014.
- [20] Mauris. G, « Capteurs Ultrasonores Intelligents, Application à la Représentation Symbolique de Mesures de Distance par Codage Flou », Thèse du Doctorat, Université de Savoie, 1992.
- [21] Taleb M'hammed Mustapha, Ghedamsi Elhachmi, « Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur », Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.
- [22] Lacroix, M, « Essais non Destructifs » Techniques de l'ingénieur M110 et M111, pp. 1-21 et 1-171996.
- [23] Lai.Y, « Eddy Current Displacement Sensor with LTCC Technology », Thèse du Doctorat, Universität Freiburg Im Breisgau, Germany, 2005.
- [24] Paul E. Mix, « Introduction to nondestructive testing: a training guide », Wiley Interscience, 2nd edition, United States of America, 2005.
- [25] G. Dreyfus, J. M. Martinez, M. Samuelides M.B .Gordon, F. Badran, S .Thiria, L. Hérault, « Réseaux de neurones : Méthodologie et applications », Edition Eyrolles, 2004.

- [26] M.Weinfeld , « Réseaux de neurones», Technique de l'ingénieur, H1990, 2003.
- [27] M.Y.Ammar, « Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition Batch/Continu » Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [28] Oukacine Nacima, « Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive » Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012.
- [29] J. Rude, «Développement d'un modèle statistique neuronal pour la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote : application à la région parisienne » Thèse de Doctorat, Université Paris XII, 2008.
- [30] M.Y.Ammar ,« Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition Batch/Continu » Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [31] Fatma Zohra Ghessab, « Application des réseaux de neurones dans la prévision du comportement des ponts renforcés par matériaux composites », Mémoire de Master, Université Saad Dahleb.
- [32] Y, Le Bihan, J.Pavo, C. Marchand, « Characterization of small cracks in Eddy current Testing » Eur .Phys. J. Appl. Phys, 43,231-237, 2008.
- [33] Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie , Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair† , Aaron Courville, Yoshua Bengio «Generative Adversarial Nets » 2014.
- [34] Belhadjer Hakim, Sarouer Brahim, « Classification des images avec les réseaux de neurones convolutionnels », Mémoire de Mastère , Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [35] Laoubi Mohamed , Chems Eddine, « Contrôle d'un pendule inverse par un réseau de neurones artificiels » mémoire mastère université Akli Mohand Oulhadj – Bouira , 2017.
- [36] Ikram Chraïbi Kaadoud « Apprentissage de séquences et extraction de règles de réseaux récurrents : application au traçage de schémas techniques » thèse de doctorat.
- [37] G. Dreyfus, « réseaux de neurones », 1998.
- [38] Y.Ammar , « Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch /continu », Thèse du Doctorat de l'INP ,Toulouse, 2007.
- [39] Mathieu Feuilloy,« Étude d'algorithmes d'apprentissage artificiel pour la prédiction de la syncope chez l'homme », Thèse du Doctorat , École Doctorale STIM , 2009.

- [40] Gérard Dreyfus, « réseaux de neurones », 2023.
- [41] Biri Lydia, Guemat Yasmine , « Implémentation et évaluation des modèles de recommandation basés sur le machine et deep learning », Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020.
- [42] Marc Parizeau, « Réseaux de neurones », 2004.
- [43] Benard Espinasse « Apprentissage par rétropropagation du gradient de réseaux neuromimétiques multicouches », 2008.