الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la maintenance en instrumentation

Thème

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la maintenance des instruments

Présenté et soutenu publiquement par :

CHERGUI Wissem et MERABET Mohammed Imed

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELKHOUDJA Leila	MCB	Univ-Oran2/IMSI	**Présidente**
HAIMOR Rachida	MCB	Univ-Oran2/IMSI	**Encadrant**
ARBI Maachia	MCB	Univ-Oran2/IMSI	**Examinatrice**

Année 2023/ 2024

Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions **Allah** le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études, et grâce à Lui, ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadrante, Madame **HAIMOUR Rachida**, pour son aide, ses orientations, sa disponibilité et tous les conseils qu'elle nous a prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

Nous souhaitons exprimer un faible témoignage de notre haute gratitude aux membres du jury:

*- À Madame la Présidente **BELKHOJA Laila**, pour nous avoir honorés de sa présence et pour sa grande gentillesse, ses conseils et son aide dans la réalisation de ce travail. Elle a été notre bras droit tout au long de ces cinq années d'études.*

*- À Madame l'examinatrice **ARBI Maachia**, pour l'honneur qu'elle nous a fait par sa participation et pour le temps consacré à la lecture de notre mémoire et à mener à bien le débat.*

*Nous adressons de chaleureux remerciements à Monsieur **HACINE Mohamed Abdelhakim** pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, ainsi que pour sa patience et son encouragement. Son œil critique et son suivi ont été très précieux pour structurer notre travail.*

*Nous souhaitons également remercier tous les enseignants de **l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle** (IMSI), Université d'Oran 2, qui ont éclairé notre chemin par leur savoir.*

*Un grand merci à **Nos familles** pour leur amour, leurs conseils et leur soutien inconditionnel, tant moral qu'économique, qui nous a permis de réaliser les études que nous souhaitions et, par conséquent, ce mémoire.*

*Pour finir, nous souhaitons remercier **Toute personne** ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail."*

Wissem / Imed

Dédicace

Je remercie ***Dieu*** *le tout puissant de m'avoir donné le courage d'accomplir ce travail. Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce travail :*

Nos Frères à Gaza 

Les héros du 7 octobre, leur courage, leur force et leur patience pour le bien d'une Palestine arabe libre

À mon très cher Père

De tous les Pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance. Pour tout ce que vous avez fait pour moi, je ferai mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec l'espoir de ne jamais vous décevoir.

À ma très chère Mère

L'être le plus cher de ma vie, source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ton soutien moral et ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

À mon cher frère Walid

Peu importe ce que je dis, je ne te rendrai pas justice, mon frère. Tu as toujours été et tu continues d'être mon soutien. Je vous souhaite tout le bonheur du monde et la réalisation de vos rêves et ambitions.

À ma chère sœur Aya

Quand je suis au plus bas, c'est vous qui me remontez le moral. Je ne peux pas expliquer l'importance de votre présence dans ma vie. Je vous souhaite plein succès et la réalisation de vos ambitions et de vos objectifs.

À mes chers grands parents

Que je vous souhaite une bonne santé.

Aux gens du Coran

Tous mes enseignants et collègues de l'École coranique, je vous souhaite beaucoup de bonheur et je vous remercie pour votre soutien et votre assistance. J'ai acquis de votre part le sens du succès et de l'excellence.

À tous mes amis.

Pour l'amitié et les moments agréables que nous avons passés ensemble.

À mon binôme Imed

Pour son soutien moral, sa patience, sa gentillesse et sa compréhension tout au long de ce projet.

Wissem Chergui

Dédicace

*Merci **Allah** pour m'avoir donnée la santé, la force nécessaire et le courage pour mener à réaliser ce travail.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers **parents**, sources de tendresse et de bonheur pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance, ma gratitude et tout mon amour.*

*A ma chère sœur **Sarra**, et mes chers frères **Walid** et **Adel**, pour leurs encouragements.*

A mon adorable neveu ***Ahmed Khaled***, que dieu le protège.

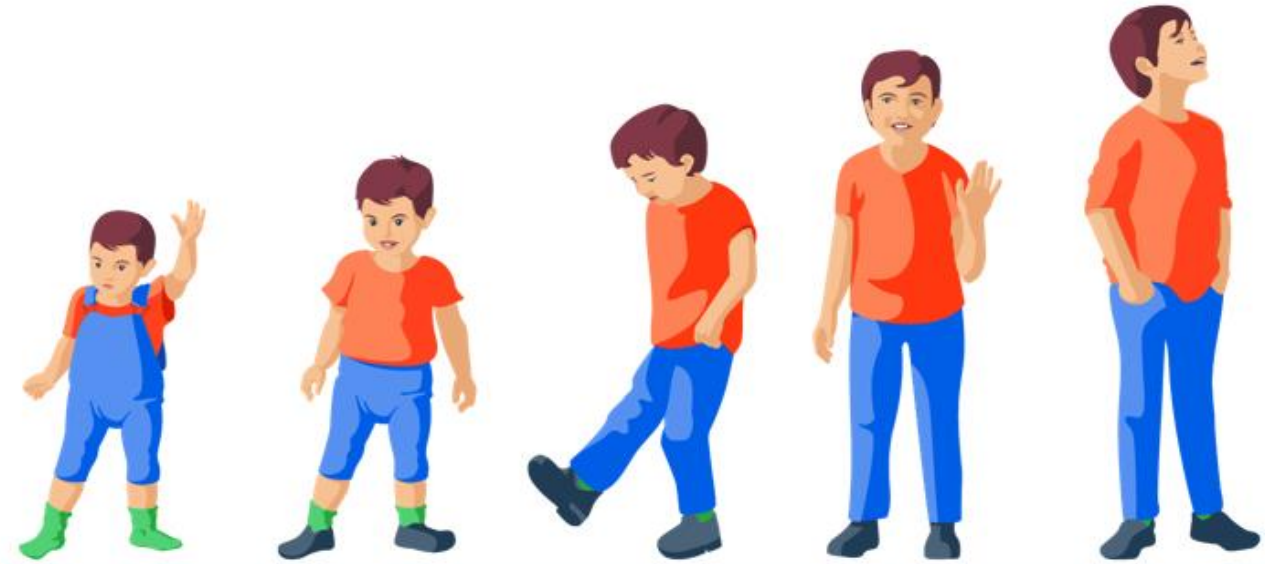
A toute ma famille

A ma binôme ***Wissem***

*A tous mes amis, **Sidahmed**, **Aissam**, **Amine**, **Abdel Aziz**, **Khaled**, **Oussama**, **Djalol**, je leur souhaite tout le succès, tout le bonheur.*

Imed Merabet

AVANT PROPOS



Faire un enfant, c'est un projet, en faire un adulte, c'est de la maintenance.

Résumé

L'intelligence artificielle est une innovation majeure dans le domaine de la maintenance industrielle, qui permet des opérations plus efficaces et plus rentables. Elle a également transformé la maintenance qui était souvent corrective et axée sur la réparation après une panne. Aujourd'hui, l'IA permet de passer à une maintenance préventive et prédictive.

Ce projet décrit une application de maintenance intelligente utilisant l'IA. Nous avons créé et conçu une application qui peut rappeler aux travailleurs de toujours effectuer une maintenance préventive sur les instruments et qui facilite leur travail en contenant toutes les informations relatives aux instruments.

Mots-clés : Intelligence artificielle, maintenance corrective, maintenance préventive, maintenance prédictive, maintenance intelligente.

Abstract

Artificial intelligence is a major innovation in industrial maintenance, enabling more efficient and cost-effective operations. It has also transformed maintenance, which was often corrective and focused on repair after a breakdown. Today, AI enables us to move towards preventive and predictive maintenance.

This project describes an intelligent maintenance application using AI. We have created and designed an application that can remind workers to always perform preventive maintenance on instruments, and that facilitates their work by containing all instrument-related information.

Keywords : Artificial intelligence, corrective maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance, intelligent maintenance**.**

ملخص

يُعد الذكاء الاصطناعي ابتكاراً رئيسياً في مجال الصيانة الصناعية، حيث يتيح عمليات أكثر كفاءة وأقل تكلفة. كما أحدث تحولا حيث كانت الصيانة غالباً ما تكون تصحيحية تركز على الإصلاح بعد حدوث عطل. أما اليوم، فيمكن الذكاء الاصطناعي من التحول إلى الصيانة الوقائية والتنبؤية.

يصف هذا المشروع تطبيق الصيانة الذكية باستخدام الذكاء الاصطناعي. حيث أنشأنا وصممنا تطبيقًا يمكنه تذكير العمال دائمًا بالصيانة الوقائية للماكينات، كما يسهل عملهم من خلال احتوائه على جميع المعلومات المتعلقة بالماكينة.

كلمات مفتاحية: الذكاء الاصطناعي، الصيانة التصحيحية، الصيانة الوقائية، الصيانة التنبؤية، الصيانة الذكية.

Table des matières

AVANT PROPOS i
Résumé ii
Table des matières v
Table des figures viii
Liste des tableaux ix
Liste des Abréviations x
Introduction générale 2

Chapitre I : État de l'art

I.1 Introduction 4
I.2 La maintenance industrielle 4
I.2.1 Définition de la maintenance 4
I.2.2 Typologie de la maintenance 6
I.2.2.1 Maintenance préventive 7
I.2.2.2 Maintenance corrective 9
I.2.3 Les objectifs de maintenance 11
I.2.3.1 Objectifs financiers 11
I.2.3.2 Objectifs opérationnels 11
I.2.4 Les opérations de maintenance 12
I.2.4.1 Les inspections 12
I.2.4.2 Les visites 12
I.2.4.3 Les contrôles 13
I.2.4.4 Le dépannage 13
I.2.4.5 Les réparations 13
I.2.4.6 Les révisions 13
I.2.4.7 Les échanges standards 13
I.2.5 Les niveaux de maintenance 13
I.2.6 La fonction maintenance 16
I.2.7 Historique et évolution de la maintenance industrielle 16
I.2.7.1 Ancienne Historique de la maintenance industrielle 16
I.2.7.2 Évolution de la Maintenance Industrielle 17
I.3 Intelligence artificielle 18
I.3.1 Historique de l'IA 18

I.3.2 Définition de l'IA.....19
I.3.3 Deep Learning & Machine Learning.....21
I.3.3.1 Apprentissage automatique (Machine Learning).....21
I.3.3.2 Apprentissage profond (Deep Learning).....23
I.3.3.3 Machine Learning vs Deep Learning.....23
I.3.4 Les différents types d'IA.....24
I.3.4.1 L'intelligence artificielle faible.....24
I.3.4.2 L'intelligence artificielle forte.....24
I.3.5 Domaines d'application de l'IA.....25
I.4 Conclusion.....26

Chapitre II : Maintenance industrielle & Intelligence artificielle

II.1 Introduction.....28
II.2 Intelligence Artificielle et Maintenance Industrielle.....28
II.2.1 L'impact de l'IA sur la maintenance.....29
II.2.2 L'optimisation des processus de maintenance grâce à l'IA.....30
II.2.3 L'IA au cœur de la stratégie de maintenance.....31
II.2.3.1 Analyse en temps réel : comment l'IA transforme la surveillance ?.....31
II.2.3.2 Personnalisation et précision : comment l'IA améliore les opérations de maintenance ?.....32
II.2.4 Applications de l'IA dans la maintenance.....32
II.2.4.1 Réalité Augmentée.....32
II.2.4.2 Réalité Virtuelle.....33
II.2.4.3 Télémaintenance.....35
II.2.4.4 Robots de Maintenance.....36
II.2.5 Avantages et limites d'IA dans la maintenance.....37
II.2.5.1 Avantages.....37
II.2.5.2 Limites.....38
II.3 Conclusion.....38

Chapitre III : Conception et développement de l'application INTMAIN

III.1 Introduction.....40
III.2 Problématique et Solution Proposée.....40
III.3 Outils et Technologies.....41
III.3.1 Android studio.....41

III.3.2 Langage de programmation (Kotlin) 41
III.4 Schéma fonctionnel de notre application 42
III.4.1 Centrale de traitement d'air 43
III.4.2 Capteurs 44
III.4.2.1 Capteur de pression (Pressostat) 44
III.4.2.2 Capteur de température (pt100) 44
III.4.2.3 Capteur d'humidité (psychromètre) 45
III.4.3 Raspberry PI (RPI) : 45
III.4.3.1 Séries Et Générations 46
III.4.3.2 Systèmes d'exploitation 47
III.4.4 Protocole WebSocket 47
III.4.5 Serveur VPS et Modèle IA 48
III.4.5.1 Qu'est-ce qu'un VPS ? 48
III.4.5.2 Modèle IA 49
III.5 Conception du prototype 53
III.5.1 Appellation et Logo 53
III.5.2 Interface d'application 54
III.5.2.1 Section des activités récentes 55
III.5.2.2 Synthèse 55
III.5.2.3 Icônes en haut à droite de l'écran 55
III.5.2.4 Icône de liste secondaire 59
III.6 Analyse du questionneur 63
III.7 Conclusion 64
Conclusion générale 66
Perspective 67
Bibliographie 69

Table des figures

Figure I. 1: Le contenu du rôle de maintenance.....6
Figure I. 2 : Types de maintenance 6
Figure I. 3: Types de maintenance préventive 7
Figure I. 4: Types de maintenance corrective 10
Figure I. 5: Schématisation des objectifs de la maintenance. 12
Figure I. 6: Contenu de la fonction maintenance 16
Figure I. 7: L'évolution de la maintenance.....17
Figure I. 8: Illustration du test de Turing 19
Figure I. 9: L'intelligence artificielle vs Dee Learning vs Machine Learning 21
Figure I. 10: Schéma des différents types de machine Learning 22
Figure I. 11: Machine Learning vs Deep Learning 23
Figure I. 12: Comparaison entre L'IA fort et L'IA faible 24
Figure I. 13: Applications de l'intelligence artificielle.....26
Figure II. 1: Maintenance du corrective au prédictive. 30
Figure II. 2: La RA au service de la maintenance.....33
Figure II. 3: La RV au service de la maintenance 34
Figure II. 4: La RA vs la RV.....35
Figure II. 5: Architecture de la Télémaintenance.....36
Figure II. 6: Robots de maintenance 37
Figure III. 1: Le contenu des avantages de Kotlin.....42
Figure III. 2: Schéma bloc simplifié de l'application 43
Figure III. 3: Pressostat 44
Figure III. 4: Pt100.....45
Figure III. 5: Psychromètre 45
Figure III. 6: Raspberry Pi 4 Model B 46
Figure III. 7: Connexion WebSocket 48
Figure III. 8: Exemple de Notification.....53
Figure III. 9: Le logo de notre application INTMAIN.....54
Figure III. 10: L'interface de l'application de INTMAIN 54
Figure III. 11: Icône de recherche.....55
Figure III. 12: Icône des options.....56
Figure III. 13: Icône Machines& Pièces 57

Figure III. 14: Informations sur machine 58
Figure III. 15: Icône de stock 59
Figure III. 16: Icône de liste secondaire.....60
Figure III. 17: Composants des Machines.....61
Figure III. 18: Icône de Liste de réparation.....62
Figure III. 19: Icône de l'historique.....63

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Les cinq niveaux de maintenance 15

Liste des Abréviations

IA : Intelligence Artificielle.

NF : Norme Française

EN : Norme Européenne

AFNOR : Association Française de Normalisation.

EFNMS : European Federation of National Maintenance Societies.

GPS : Global Positioning System.

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels.

ML : Machine Learning.

DL : Deep Learning.

GMAO : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur.

RA : Réalité Augmentée.

RV : Réalité Virtuelle.

IDE : Environnement de Développement Intégré (Integrated Development Envronment).

E-ADT : Eclipse Android Development Tools.

JVM : JAVA Virtual Machine.

RPI : Raspberry PI.

VPS : serveur privé virtuel (Virtual Private Server).

CTA : Centrale de traitement d'air**.**

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation.

SBC : Single Board Computer.

CPU : Central Processing Unit.

GPU : graphics Processing Unit.

SOC : System on Chip.

ARM : Augmanted RISC Movement.

POE : Powered on Ethernet.

IOT : Internet of Things.

RISC : Reduced Instruction Syntax Computer.

OS : Operating System.

UI : User Interface.

PSU : Power Supply Unit.

Introduction générale

Introduction générale

Tout comme les humains ont besoin d'une surveillance régulière pour maintenir leur santé, les machines nécessitent également une prévention et une réparation continues pour éviter les défauts et les pannes ; c'est ce qu'on appelle la maintenance des instruments. Essentielle pour garantir la continuité des opérations et la productivité, la maintenance des instruments implique la détermination précise du délai de mise en place et le choix adéquat de la portée des activités de maintenance. Cela permet non seulement d'assurer le bon fonctionnement des équipements industriels, mais aussi de planifier efficacement la demande de ressources nécessaires à la maintenance, telles que les pièces détachées, le personnel et les finances. Au cours des dix dernières années, de nombreuses recherches ont été menées et des tentatives entreprises pour appliquer des techniques d'intelligence artificielle (IA) à la modélisation et à la gestion de la maintenance. L'intégration de l'IA dans la maintenance des instruments est un sujet d'actualité passionnant, offrant de nombreuses possibilités pour optimiser les processus de maintenance et améliorer les performances des instruments.

L'objectif de notre projet est de contribuer à ce sujet. Nous avons créé et conçu une application mobile fonctionnant grâce à l'intelligence artificielle, dont le but est de faciliter le service aux travailleurs en leur rappelant leurs tâches de maintenance, car elle contient beaucoup d'informations sur les équipements utilisés par le travailleur dans la recherche de ce dont il a besoin et répond au plus vite.

Pour cela, nous avons divisé notre mémoire en trois chapitres :

- **Chapitre 1 : État de l'art.** Ce chapitre est dédié à la définition des notions de base de la maintenance, aux différents types de maintenance, et à un aperçu sur l'intelligence artificielle, ses bases et ses applications.
- **Chapitre 2 : Maintenance industrielle & Intelligence artificielle.** Nous présenterons dans ce chapitre une étude sur la manière d'utiliser des méthodes et des techniques d'intelligence artificielle pour développer la maintenance industrielle.
- **Chapitre 3 : Présentation du projet.** Ce chapitre portera sur la création de notre projet. Les techniques et les outils requis pour l'application sont d'abord expliqués, puis une description du système et de ses principes de fonctionnement, et enfin une explication de son but.

Ce projet de fin d'études sera terminé par une conclusion générale qui résume les différentes étapes de notre travail en soulignant ses aspects positifs et en proposant quelques perspectives.

Chapitre I

État de l'art

I.1 Introduction

La maintenance industrielle, autrefois perçue comme une contrainte inévitable, a longtemps été associée à des dépenses. Effectivement, à ses débuts, elle se structure autour d'une logique purement corrective : on ne s'intervient que lorsque le besoin se fait sentir, conformément à l'adage « Si ce n'est pas cassé, on ne répare pas ». La gestion manuelle était caractéristique de cette époque, où chaque action était dictée par l'urgence du moment.

Toutefois, au cours des dernières décennies, la maintenance a connu une évolution importante. Les pratiques ont été bouleversées par la pression croissante pour une compétitivité toujours plus élevée, l'arrivée des questions de sécurité et de conformité aux normes. Devenues plus complexes, les machines comportaient des risques accrus, ce qui exigait une vigilance accrue et de nouvelles ressources.

De nos jours, l'ère de l'intelligence artificielle offre une maintenance plus intelligente et anticipatrice, ce qui a entraîné l'apparition de technologies nouvelles et avancées.

I.2 La maintenance industrielle

I.2.1 Définition de la maintenance

Le maintien des instruments de production revêt une importance capitale pour la productivité des entreprises et la qualité des produits. Il s'agit d'un défi industriel qui nécessite de remettre en question les structures figées actuelles et de promouvoir des méthodes adaptées à la nature nouvelle des équipements.

Prenons en compte quelques définitions de la maintenance

- D'après Larousse:

« Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement ».[1]

- L'AFNOR a établi la première définition normative de la maintenance en 1984 (Norme NF X 60-010) : « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au cout optimal ».[2]

Cette définition met en évidence quatre concepts :

- **Maintenir :** suivi, surveillance.
- **Rétablir :** correction de défaut.
- **État spécifie** et **service déterminé :** niveau de compétences, objectifs de la maintenance.
- **Coût optimal :** efficacité économique

- Elle est remplacée depuis 2001 par une nouvelle définition, européenne

(NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».[3]

- Elle est également définie par la Fédération Européenne des Associations nationales de Maintenance (EFNMS) : « All actions which have the objective of retaining or restoring an item in or to a state in which it can perform its required function. The actions include the combination of all technical and corresponding administrative, managerial, and supervision actions ».

Cela signifie toutes les actions visant à maintenir ou à restaurer un élément dans un état où il peut accomplir sa fonction nécessaire. Les actions sont l'ensemble des actions techniques et des actions d'administration, de gestion et de supervision correspondantes.

Un service maintenance a pour mission principale de préserver les capacités opérationnelles des moyens de production et leurs valeurs patrimoniales. Il est essentiel d'avoir ces compétences opérationnelles afin de répondre à une commande non pas lorsque l'entreprise peut l'exécuter, mais au moment où le client la demande. Il est possible de considérer la valeur patrimoniale comme l'augmentation de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui peut repousser ou annuler la nécessité d'un nouvel investissement ou faciliter leur revente. [4]

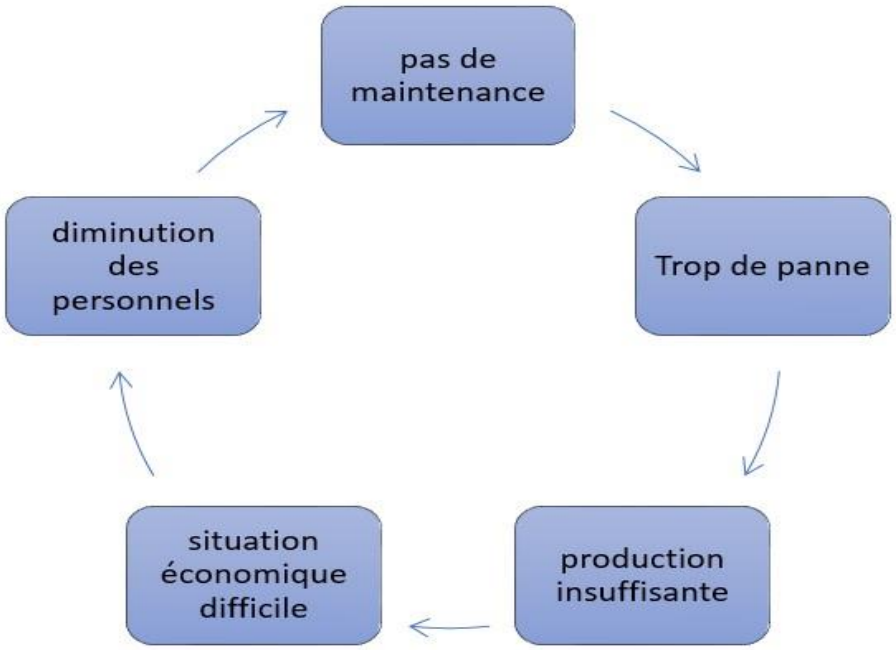


Figure I. 1: *Le contenu du rôle de maintenance*

I.2.2 Typologie de la maintenance

Afin de faciliter la compréhension, on peut résumer les diverses catégories de maintenance selon le schéma ci-dessous (en se basant sur la norme NF EN 13306 – Terminologie de la maintenance) :

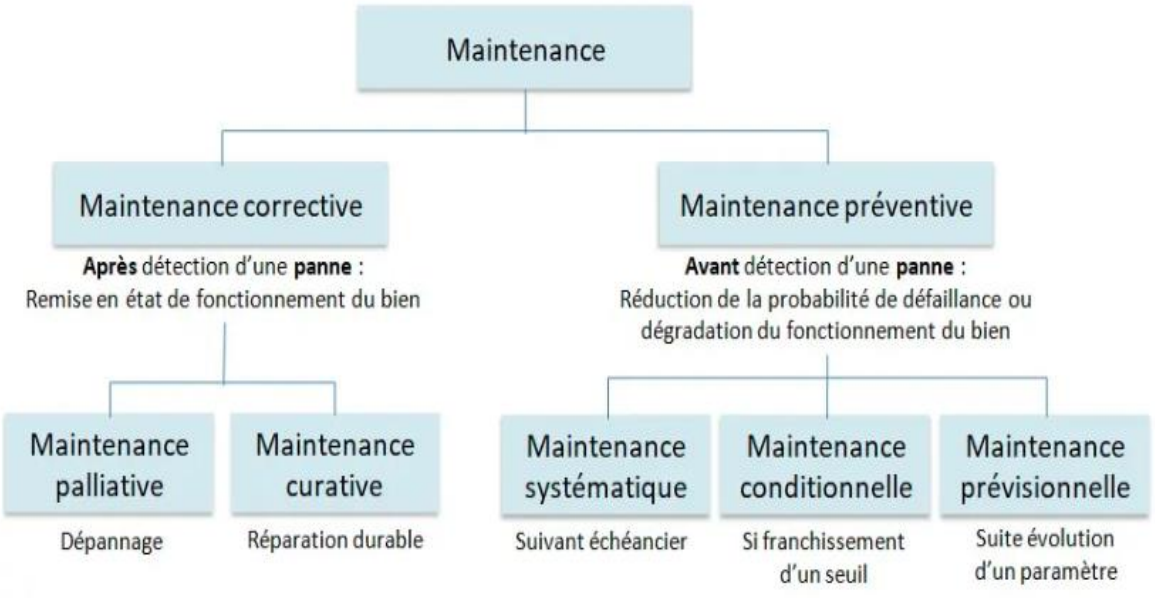


Figure I. 2 : *Types de maintenance*

I.2.2.1 Maintenance préventive

❖ *Définition et concepts généraux*

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance préventive est une « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ». [3]

Il s'agit d'une opération de maintenance qui est réalisée avant que les dommages n'entraînent l'arrêt de l'équipement ou la détérioration de son fonctionnement. L'objectif est de réaliser les opérations appropriées pour permettre à l'équipement de fonctionner de nouveau sans problème pendant une période spécifique.

❖ *Les types de maintenance préventive*

Dans la figure ci-dessous, la maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle, selon que le critère de déclenchement des travaux est un temps ou un indicateur de défaillance. Ces différentes formes de maintenance seront abordées ci-après :

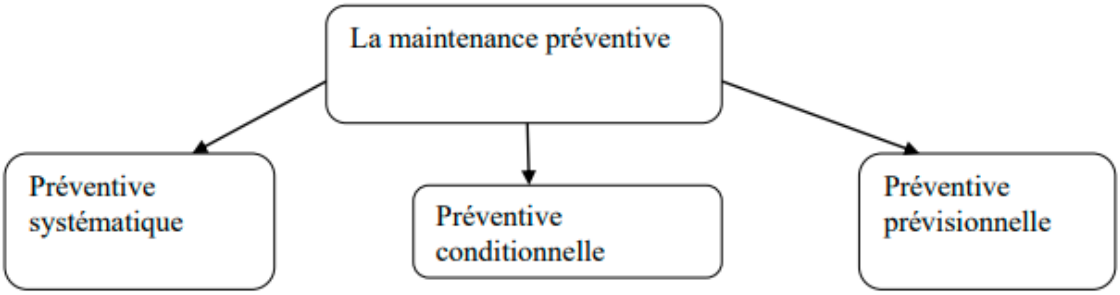


Figure I. 3: *Types de maintenance préventive*

a. La maintenance systématique

« C'est une maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (en anglais : Fixed Time Maintenance - FTM, ou Time Based Maintenance - TBM) ». [3]

Les interventions sont réalisées régulièrement à :

- Temps
- Nombre de cycles
- Distance parcourue
- Quantité produite

b. La maintenance conditionnelle

« C'est une maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent (en anglais : Condition Based Maintenance - CBM) ». [3]

Il est vivement conseillé de ne pas laisser une machine fonctionner sans effectuer une maintenance régulière. Il n'est pas toujours judicieux de faire une maintenance systématique, qui consiste à montrer la fonctionnalité de la machine ou à la remplacer. Dans 15-20% des situations de démonstration et de réparation, il est possible d'observer des anomalies. Cependant, il est essentiel d'effectuer une surveillance non destructive et fonctionnelle afin de repérer rapidement les éventuelles imperfections. C'est une maintenance conditionnelle. [5]

c. La maintenance prévisionnelle

« La maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (en anglais, elle est connue sous la dénomination Predictive Maintenance) ». [3]

On la nomme également maintenance prédictive. Il s'agit d'un nouveau type de maintenance conditionnelle. Il est essentiel de comprendre la loi de développement de la défaillance (comme l'usure, la fissure, par exemple) afin de prédire la durée de vie résiduelle avant la défaillance. En mesurant le paramètre correspondant (longueur, épaisseur) à un moment donné grâce à l'une des techniques utilisées pour la maintenance conditionnelle, on peut prédire la durée de vie résiduelle avant la défaillance en connaissant sa vitesse d'évolution. Il s'agit d'une forme couramment employée dans de nombreux secteurs particulièrement sensibles (centrales nucléaires, transport ferroviaire, transport aérien, etc.) où les lois de développement de certaines défaillances sont suffisamment connues. Cela favorise une meilleure planification des mesures et des interventions. [5]

Pour la maintenance prévisionnelle, il y a deux méthodes pour évaluer la durée de fonctionnement résiduelle avant la panne :

- La prévision physique : prévision basée sur la modélisation ou l'analyse d'un phénomène physique de dégradation (fissure, usure, déformation, corrosion, etc.) en utilisant les méthodes et les outils de différentes disciplines telles que la mécanique de la rupture, la

tribologie, la résistance des matériaux, la science de la corrosion, la science des matériaux, etc.

- La prévision multidimensionnelle : prévision basée sur une variété de données de fonctionnement, de maintenance et d'environnement en utilisant des algorithmes sophistiqués tels que ceux de l'intelligence artificielle, tels que le Machine Learning.

I.2.2.2 Maintenance corrective

Même s'il est parfois erroné de l'appeler maintenance réactive, cette dénomination reflète néanmoins assez bien la logique de ce type de maintenance. Dans le domaine de la maintenance corrective, il est essentiel d'agir en réponse à un événement : un aléa, une défaillance de fonctionnement ou de qualité, une diminution de la performance, une défaillance partielle ou totale.

❖ *Définition et concepts généraux*

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance corrective est définie comme : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».[3]

Ce mode de fonctionnement est similaire à l'entretien traditionnel qui était généralement effectué avant l'émergence de la maintenance industrielle. Aucune anticipation n'est faite, seulement une surveillance, l'essentiel des opérations se résumant aux graissages et vidanges.

La maintenance corrective comprend les actions qui permettent de rétablir le fonctionnement d'un système défaillant. Cependant, une panne ne survient jamais sans l'intervention du système. L'objectif de ces opérations est donc de favoriser une reprise rapide de la production.

❖ *Les types de maintenance corrective*

Dans la figure ci-dessous, on peut distinguer deux types de maintenance corrective :

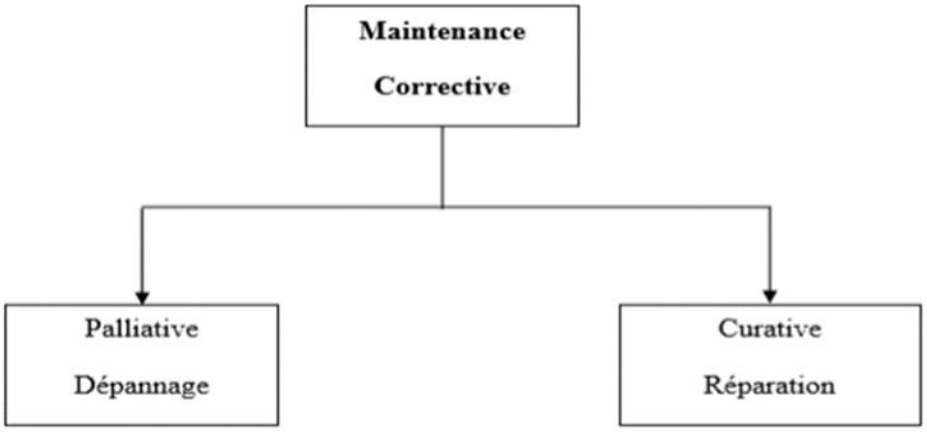


Figure I. 4: *Types de maintenance corrective*

- **Maintenance curative :** Ce type de maintenance permet de restaurer le système de manière permanente après l'apparition d'une panne. Elle se distingue par l'identification des origines d'une panne afin de réparer l'équipement. La réparation du système est une intervention durable. [7]
- **Maintenance palliative :** opération visant à rétablir le fonctionnement provisoire d'un équipement afin qu'il puisse accomplir une partie des fonctions nécessaires. L'intervention est temporaire, ce qui signifie qu'elle sera nécessairement suivie d'une intervention ultérieure. [7]

Selon les niveaux de difficulté, les moyens utilisés et les répercussions sur la production, les opérations palliatives sont habituellement classées I ou II, tandis que les opérations curatives sont classées III ou IV. [6]

Les formes classiques de la maintenance sont la maintenance corrective et la maintenance préventive systématique. Aujourd'hui encore, la première est une activité essentielle tandis que la seconde est de plus en plus remplacée par une maintenance préventive conditionnelle qui, tout comme la maintenance prédictive, reflète les nouvelles tendances en matière de maintenance. Toutes deux utilisent les avancées informatiques et appliquent des méthodes de diagnostic avancées. [9]

I.2.3 Les objectifs de maintenance

« Le zéro panne c'est l'objectif principal de la maintenance »

Les équipes de maintenance ont pour but de maintenir les installations de production en état impeccable et de garantir une productivité globale optimale tout en optimisant les dépenses. Pour obtenir le meilleur rendement, il est essentiel de prévenir les pannes. Les objectifs de la maintenance peuvent être divisés en deux catégories ; voir la figure suivante :

I.2.3.1 Objectifs financiers

- Réduire les dépenses liées aux opérations.
- Maximiser les bénéfices.
- Minimiser les coûts liés à la maintenance.

I.2.3.2 Objectifs opérationnels

- Améliorer les mesures de maintenance (en réduisant le nombre d'interruptions de service et en réduisant les périodes de pannes accidentelles).
- Garantir que les produits fabriqués sont de qualité et de quantité, tout en respectant les délais.
- Maintenir une qualité élevée dans les tâches réalisées par les services de maintenance, en particulier en améliorant la qualité des produits et en prolongeant la capacité de vie des équipements.
- Garantir un rendement de qualité supérieure.
- Garantir la disponibilité des équipements. [1] [7]

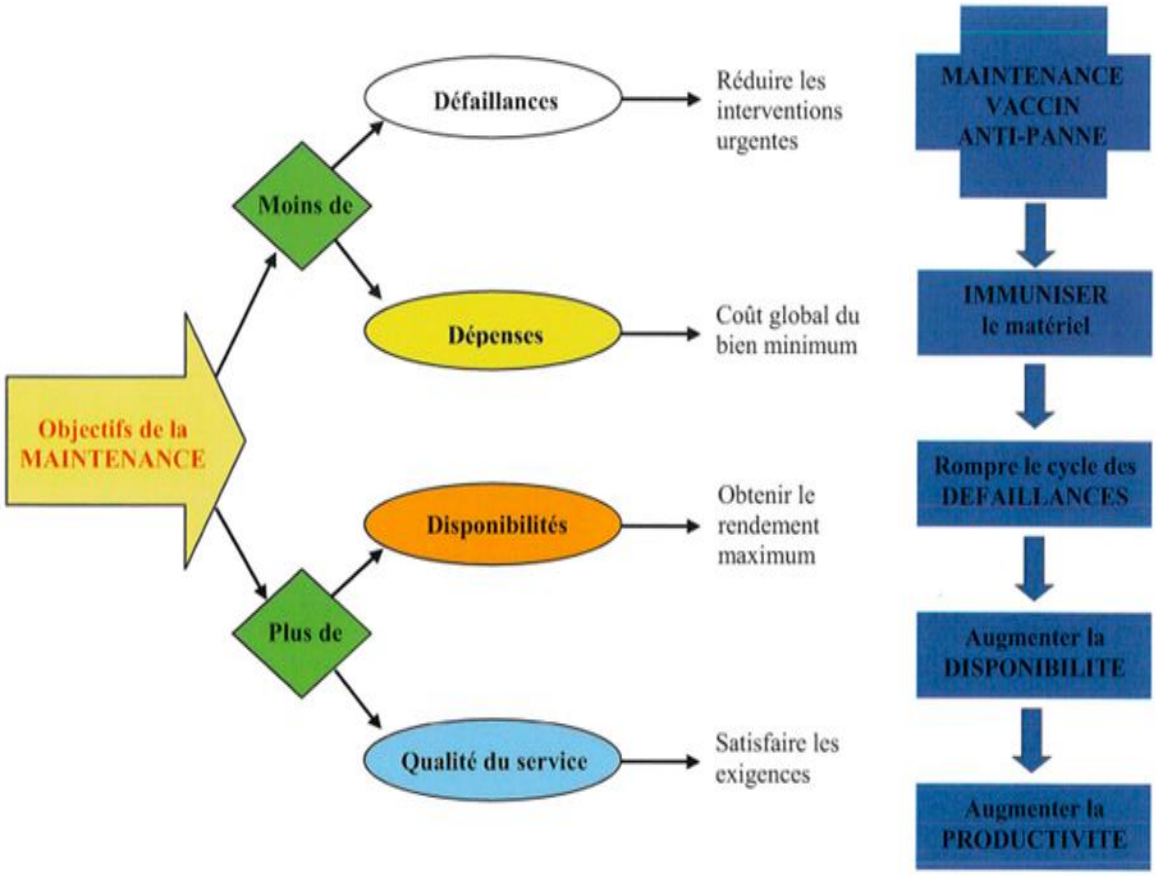


Figure I. 5: *Schématisation des objectifs de la maintenance.*

I.2.4 Les opérations de maintenance

Selon [8] Les opérations de la maintenance industrielle sont :

I.2.4.1 Les inspections

Il s'agit d'actions de surveillance qui impliquent de détecter régulièrement des anomalies et de réaliser des ajustements simples sans avoir besoin d'outils spécifiques ni d'arrêter l'outil de production ou les équipements.

I.2.4.2 Les visites

Il s'agit d'opérations de surveillance qui se déroulent selon une fréquence préétablie dans le cadre de la maintenance préventive systématique. Ces interventions désignent une série d'opérations préétablies qui peuvent conduire au démontage d'organes et à l'immobilisation du matériel.

I.2.4.3 Les contrôles

Leur signification est de vérifier la conformité à des données préétablies, suivies d'un jugement. Le contrôle peut impliquer une activité de collecte d'informations, y compris une prise de décision : acceptation, rejet, report ; ainsi que des visites pour effectuer des opérations de maintenance corrective. Il est essentiel de réaliser des opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) afin de contrôler l'évolution de l'état réel du bien, qu'elles soient réalisées de manière continue ou à des intervalles préétablis ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'objets utilisés.

I.2.4.4 Le dépannage

Dans le but de restaurer le fonctionnement d'un bien en panne, une action de dépannage peut être adaptée à des résultats temporaires et à des conditions de réalisation qui ne respectent pas les règles de procédures, de coûts et de qualité, et cette action sera suivie de la réparation.

Il est possible d'appliquer le dépannage, par exemple, sur des équipements qui fonctionnent en permanence et dont les exigences de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

I.2.4.5 Les réparations

Une intervention de maintenance corrective définitive et limitée après une défaillance.

I.2.4.6 Les révisions

Un ensemble d'examens, de contrôles et d'interventions réalisés pour garantir la protection du bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant une période ou pour un nombre spécifique d'unités d'utilisation.

I.2.4.7 Les échanges standards

La reprise d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé et la vente au même client d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur sont effectuées moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé en fonction du coût de remise en état.

I.2.5 Les niveaux de maintenance

Cinq niveaux de maintenance sont définis par la norme NF X60-110 en fonction des travaux réalisés, de leur complexité, des intervenants et de leur compétence, ainsi que du matériel utilisé (tableau 1).

- ***1ere niveau***

Il est nécessaire de prendre des mesures simples pour faciliter l'exploitation et de les réaliser sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité en utilisant des équipements de soutien intégrés au bien. L'utilisateur du bien peut réaliser ce genre d'opération en utilisant, si nécessaire, les équipements de soutien intégrés au bien et en suivant les instructions d'utilisation.

- ***2eme niveau***

Les actions requièrent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés ou externes) qui sont faciles à utiliser ou à mettre en place. Un personnel qualifié réalise ce genre d'opérations de maintenance en suivant les procédures détaillées et en utilisant les équipements de soutien spécifiés dans les instructions de maintenance. Un employé est qualifié lorsqu'il a été formé pour travailler en sécurité sur un bien exposé à des risques potentiels et est considéré comme apte à réaliser les travaux qui lui sont confiés, en raison de ses connaissances et de ses compétences.

- ***3eme niveau***

Il y a des opérations qui exigent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, qui sont difficiles à utiliser ou à implémenter. Un technicien compétent peut réaliser ce genre d'opération de maintenance en suivant des procédures détaillées et en utilisant les équipements de soutien mentionnés dans les instructions de maintenance.

Il est nécessaire qu'un technicien spécialisé réalise ce genre d'intervention, que ce soit sur place ou dans un local de maintenance, en utilisant les outils spécifiés dans les instructions de maintenance, ainsi que des appareils de mesure et de réglage, ainsi que des bancs d'essais. Il est également nécessaire de vérifier les équipements en utilisant la documentation appropriée et les pièces fournies par le magasin.

Ce genre de maintenance demande une expertise confirmée. Il ne peut être confié qu'à un responsable interne qualifié.

- ***4eme niveau***

Les opérations nécessitent la maîtrise d'une technique ou d'une technologie spécifique et/ou l'utilisation d'équipements de soutien spécialisés. Un technicien ou une équipe spécialisée réalise ce genre d'opération de maintenance en suivant toutes les instructions de maintenance générales ou spécifiques.

Il est nécessaire d'effectuer ce type d'intervention par une équipe composée d'un encadrement technique très compétent, dans un atelier spécialisé équipé d'un équipement complet (outils mécaniques, câblage, nettoyage, etc.), ainsi que des bancs de mesure et des étalons de travail nécessaires, ainsi que de toute documentation générale ou spécifique.

- ***5eme niveau***

Les opérations nécessitent des compétences spécifiques et nécessitent l'utilisation de techniques ou de technologies spécifiques, de processus et/ou d'équipements de soutien industriels.

Selon la définition, ce type d'opérations de maintenance (comme la rénovation, la reconstruction, etc.) est réalisé par le constructeur ou par un service ou une entreprise spécialisée, en utilisant des équipements de soutien spécifiés par le constructeur et donc proches de la production du bien en question.

Tableau I. 1: *Les cinq niveaux de maintenance [5]*

Niveau	Opérations principales	Réalisateurs
1	Petites opérations de ronde ou d'auto - maintenance	Exploitants Rondiers
2	Petites opérations de ronde ou d'auto - maintenance	Exploitants Rondiers
3	Opérations normales de maintenance préventive ou corrective	Mainteneurs internes
4	Grandes opérations de maintenance préventive ou corrective	Mainteneurs internes Prestataires externes
5	Rénovation, reconstruction	Prestataires externes

I.2.6 La fonction maintenance

On peut représenter la fonction de maintenance comme un ensemble d'activités divisées en deux sous-ensembles : les activités techniques et les activités de gestion. La figure I.6 illustre ces diverses activités : Contenu de la fonction de maintenance. [4]

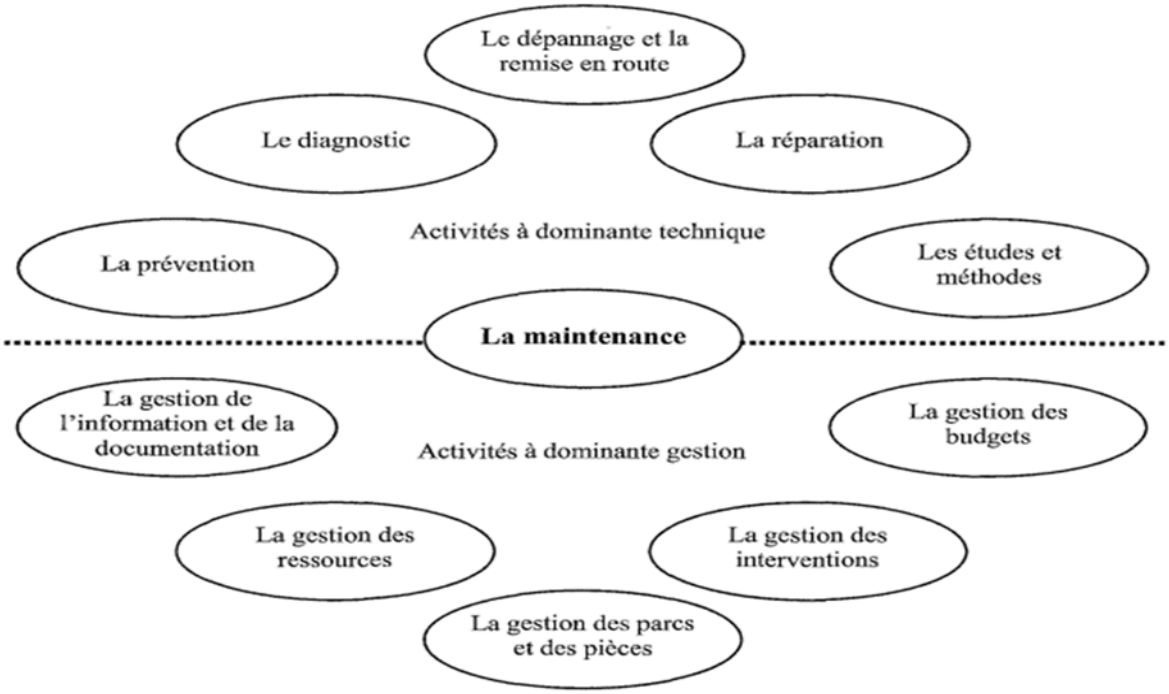


Figure I. 6: *Contenu de la fonction maintenance*

De cette manière, la fonction de maintenance est devenue au fil du temps un domaine complexe où différentes compétences sont mises en œuvre, telles que les méthodes de recherche opérationnelle pour améliorer différents aspects tels que l'optimisation des coûts, la gestion des stocks de pièces de rechange, la planification et l'ordonnancement des interventions en fonction des capacités d'action de l'entreprise, les compétences en diagnostic et en prédiction pour réaliser les actions de maintenance préventive, et bien d'autres. [4]

I.2.7 Historique et évolution de la maintenance industrielle

Au fil des décennies, l'histoire et l'évolution de la maintenance industrielle ont subi des changements importants. Quelques éléments essentiels : [10]

I.2.7.1 Ancienne Historique de la maintenance industrielle

- ***Avant la Seconde Guerre Mondiale***

En règle générale, les machines industrielles étaient massives, solides et fonctionnaient à une vitesse élevée. Les périodes d'interruption n'étaient pas importantes, et la maintenance était effectuée de manière sporadique, lorsqu'une machine était en panne.

- ***Après la Seconde Guerre Mondiale***

Grâce à la reconstruction de l'industrie, le rythme de production a augmenté et les coûts de réparation des machines ont augmenté. Cette situation a entraîné une amélioration des méthodes de maintenance, en particulier la maintenance préventive.

I.2.7.2 Évolution de la Maintenance Industrielle

- ***Entre les années 1960 et 1980 :*** On considérait encore la maintenance industrielle comme une activité secondaire, mais les exigences du marché concurrentiel et l'intolérance aux temps d'arrêt ont connu une augmentation, ce qui a entraîné une hausse des coûts de maintenance. Cela a entraîné l'évolution de l'entretien préventif et l'amélioration des méthodes de gestion.
- ***Depuis les années 1980 :*** Les installations et les systèmes ont pris une nouvelle dimension de complexité. Il est devenu essentiel de répondre aux exigences de fiabilité croissante, de comprendre les risques, l'environnement et la sécurité. De nouvelles idées telles que la surveillance des conditions, la production à temps, les normes de qualité, les systèmes spécialisés et la maintenance axée sur la fiabilité ont émergé.
- ***Depuis les années 2000 :*** L'intelligence artificielle joue un rôle crucial dans l'amélioration de la maintenance industrielle. Sa précision dans l'anticipation des défaillances est incomparable, ce qui permet d'améliorer les interventions et de diminuer les temps d'arrêt.

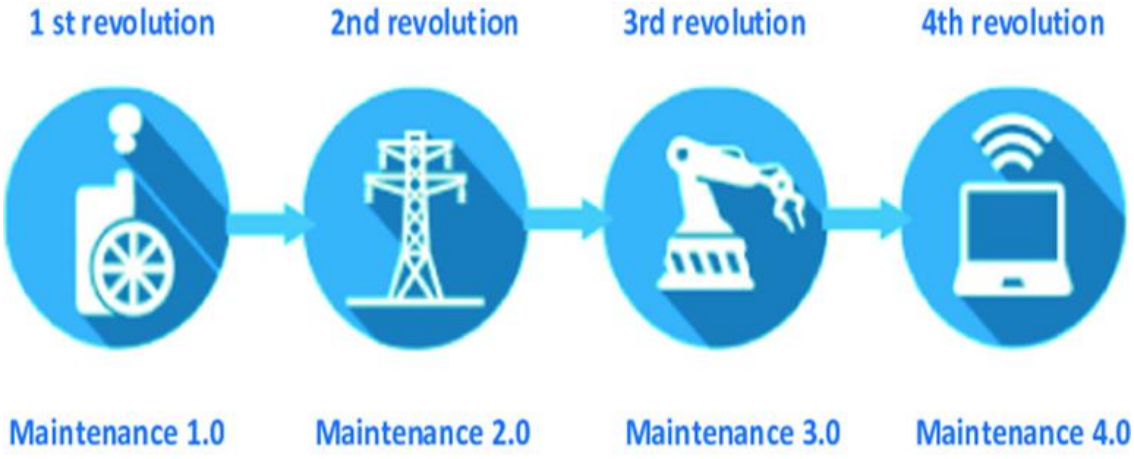


Figure I. 7: *L'évolution de la maintenance*

I.3 Intelligence artificielle

I.3.1 Historique de l'IA

L'intelligence artificielle est une notion qui a connu des changements au fil des années. On aurait commencé à en parler dans les années 1950, lorsque Alan Turing s'est interrogé sur la capacité des machines à penser. Dans cette optique, il développe un test qui permettrait de déterminer si une machine est consciente ou non.

Son test, désormais connu sous le nom de test de Turing, consiste à interagir avec deux êtres: un être humain et une machine. La personne interagit avec les deux individus à l'aveugle, ce qui signifie qu'elle ne sait pas à l'avance qui est l'individu et qui est la machine. Après la discussion, il incombe à la personne de déterminer qui elle est. Si elle fait une erreur et croit que l'ordinateur est un être humain, il passe le test. C'est le début de ce que l'on nommera la NLP. [11]

Par la suite, un an après le test de Turing, Christopher Strachey, chargé de la recherche en programmation à l'université d'Oxford, a créé le premier programme basé sur l'intelligence artificielle. Il a réussi à installer le jeu (dames) sur l'ordinateur et à l'améliorer.

Ensuite, « Anthony Oettinger » – de l'Université de Cambridge – a créé une expérience qui reproduit le processus d'achat humain dans différents magasins en utilisant un ordinateur. Cette simulation visait à évaluer la capacité d'un ordinateur à apprendre, et c'est la première expérience réussie de ce que l'on nomme « l'apprentissage automatique ».

John McCarthy a officiellement introduit le concept d'intelligence artificielle en 1956 au Dartmouth College, où il a organisé un atelier de deux mois avec des chercheurs intéressés par les réseaux de neurones artificiels. Le résultat de l'atelier n'a pas été novateur, mais il a été utile pour réunir parmi les pionniers de l'intelligence artificielle.

Après cette session d'atelier, la collaboration dans le domaine de l'intelligence artificielle a été renforcée et des centres de recherche sont impliqués. Ces centres se sont concentrés sur la création de systèmes capables de résoudre efficacement des problèmes, comme la théorie logique, le premier programme d'intelligence artificielle, ainsi que des systèmes autonomes comme le GPS.

Le StanfordVehicle, le premier véhicule à commande informatique, a été développé en 1979. En 1997, un ordinateur est devenu le premier à battre un adversaire humain à l'échec.

Les progrès de l'intelligence artificielle ont commencé au début du XXIe siècle, jusqu'à ce que les robots interactifs soient disponibles dans les commerces. En effet, il existe un robot qui manifeste différentes émotions à travers des expressions faciales, ainsi que des robots qui effectuent des tâches complexes comme le robot « Nomade » ; Il s'agit d'explorer et de rechercher des régions éloignées de l'Antarctique et de localiser des météorites dans la région. [12]

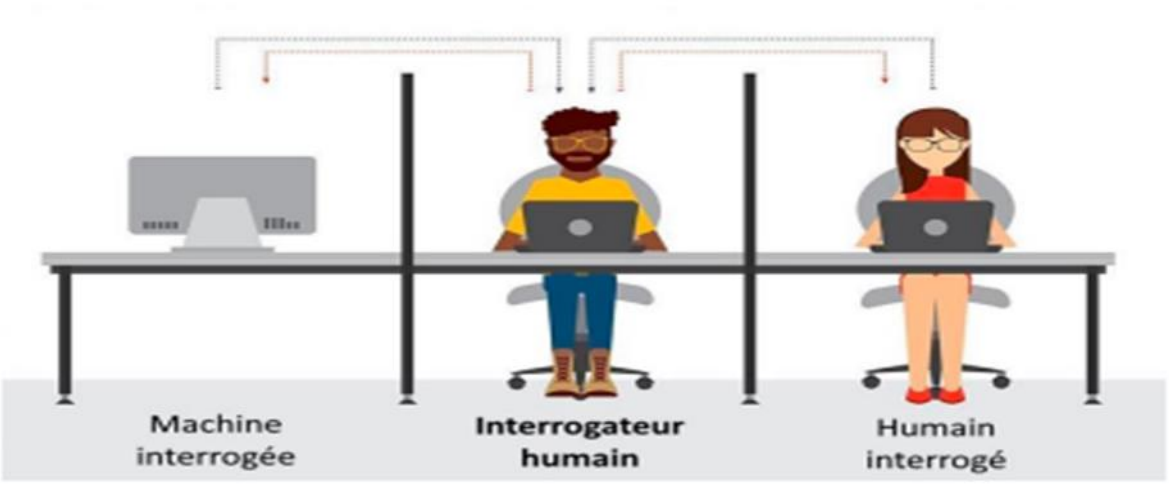


Figure I. 8: *Illustration du test de Turing [11]*

I.3.2 Définition de l'IA

Il existe différentes définitions de l'intelligence artificielle (artificial intelligence en anglais). Dans cette partie, nous exposons quelques-unes de ces définitions :

- La définition de l'intelligence artificielle serait la suivante : « l'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence ». [13]

Il s'agirait de machines ou d'ordinateurs équipés de programmes capables de réaliser des performances similaires à celles de l'intelligence humaine, voire même amplifiées par la technologie. Ces machines ont la capacité de :

- Élaborer des idées.
- Gérer de vastes volumes de données.
- Repérer des modèles invisibles à l'œil d'un être humain
- Comprendre et analyser ces modèles
- Interagir avec l'être humain
- Acquérir des connaissances progressivement
- Améliorer constamment ses performances

- Harry Shum, président exécutif de Microsoft, affirme que l'IA ne fonctionne que si elle est présente « d'une vaste quantité de data ; d'une puissance informatique extraordinaire, notamment grâce au cloud ; et des algorithmes révolutionnaires, basés sur le Deep Learning ». [14]

- Jean-Marc Alliot et Thomas Schiex, tous deux chercheurs dans ces domaines, estiment également que « l'intelligence artificielle a pour but de faire exécuter par l'ordinateur des tâches pour lesquelles l'Homme, dans un contexte donné, est aujourd'hui meilleur que la machine ». [15]

Ce terme est assez large, mais il met en évidence clairement l'objectif de faire progresser l'intelligence artificielle en la comparant à l'intelligence humaine, qu'elle doit atteindre ou dépasser.

Afin de parvenir à cet objectif, il est donc nécessaire de définir l'intelligence humaine. Elle peut être divisée en cinq parties :

- L'apprentissage.
- Le raisonnement.
- Les souvenirs.
- Les sentiments.
- La conscience.

Aujourd'hui, on peut classer les utilisations de l'IA en trois catégories principales : l'identification, la prédiction et la génération de données. Parmi ces utilisations de l'intelligence artificielle, on peut citer les concepts de Machine Learning et de Deep Learning. [13]

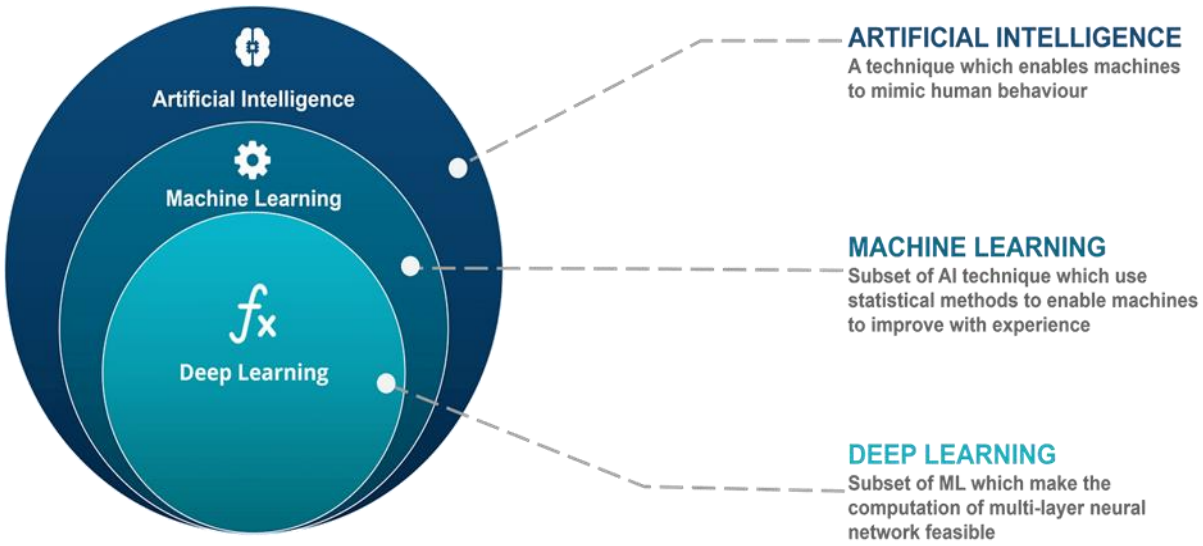


Figure I. 9: *L'intelligence artificielle vs Dee Learning vs Machine Learning*

I.3.3 Deep Learning & Machine Learning

I.3.3.1 Apprentissage automatique (Machine Learning)

L'apprentissage automatique est un domaine captivant, car il regroupe différentes disciplines comme les statistiques, l'optimisation, l'algorithmique et le traitement du signal. Il est en perpétuelle mutation. On le retrouve partout dans notre société. Malgré sa longue utilisation pour des applications comme la reconnaissance de caractères et les filtres anti-spam, il est désormais employé pour des tâches plus complexes, comme la prévention de la fraude bancaire, la recommandation de produits sur mesure, la reconnaissance faciale et la traduction automatique de textes. L'apprentissage automatique vise principalement à entraîner les ordinateurs à résoudre des problèmes en se basant sur des exemples de données ou des expériences antérieures. [16]

L'apprentissage automatique regroupe diverses méthodes d'apprentissage : l'apprentissage supervisé, non supervisé et par renforcement.

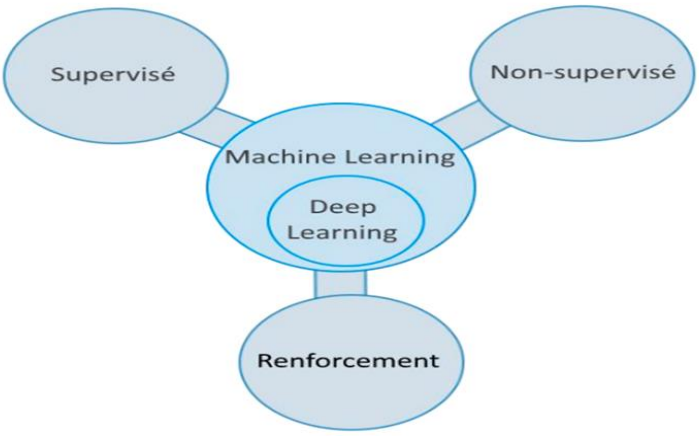


Figure I. 10: *Schéma des différents types de machine Learning [11]*

❖ *Apprentissage supervisé*

Lors de la supervision de l'apprentissage automatique, les opérateurs fournissent à l'ordinateur des exemples d'entrées et de sorties désirées. En utilisant un algorithme de classification ou d'apprentissage automatique, l'ordinateur cherche des méthodes pour classifier correctement toutes les entrées en comparant les sorties calculées aux sorties des données. Il est essentiel de trouver la règle générale qui permet de faire correspondre les entrées et les sorties.

On peut utiliser l'apprentissage automatique avec supervision afin de prédire des données futures (on parle de « modélisation prédictive »). [17]

❖ *Apprentissage non supervisé*

Pendant l'apprentissage non supervisé, la structure de l'entrée est laissée à l'algorithme (aucun label n'est donné à l'algorithme). Il est possible que cette approche soit un objectif en soi (qui permet de mettre en évidence des structures cachées dans les données) ou un moyen d'atteindre un autre objectif. On désigne également cette approche sous le nom d'«apprentissage des caractéristiques » (Features Learning). [17]

❖ *Apprentissage par renforcement*

Au cours de l'apprentissage automatique par renforcement, un logiciel interagit avec un environnement en mouvement dans lequel il doit accomplir un objectif spécifique, comme conduire un véhicule ou affronter un adversaire dans un jeu. En naviguant dans l'espace du problème, le programme-apprenti reçoit des récompenses et des punitions, ce qui lui permet d'apprendre à identifier le comportement le plus efficace dans le contexte en question. [17]

Le renforcement de l'apprentissage est une approche d'apprentissage plus récente que l'apprentissage supervisé et non supervisé, qui fait partie des études menées par DeepMind, une filiale de Google. [11]

I.3.3.2 Apprentissage profond (Deep Learning)

L'intelligence artificielle utilise l'apprentissage profond pour reproduire le fonctionnement du cerveau humain. Il s'agit d'une des manières d'utiliser l'apprentissage automatique pour identifier la fraude ou le blanchiment d'argent, traiter les données pour détecter des objets, reconnaître la parole, traduire des langues et prendre des décisions. [18]

Les systèmes d'apprentissage profond sont capables d'apprendre sans l'intervention d'un être humain, en utilisant des données à la fois non structurées et non étiquetées. [19]

I.3.3.3 Machine Learning vs Deep Learning

La principale distinction entre ces deux concepts réside dans la façon dont les données sont exposées au système (modèle).

- Les algorithmes de machine learning requièrent généralement des informations structurées, tandis que les réseaux d'apprentissage approfondi reposent sur des couches de réseaux de neurones artificiels (RNA).
- On remarque également une disparité dans l'architecture des modèles qui les constituent : on constate que les modèles DL sont plus profonds que les modèles ML.
- L'apprentissage profond ne fait appel qu'aux réseaux de neurones, tandis que pour le machine learning, les réseaux de neurones ne sont qu'une méthode de conception des modèles qui permet de nombreux autres.

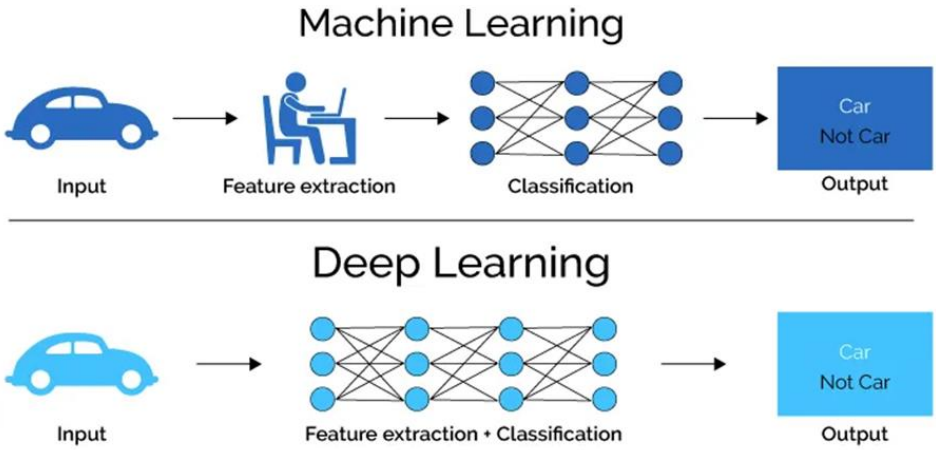


Figure I. 11: *Machine Learning vs Deep Learning [20]*

I.3.4 Les différents types d'IA

Deux catégories d'intelligence artificielle peuvent être généralement distinguées. On les appelle généralement faibles et fortes.

I.3.4.1 L'intelligence artificielle faible

La faible IA est employée pour des tâches basiques. Il s'agit d'une intelligence relativement restreinte en termes de fonctionnalités, car elle ne fonctionne qu'avec une série d'algorithmes développés par des êtres humains pour simuler une intelligence. Aucune autonomie n'est accordée au robot, car cette simulation d'intelligence est souvent soutenue par les hommes, même s'ils tentent de développer des systèmes autonomes de plus en plus complexes. [21]

I.3.4.2 L'intelligence artificielle forte

L'intelligence artificielle forte, encore une idée futuriste, repose sur l'analyse d'une situation concrète (algorithme évolutionniste, système de neurones) et vise à atteindre une véritable autonomie. Selon les chercheurs, un robot doté d'une IA forte serait capable de ressentir des émotions et de raisonner de manière similaire à celle de l'être humain, mais pour l'instant, un robot n'a jamais pu ressentir le moindre sentiment. C'est le rêve ambitieux de nombreux chercheurs d'atteindre ce stade. [21]

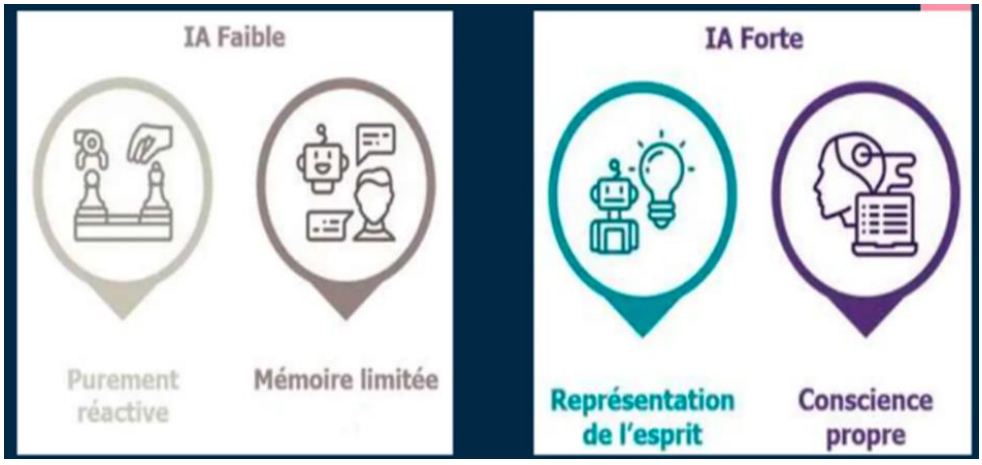


Figure I. 12: *Comparaison entre L'IA fort et L'IA faible [21]*

I.3.5 Domaines d'application de l'IA

La présence de l'intelligence artificielle dans tous les domaines est devenue essentielle pour prendre des décisions, notamment dans le domaine de l'agriculture. Par exemple, la culture des céréales, des fruits et des légumes est devenue opportune grâce à la présence de capteurs implantés dans le sol. Une méthode sophistiquée et autonome pour fournir la quantité adéquate d'eau au moment opportun. Nous évoquons également le secteur des transports ; Avec la production des voitures autonomes, il est maintenant envisageable de se passer du conducteur humain pendant un certain temps, tout en garantissant une conduite plus sécurisée et plus sécurisée.et une fluidité de circulation accrue. Par exemple, Dans le domaine des affaires, l'intelligence artificielle est également employée dans la voiture autonome de Google afin d'automatiser la relation commerciale (score des prospects, automatisation...), le service de support (chatbot, assistant virtuel...) et la gestion financière (envoi des factures, gestion automatique des impayés...). Dans le domaine de l'industrie, l'intelligence artificielle ne se limite pas à étendre les capacités des robots. Cette technologie facilite également leur programmation. Plusieurs sociétés ont mis au point des techniques utilisant l'apprentissage automatique. Afin de familiariser le robot avec sa tâche, l'utilisateur peut par exemple orienter son bras avec sa main. Une caméra et un capteur de force et de couple enregistrent ces mouvements, puis sont analysés grâce à l'intelligence artificielle. En revanche, l'utilisateur est informé du mouvement que le robot doit réaliser à l'aide d'un stylet muni d'un capteur. Lorsque l'utilisateur utilise le robot pour le soudage, par exemple, il n'a qu'à suivre le chemin de soudage sur la pièce correspondante avec le stylet. Ainsi, le logiciel crée le code de programmation du robot, ce qui en fait le contrôleur de qualité.

Prenons l'exemple du domaine médical où l'intelligence artificielle est de plus en plus employée dans des analyses. Maintenant, il peut analyser et examiner avec précision des images médicales pour repérer d'éventuelles tumeurs.

L'intelligence artificielle peut aussi servir à prédire et à améliorer le temps, en particulier en cas d'événements météorologiques violents tels qu'un orage, une tempête, une inondation, etc. En étudiant des modèles de prévision et en perfectionnant constamment leur travail, ils jouent un rôle essentiel dans la prise de décisions appropriées au moment opportun. Il est également possible que l'intelligence artificielle facilite le travail des policiers et des pompiers en cartographient les interventions et en identifiant les zones de danger, ce qui permet d'améliorer

les patrouilles et de gérer en toute sécurité les véhicules d'urgence en fonction de la circulation et des conditions météorologiques variées. [12]

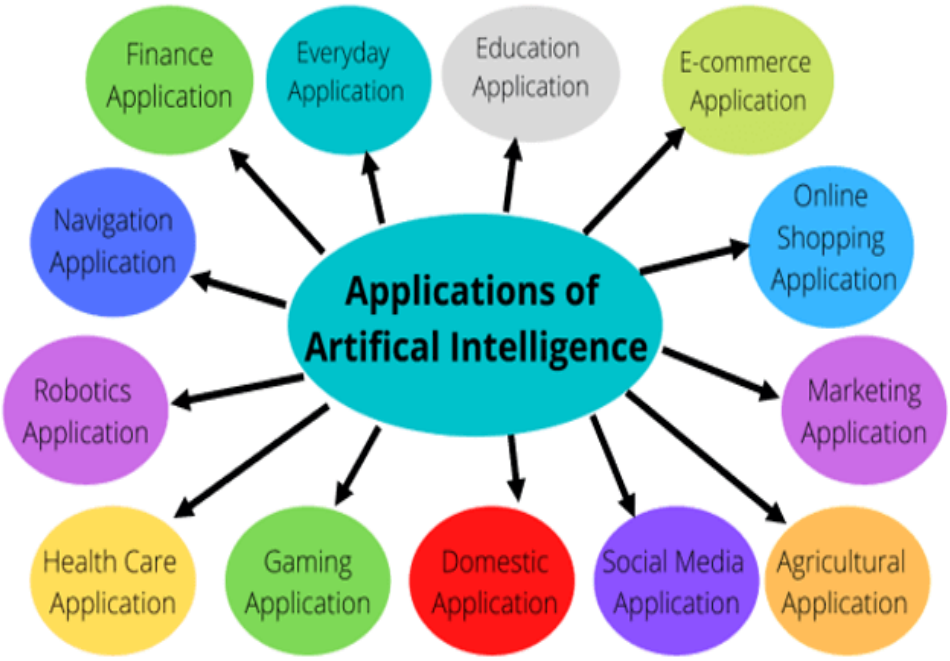


Figure I. 13: *Applications de l'intelligence artificielle*

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la fonction de maintenance sous ses diverses formes ainsi que l'intelligence artificielle. Au sein de ce projet, notre attention sera particulièrement portée sur l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance industrielle. Dans le chapitre suivant, nous exposerons comment l'intelligence artificielle peut être employée afin d'améliorer les paramètres de fonctionnement des instruments.



Maintenance industrielle & Intelligence artificielle

II.1 Introduction

La maintenance des instruments évolue constamment et l'intelligence artificielle va jouer un rôle de plus en plus crucial dans l'amélioration de la gestion des méthodes d'intervention et dans l'augmentation de l'efficacité des opérations de maintenance.

Ce chapitre examine comment l'intelligence artificielle peut être employée afin d'améliorer les paramètres de fonctionnement des équipements, de la détection des pannes à la planification des opérations, en passant par une analyse approfondie des données pour suggérer des contrôles et des interventions au moment opportun.

II.2 Intelligence Artificielle et Maintenance Industrielle

L'utilisation de l'intelligence artificielle est devenue un élément essentiel pour optimiser les performances et l'efficacité de maintenance industrielle. Les entreprises peuvent exploiter l'intelligence artificielle afin d'automatiser les tâches récurrentes, d'améliorer les procédures de maintenance et d'anticiper les pannes afin de diminuer les périodes d'arrêt et les dépenses liées à la maintenance.

Un des principaux atouts de l'IA dans le domaine de la maintenance industrielle réside dans sa capacité à analyser en temps réel les données à grande échelle. Les capteurs et les systèmes de surveillance connectés offrent la possibilité de recueillir en permanence des informations sur les machines et les équipements, et l'intelligence artificielle peut exploiter ces informations afin de repérer les éventuelles anomalies et tendances qui pourraient signaler une panne imminente. Les entreprises ont la possibilité d'exploiter cette information afin de prévoir les interventions de maintenance préventive et prédictive, ce qui permet de diminuer les périodes d'arrêt et les dépenses liées à la maintenance.

Aussi, l'intelligence artificielle pour la maintenance industrielle n'est pas une solution miraculeuse qui substituera les employés compétents. Il est toujours crucial d'avoir des employés qualifiés pour accomplir des tâches essentielles et prendre des décisions en cas de panne ou de situation imprévue. L'intelligence artificielle peut plutôt servir à accroître l'efficacité des employés en leur offrant la possibilité de se focaliser sur des tâches plus complexes et à plus grande valeur ajoutée. Il est primordial de garantir la formation des employés à l'utilisation des outils d'IA et leur compréhension de leur utilité dans leur travail quotidien.

En plus de cela, les entreprises peuvent bénéficier de divers avantages grâce à l'IA pour la maintenance industrielle, tels que la détection des pannes, l'automatisation des tâches répétitives, l'amélioration des processus de maintenance et la diminution des coûts et des temps d'arrêt. Toutefois, afin d'optimiser ces bénéfices, les entreprises doivent posséder des données de qualité, des plateformes d'IA appropriées et une équipe de professionnels qualifiés. Il est aussi crucial de garantir que l'intelligence artificielle est employée de manière stratégique afin d'atteindre les objectifs de l'entreprise et qu'elle est utilisée en complément des employés qualifiés afin d'améliorer leur productivité.

Enfin, L'IA dans le domaine de la maintenance industrielle est en perpétuelle mutation. De nouvelles applications de l'IA pour la maintenance industrielle sont en cours de développement en raison des progrès technologiques qui continuent d'améliorer les capacités des modèles d'IA et des algorithmes d'apprentissage automatique. Les sociétés qui veulent profiter de ces progrès doivent être prêtes à investir dans la recherche et le développement afin de rester à jour avec les tendances et les technologies les plus récentes. Voici quelques explications. [22]

II.2.1 L'impact de l'IA sur la maintenance

Les défaillances des équipements industriels engendrent des dépenses considérables pour les entreprises et les équipements de fabrication. Selon la Société Internationale d'Automatisation, les industriels subissent chaque année une perte de 647 milliards de dollars dans le monde en raison des interruptions. Afin de combattre cette situation, les experts en maintenance du matériel ont élaboré des stratégies et des procédures en utilisant 4 types de maintenance, comme nous l'avons appris dans le chapitre 1 : [23]

- La maintenance corrective a pour objectif d'intervenir en cas de dysfonctionnement afin de réduire les conséquences et de trouver des solutions rapides.
- La maintenance curative qui a pour objectif de réparer en profondeur ou de remplacer un équipement ou un système,
- La maintenance préventive implique de réaliser régulièrement une inspection de l'équipement.
- La maintenance prédictive repose sur l'utilisation de l'intelligence artificielle afin de prévoir les risques de pannes et d'intervenir avant même leur survenue.

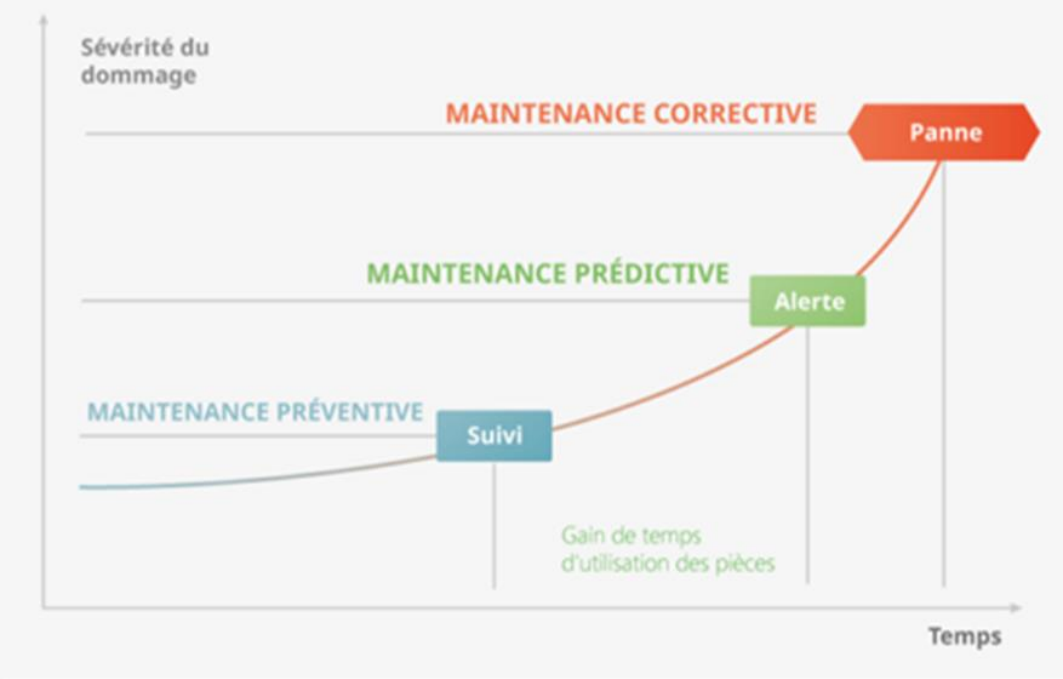


Figure II. 1: *Maintenance du corrective au prédictive.*

❖ ***Pourquoi l'IA est-elle adaptée à la maintenance prédictive ?***

La complexité de l'industrie réside dans une grande diversité de la production et une multitude de modèles récurrents. Il est essentiel d'utiliser des solutions d'intelligence artificielle afin de repérer les comportements inhabituels et diagnostiquer de nouveaux types de problèmes. Les équipes de maintenance peuvent intervenir rapidement en détectant les anomalies grâce à des solutions de maintenance prédictives. L'intelligence artificielle est un outil précieux pour les utilisateurs, permettant de gagner du temps et de l'effort sur des tâches plus importantes, comme l'entretien des machines.

Grâce à l'intelligence artificielle, toutes les informations collectées sont étudiées en temps réel pour établir des liens entre les données passées et les relevés actuels, ainsi que pour informer les techniciens en cas de difficulté. En particulier, cette approche permet d'éviter de mettre à l'arrêt une ligne de production lorsqu'elle n'est pas nécessaire et de réduire les interventions correctives et curatives coûteuses et qui perturbent l'activité.

II.2.2 L'optimisation des processus de maintenance grâce à l'IA

L'optimisation des processus grâce à l'IA Comment fonctionne-t-il ?

D'après Mathilde Lebrun… [23]

1. **Collecte de données :** Ces capteurs, qui sont de véritables yeux et oreilles de l'intelligence artificielle, collectent en permanence des informations telles que les vibrations, la température, la pression, etc.
2. **Intégration dans la GMAO :** Après avoir recueilli ces informations, elles sont envoyées à un système de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). La GMAO occupe une place centrale dans la gestion de ces données.
3. **Activation des algorithmes d'apprentissage :** Les données sont analysées en temps réel par le logiciel en utilisant l'intelligence artificielle et les algorithmes d'apprentissage automatique, afin de détecter les anomalies et les signes précurseurs de défaillances potentielles. Par exemple, une hausse anormale de la température dans un moteur peut signaler un risque de surchauffe. Cette anomalie est détectée par l'IA qui envoie une alerte via la GMAO.
4. **Action basée sur l'analyse :** L'intégration de ces informations dans le système de GMAO permet de planifier de manière proactive et automatique une intervention de maintenance avant que le problème ne se détériore. Et principalement, en utilisant les prévisions fournies (maintenance prédictive) par les algorithmes.

II.2.3 L'IA au cœur de la stratégie de maintenance

Selon [24], le fait que l'intelligence artificielle soit apparue et se développe dans le domaine industriel marque un tournant dans la stratégie de maintenance. Voici quelques détails.

II.2.3.1 Analyse en temps réel : comment l'IA transforme la surveillance ?

L'emploi de l'intelligence artificielle pour la surveillance en temps réel des équipements joue un rôle essentiel dans une maintenance plus proactive. Les technologies de l'intelligence artificielle, comme l'apprentissage automatique et l'analyse prédictive, offrent la possibilité d'analyser en temps réel des quantités considérables de données opérationnelles. Les capteurs intégrés aux machines ont la capacité de traiter et d'interpréter les données, ce qui permet d'avoir une vision claire et anticipée de l'état des équipements. Prenons l'exemple d'algorithmes d'intelligence artificielle qui peuvent repérer des anomalies subtiles dans les comportements des machines qui sont souvent préalables aux pannes. Ceci facilite la réalisation d'interventions précises bien avant que les problèmes ne deviennent critiques, ce qui diminue les risques d'arrêts imprévus et coûteux.

II.2.3.2 Personnalisation et précision : comment l'IA améliore les opérations de maintenance ?

L'intelligence artificielle ne se limite pas à améliorer la surveillance ; elle offre aussi une personnalisation et une précision élevées dans les programmes de maintenance. Le modèle d'usure de chaque machine peut varier en fonction de divers facteurs tels que son environnement opérationnel, son âge et ses conditions d'utilisation particulières. Les systèmes d'intelligence artificielle peuvent tirer des enseignements de ces spécificités et adapter les stratégies de maintenance pour chaque équipement de manière spécifique. Grâce à cette personnalisation, la maintenance devient plus efficace et les ressources sont optimisées, car les interventions sont spécifiquement adaptées aux besoins réels de chaque machine, évitant ainsi le surmenage ou l'utilisation excessive des composants essentiels.

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les stratégies de maintenance n'est plus une tendance à venir, mais une réalité opérationnelle qui bouleverse le domaine industriel, améliorant ainsi l'efficacité et la résistance des processus. En utilisant l'intelligence artificielle, les entreprises ont la capacité de prévoir les problèmes potentiels et de les résoudre de manière proactive, garantissant ainsi une continuité optimale des opérations tout en maintenant un niveau de performance élevé.

II.2.4 Applications de l'IA dans la maintenance

La maintenance industrielle est transformée par l'intelligence artificielle qui apporte des technologies novatrices telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle, la télémaintenance, les robots de maintenance, etc. Ces nouvelles technologies augmentent l'efficacité, diminuent les dépenses et renforcent la sécurité des activités. Voici quelques détails concernant ces applications.

II.2.4.1 Réalité Augmentée

La réalité augmentée fusionne des données numériques avec la réalité visuelle de l'utilisateur, offrant ainsi des données en temps réel et des instructions visuelles pour réaliser des tâches de maintenance. Comme le montre la figure II.2, voici quelques applications de RA dans la maintenance. [25]

❖ *Applications de la RA dans la maintenance industrielle :*

- **Instructions visuelles :** Les techniciens ont la possibilité de consulter directement les instructions et les schémas sur les machines, ce qui diminue les erreurs et accélère les réparations.
- **Assistance à distance :** Les spécialistes ont la capacité de fournir des conseils aux techniciens sur le terrain en temps réel, en ajoutant des annotations et des consignes sur l'équipement.
- **Formation :** La réalité augmentée peut servir à enseigner aux techniciens des procédures complexes sans nécessiter de manipuler des équipements réels.



Figure II. 2: *La RA au service de la maintenance*

II.2.4.2 Réalité Virtuelle

La réalité virtuelle immerge les utilisateurs dans un monde virtuel interactif, offrant ainsi des opportunités de formation et de simulation de scénarios complexes sans prendre de risques, Comme illustré par la figure II.3. Voici quelques applications de RV dans la maintenance. [26]

❖ *Applications de la RV dans la maintenance industrielle :*

- **Simulation de pannes :** Les techniciens ont la possibilité de se familiariser avec le diagnostic et la réparation de pannes dans un environnement virtuel, ce qui les prépare davantage à des situations réelles.
- **Formation immersive :** Les novices peuvent acquérir des compétences en matière de manipulation d'équipements complexes dans un environnement virtuel, ce qui permet de diminuer les risques d'erreurs coûteuses.

- **Planification des interventions :** Dans un environnement virtuel, les équipes ont la possibilité de prévoir et de tester les interventions de maintenance avant de les appliquer sur le terrain.



Figure II. 3: *La RV au service de la maintenance*

❖ La différence entre la RA et la RV

Les technologies immersives de la réalité augmentée (RA) et de la réalité virtuelle (RV) se distinguent principalement par leur interaction avec le monde réel. La réalité augmentée fusionne des objets virtuels avec le monde réel, offrant aux utilisateurs la possibilité de visualiser et d'interagir avec des données numériques tout en restant connectés à leur environnement physique, accessibles à l'aide d'appareils courants tels que les smartphones ou des lunettes caractéristiques. D'autre part, la réalité virtuelle immerge l'utilisateur dans un environnement totalement virtuel, évitant toute interaction directe avec le monde réel, ce qui requiert des casques spéciaux pour une immersion complète. La réalité augmentée enrichit donc la réalité existante, tandis que la réalité virtuelle en crée une tout autre. (Voir la figure III.4).



Figure II. 4: *La RA vs la RV*

II.2.4.3 Télémaintenance

Les technologies de communication à distance sont utilisées dans la télémaintenance afin de surveiller, diagnostiquer et réparer les équipements industriels sans avoir à se rendre sur le site, voici quelques exemples d'applications. [27]

❖ ***Applications de la télémaintenance :***

- **Réduction des coûts :** En utilisant la télémaintenance, il est possible de diminuer les dépenses opérationnelles en évitant les déplacements inutiles des techniciens. Grâce à elle, certaines tâches de maintenance peuvent être automatisées et la planification des interventions est améliorée.
- **Surveillance en temps réel :** Les logiciels de maintenance à distance offrent la possibilité de surveiller en continu l'état des équipements en utilisant des capteurs connectés. Cela permet de repérer les problèmes avant qu'ils ne causent des pannes, ce qui favorise une maintenance préventive.
- **Intervention à distance :** De nombreux problèmes peuvent être diagnostiqués et résolus à distance par les techniciens, ce qui permet de diminuer les temps d'arrêt des machines.
- **Personnalisation de la maintenance :** Les logiciels de télémaintenance intègrent des systèmes d'intelligence artificielle qui étudient les spécificités de chaque équipement et ajustent les stratégies de maintenance en conséquence, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources.
- **Réalité augmentée et virtuelle :** Les technologies de réalité augmentée et virtuelle sont également utilisées dans la télémaintenance pour permettre aux techniciens d'intervenir à distance de manière plus performante

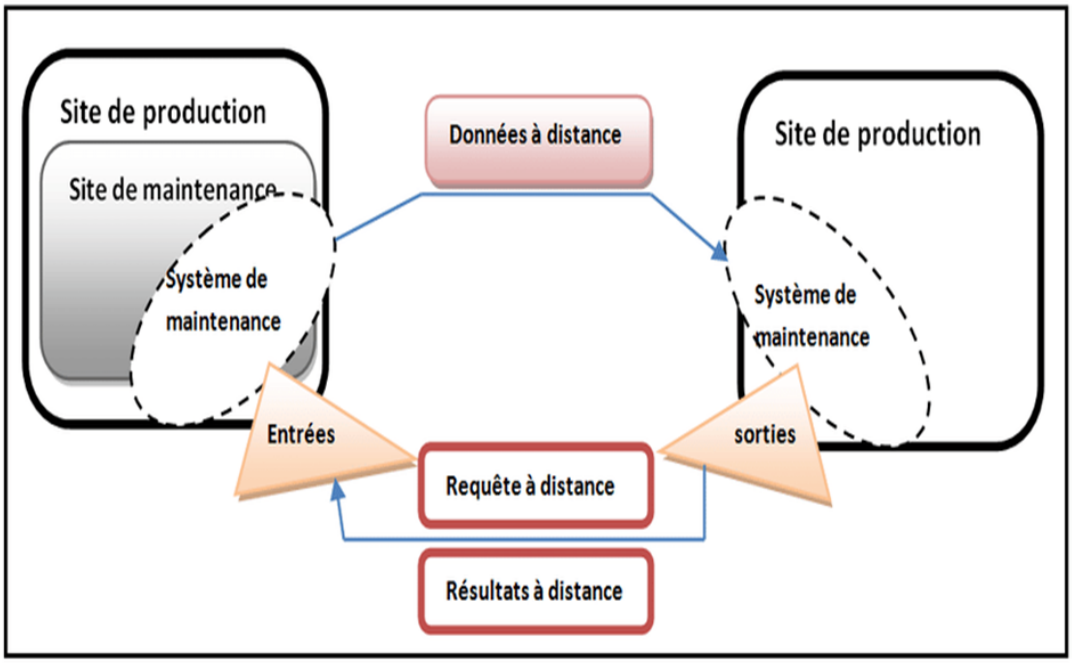


Figure II. 5: *Architecture de la Télémaintenance*

II.2.4.4 Robots de Maintenance

Les robots dotés d'intelligence artificielle ont la capacité de réaliser des tâches de maintenance dans des environnements dangereux ou difficiles d'accès, ce qui améliore la sécurité et l'efficacité, voici quelques applications [28]

❖ ***Applications des robots de maintenance :***

- **Inspection des équipements :** Les robots mobiles ont la capacité d'explorer des zones dangereuses ou difficiles d'accès afin d'examiner les équipements industriels tels que les lignes à haute tension, les éoliennes ou les plateformes pétrolières. Leur équipement comprend des capteurs thermiques, des caméras de haute résolution et des systèmes à ultrasons afin de repérer les moindres imperfections.
- **Maintenance prédictive :** Grâce à des capteurs, les robots connectés offrent une surveillance en temps réel de l'état des machines. Grâce à leur collaboration avec l'intelligence artificielle, ils ont la capacité d'anticiper les pannes et d'améliorer les maintenances préventives.
- **Intervention à distance :** Les techniciens ont la capacité de gérer des robots à distance afin de diagnostiquer et résoudre de multiples problèmes, ce qui permet de diminuer les déplacements et les temps d'arrêt.

- **Réparation et entretien :** Les bras mécaniques de certains robots leur permettent de réaliser des tâches de maintenance telles que le serrage/desserrage de boulons. Ils ont également la possibilité d'effectuer des opérations de maintenance préventive et curative du matériel.



Figure II. 6: *Robots de maintenance*

II.2.5 Avantages et limites d'IA dans la maintenance

L'emploi de l'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance industrielle présente des avantages importants, mais il comporte également certaines limites. Voici une vue d'ensemble : [29]

II.2.5.1 Avantages

- **Maintenance préventive améliorée :** Grâce à l'IA, il est possible de passer d'une approche réactive à une gestion préventive. Elle prévoit les pannes en étudiant les performances et l'état des équipements, ce qui permet de diminuer les interruptions imprévues.
- **Réduction des coûts :** L'utilisation de l'IA pour la maintenance préventive peut diminuer les dépenses de maintenance de 12 à 18 % par rapport à une approche corrective.
- **Optimisation des ressources :** L'IA facilite l'attribution des ressources en fonction des besoins réels, évitant ainsi les interventions superflues.
- **Prédiction des pannes :** Les modèles d'intelligence artificielle ont la capacité de prévoir les pannes en examinant les données passées et en repérant les signaux faibles.

II.2.5.2 Limites

- **Complexité :** La création de systèmes d'intelligence artificielle peut être ardue et requiert des compétences spécialisées.
- **Données de qualité :** La prédiction précise de l'IA repose sur des données de haute qualité. En cas d'insuffisance ou de bruit dans les données, les résultats peuvent être moins fiables.
- **Éthique et responsabilité :** L'usage de l'IA pose des interrogations éthiques, en particulier en ce qui concerne la confidentialité des données et les biais algorithmiques.

II.3 Conclusion

Ce chapitre a pour but de faire la présentation du sujet de l'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance industrielle. L'intégration de l'IA dans la maintenance présente des bénéfices importants en matière d'efficacité, de précision et de rentabilité. Grâce à cette combinaison de technologie et de compétences humaines, une nouvelle ère de maintenance est ouverte, plus intelligente et performante.

Chapitre III

Conception et développement de l'application INTMAIN

III.1 Introduction

Après avoir acquis une compréhension théorique de quelques concepts sur le rôle et l'importance de l'intelligence artificielle dans le développement de la maintenance industrielle, nous aborderons ce chapitre en présentant et en mettant en place notre projet, qui consiste en une application téléphonique qui utilise l'intelligence artificielle. Afin de sensibiliser le travailleur à effectuer une maintenance préventive des équipements pour prévenir les problèmes soudains et garantir la sécurité des équipements.

Dans ce chapitre, nous allons donc :

- Indiquer les objectifs du projet.
- Expliciter les différentes étapes de conception du prototype initial de l'application.
- Évaluer en fin de compte les résultats de ce projet en réalisant des tests.

III.2 Problématique et Solution Proposée

Lors de la maintenance, les entreprises font face à différents problèmes, qui peuvent être onéreux, longs et nécessitant des ressources, ce qui a un impact sur leur efficacité opérationnelle et leur rentabilité. La majorité des difficultés résultent de problèmes soudains et d'une augmentation des accidents, ce qui entraîne l'arrêt de la production, une dégradation de sa qualité et une perte considérable pour l'entreprise.

La mise en place de l'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance industrielle a permis de passer d'une approche traditionnelle axée sur les réparations après panne à une maintenance préventive, où la machine est constamment surveillée et les interventions sont planifiées en temps réel. Cela diminue les interruptions inattendues et optimise l'utilisation des ressources.

À travers ce projet de fin d'études, notre objectif est de présenter une application téléphonique qui constitue un moyen de communication entre l'ingénieur et la machine. Elle vise à rendre le service plus facile pour les travailleurs en leur rappelant en temps réel leurs tâches de maintenance préventive et en les orientant dans ces tâches. Ce qu'il faut faire pour garantir un cadre de travail sécurisé. Il comprend également des composants industriels associés à diverses machines, en plus de la liste de réparation…

Dès lors, les ingénieurs ont la possibilité de surveiller et de contrôler leurs équipements à travers cette application et à distance.

III.3 Outils et Technologies

III.3.1 Android studio

Android Studio est le logiciel officiel de développement intégré (IDE) du système d'exploitation Android de Google, basé sur le logiciel IntelliJ IDEA de JetBrains et spécialement conçu pour le développement Android. Il est accessible en téléchargement sur les systèmes d'exploitation Windows, macOS et Linux, ou en abonnement en 2020. Il prend le relais d'Eclipse Android Development Tools (E-ADT) en tant que principal outil de développement d'applications Android d'origine. Le 16 mai 2013, Android Studio a été présenté lors de la conférence Google I/O. Il se trouvait en phase de preview d'accès anticipé à partir de la version 0.1 en mai 2013, puis en phase bêta à partir de la version 0.8 de juin 2014.En décembre 2014, la première version stable a été sortie, à partir de la version 1.0.

Android Studio prend en charge tous les langages de programmation d'IntelliJ (et de CLion), tels que Java, C++, et plus encore, avec des extensions telles que Go. De plus, Android Studio 3.0 ou plus supporte Kotlin, ainsi que toutes les fonctionnalités du langage Java 7 et un sous-ensemble de fonctionnalités du langage Java 8, qui diffèrent en fonction de la version de la plate-forme qui est utilisée. [30]

III.3.2 Langage de programmation (Kotlin)

Kotlin est un langage de programmation "pragmatique" à typage statique, open-source, initialement développé pour la JVM (Java Virtual Machine) et Android, qui est à la fois orienté objet et fonctionnel. Il met l'accent sur la compatibilité, la sécurité, la clarté et la gestion des outils. On est également en train de produire des versions de Kotlin pour JavaScript ES5.1 et du code natif (utilisant LLVM) pour plusieurs processeurs . Selon Andrey Breslav, responsable du développement, Kotlin a été développé pour être un langage orienté objet de force industrielle, et un "meilleur langage" que Java. De plus, il est entièrement interopérable avec le code Java, ce qui permet aux entreprises de migrer progressivement de Java vers Kotlin. [31]

Le 7 mai 2019, Google a fait savoir que Kotlin est maintenant son langage de programmation favori pour les développeurs d'applications Android. Kotlin est utilisé comme une alternative au compilateur Java standard depuis la sortie d'Android Studio 3.0 en octobre 2017.

Kotlin est devenu le troisième langage entièrement supporté pour Android après l'annonce de Kotlin comme langage de développement officiel d'Android lors de la Google I/O en mai 2017.

En 2020, Kotlin demeure le langage le plus employé sur Android, avec une estimation de Google selon laquelle 70% des 1000 premières applications du Play Store sont développées en Kotlin. Google dispose lui-même de 60 applications développées en Kotlin, y compris Maps et Drive. Beaucoup d'applications Android, comme Home de Google, sont en train de migrer vers Kotlin et utilisent donc à la fois Kotlin ou Java. On considère que Kotlin sur Android présente des avantages en termes de sécurité en ce qui concerne les pointeurs nuls, ainsi que pour ses fonctionnalités qui permettent d'obtenir un code plus court et plus lisible.

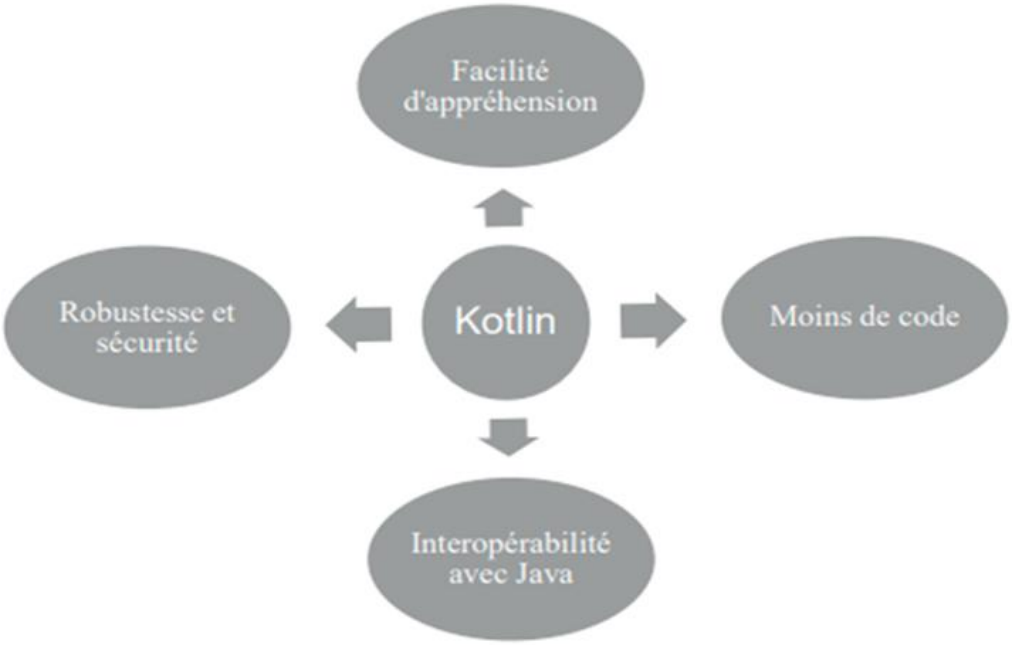


Figure III. 1: *Le contenu des avantages de Kotlin*

III.4 Schéma fonctionnel de notre application

Pour faciliter la compréhension de notre application, nous avons détaillé dans la figure III.2 son schéma fonctionnel.

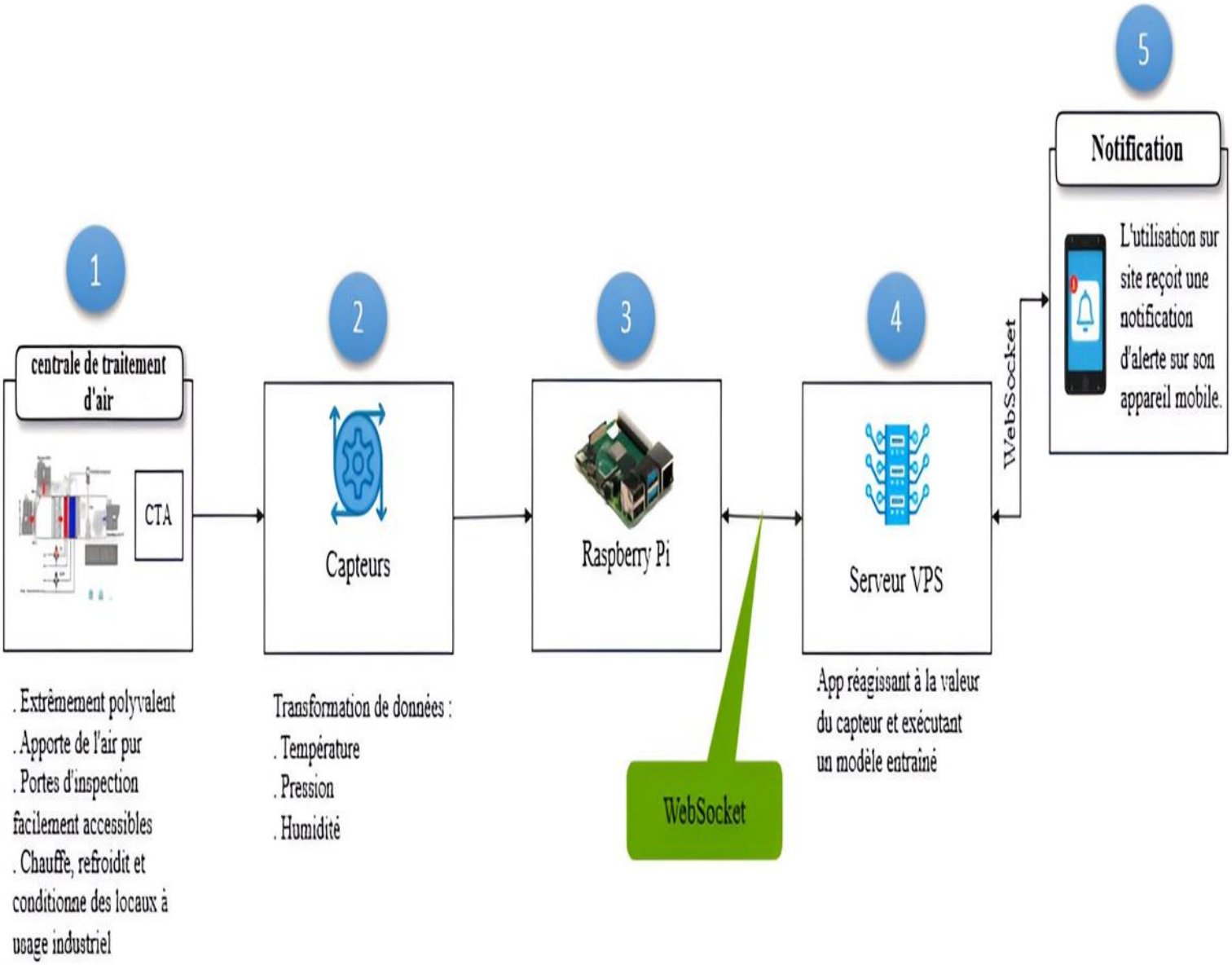


Figure III. 2: *Schéma bloc simplifié de l'application*

III.4.1 Centrale de traitement d'air

Pour réaliser notre projet fin d'études, nous avons proposé un exemple de machine centrale de traitement d'air.

Une centrale de traitement d'air (CTA) est un équipement technique essentiel dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), destiné à traiter et purifier l'air intérieur des bâtiments. Son fonctionnement repose sur l'aspiration de l'air ambiant, qui est ensuite filtré pour éliminer les impuretés et les particules nuisibles. Selon les besoins spécifiques de l'environnement, l'air peut être chauffé, refroidi, humidifié ou déshumidifié.

III.4.2 Capteurs

Nous avons proposé, pour le projet de fin d'études, nous avons choisi trois types de capteurs pour mesurer la température, la pression et l'humidité, qui ensuite envoient les données au RPI par un signal.

III.4.2.1 Capteur de pression (Pressostat)

Un pressostat est un dispositif détectant le dépassement d'une valeur prédéterminée de la pression d'un fluide.



Figure III. 3: *Pressostat*

III.4.2.2 Capteur de température (pt100)

Une sonde Pt100 est un type de capteurs de température aussi appelé RTD (détecteur de température à résistance) qui est fabriqué à partir de platine.



Figure III. 4: *Pt100*

III.4.2.3 Capteur d'humidité (psychromètre)

Instrument composé de deux thermomètres identiques, l'un dont le réservoir est sec, l'autre dont le réservoir est entouré d'une mousseline humide, et qui est destiné à mesurer l'état hygrométrique de l'air en comparant la différence de température entre les deux thermomètres.



Figure III. 5: *Psychromètre*

III.4.3 Raspberry PI (RPI) :

Le Raspberry Pi est un petit ordinateur, de la taille d'une carte de crédit, qui peut être connecté à un écran d'ordinateur ou à un téléviseur et qui utilise un clavier et une souris normaux (figure III.6). Raspberry Pi est une série de petits ordinateurs monocartes (SBC) créés au Royaume-Uni par la fondation Raspberry Pi et Broadcom . L'objectif initial du projet Raspberry Pi était de favoriser l'enseignement de l'informatique de base dans les écoles et les pays en développement.

Le RPI est désormais couramment employé dans divers secteurs, tels que la robotique et la recherche scientifique.



Figure III. 6: *Raspberry Pi 4 Model B*

III.4.3.1 Séries Et Générations

Trois séries de Raspberry Pi sont disponibles, et plusieurs générations de chacune d'entre elles ont été mises en ligne. Les SBC Raspberry Pi sont équipés d'un SoC Broadcom comprenant une unité centrale de traitement (CPU) compatible ARM intégrée et une unité de traitement graphique (GPU) sur puce.

En février 2012, la première génération (Raspberry Pi Model B) est lancée, suivie du Model A, plus facile et moins coûteux. En 2014, une carte au design amélioré a été lancée par la Fondation, le Raspberry Pi Model B+. Ces premiers modèles sont dotés de processeurs ARM11, sont de la taille d'une carte de crédit et sont le facteur de forme standard de la gamme principale. Un an plus tard, des modèles améliorés A+ et B+ ont été publiés. En avril 2014, un module de calcul a été rendu disponible pour les applications embarquées. [32]

Le Raspberry Pi 2 a été lancé en février 2015 et était équipé d'un processeur ARM Cortex-A7 quadruple coeur de 900 MHz 32 bits et d'une mémoire vive de 1 Go. Le processeur ARM Cortex-A53 quadruple coeur de 900 MHz 64bits était inclus dans la version 1.2 (le même que celui du Raspberry Pi 3 Model B, mais sous-clocké à 900 MHz).

En février 2016, le Raspberry Pi 3 Modèle B est sorti avec un processeur ARMCortex-A53 quadruple coeur 64 bits à 1,2 GHz, un Wi-Fi 802.11n intégré, le Bluetooth et des capacités de démarrage USB. Le Raspberry Pi 3 Modèle B+ a été présenté lors du Pi Day, le 14 Mars 2018, avec un processeur de 1,4 GHz plus rapide, un gigabit Ethernet trois fois plus rapide (avec un débit limité à environ 300 Mbit/s grâce à la connexion USB 2.0 interne) et un Wi-Fi 802.11ac bi-bande 2,4 / 5 GHz (100 Mbit/s). Il y a également l'alimentation par Ethernet (PoE) (avec

l'intégration du PoE HAT), le démarrage par USB et le démarrage par réseau (il n'est plus nécessaire d'avoir une carte SD).

En juin 2019, le Raspberry Pi 4 Model B a été présenté avec un processeur ARM Cortex-A72 quadruple coeur 64 bits à 1,5 GHz, un Wi-Fi 802.11ac intégré, un Bluetooth 5, un Ethernet full gigabit (débit non limité), deux ports USB 2.0, deux ports USB 3.0, 1 à 8 Go de RAM et la possibilité de connecter deux moniteurs via une paire de ports micro HDMI (HDMI Type D) pour une résolution allant jusqu'à 4K. Les prix de la version 1 Go de RAM ont été réduits et ceux de la version 2 Go ont été abandonnés. Le 8 Go est équipé d'une carte de circuit imprimé modifiée. Le Pi 4 utilise également un port USB-C pour alimenter les périphériques en aval, lorsqu'il est utilisé avec un PSU adéquat. Cependant, le Pi est limité à 5 volts et non à 9 ou 12 volts comme d'autres mini-ordinateurs de cette catégorie. [33]

III.4.3.2 Systèmes d'exploitation

Raspberry Pi OS (anciennement Raspbian), une distribution Linux basée sur Debia, ainsi que des distributions tierces Ubuntu, Windows 10 IoT Core, RISC OS, LibreELEC (distribution spécialisée de centre multimédia) et des distributions spécialisées pour le centre multimédia Kodi et la gestion de classe, sont fournies par la Fondation Raspberry Pi [57]. Elle favorise l'utilisation de Python et Scratch comme langages de programmation principaux, tout en offrant un support pour de nombreux autres langages [58]. Le micrologiciel standard (firmware) est fermé, mais il existe une source ouverte non officielle. Il existe également de nombreux autres systèmes d'exploitation qui peuvent être utilisés sur le Raspberry Pi [34].

Alors, Une fois que les données des capteurs parviennent au RPI proposé dans ce projet, le RPI envoie les données à serveur VPS proposé par le protocole websocket.

III.4.4 Protocole WebSocket

WebSocket est un protocole de communication qui permet de gérer les échanges entre les clients et les serveurs, D'après [35] Voici quelques explications.

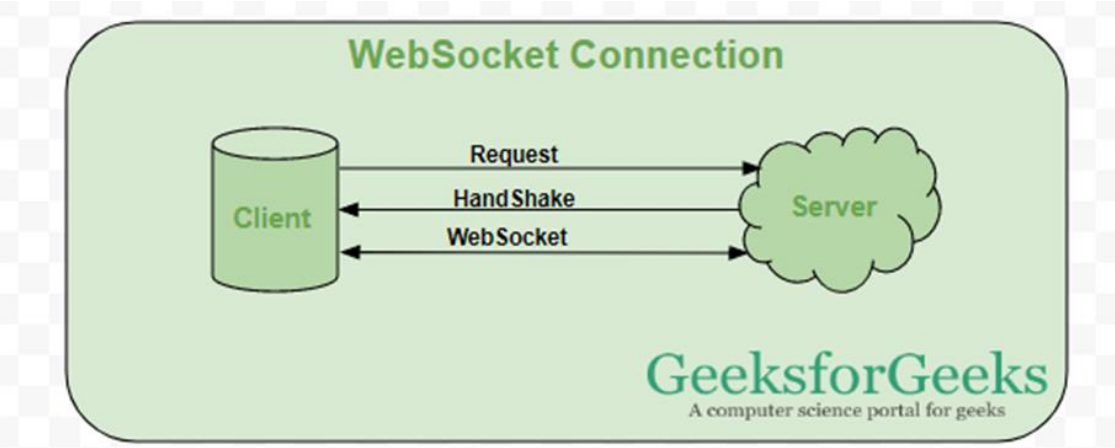


Figure III. 7: *Connexion WebSocket*

WebSocket est un protocole full duplex bidirectionnel qui est employé dans le même contexte de communication entre un client et un serveur, WebSocket est un protocole à état, c'est-à-dire que la connexion entre le client et le serveur demeure active jusqu'à ce que l'une des parties (client ou serveur) y met fin.

Les WebSockets sont employés dans les logiciels de jeu car ils permettent de recevoir constamment le serveur et de ne pas avoir besoin de rafraîchir l'interface utilisateur (UI). Les applications de chat les utilisent également fréquemment pour créer une connexion unique pour échanger, publier et diffuser des messages entre les utilisateurs. La connexion webSocket qu'ils utilisent est identique pour envoyer et recevoir des messages entre eux.

Plus précisément, les WebSockets sont employés dans le cadre des applications web en temps réel. Ce protocole permet de présenter des données en flux continu au niveau du client grâce à un serveur backend.

Dans cette étude, nous utilisons les WebSockets pour transmettre les données entre les différentes parties de l'application (entre le Raspberry Pi et le VPS puis entre VPS et l'application Android), ainsi que pour rafraîchir automatiquement l'interface utilisateur sans nécessiter de nouvelle connexion avec le serveur backend.

III.4.5 Serveur VPS et Modèle IA

Pour le projet fin d'études nous avons proposé le serveur VPS

III.4.5.1 Qu'est-ce qu'un VPS ?

Un serveur privé virtuel (VPS) est une machine qui héberge tous les logiciels et les données nécessaires au fonctionnement d'une application ou d'un site web. La dénomination virtuelle

tient au fait qu'il ne consomme qu'une partie des ressources physiques sous-jacentes du serveur, qui sont gérées par un fournisseur tiers. Cependant, vous avez accès à vos ressources dédiées sur ce matériel.

Ce serveur contient un modèle d'intelligence artificielle.

III.4.5.2 Modèle IA

Un exemple de machine CTA a été étudié pour appliquer un modèle d'intelligence artificielle. Nous avons opté pour l'utilisation exclusivement de l'algorithme K-means pour intégrer l'intelligence artificielle dans la maintenance préventive.

✓ *Définition et fonctionnement de K-means*

K-means, également connu sous le nom de K-moyennes, est un algorithme de clustering non supervisé largement utilisé en machine learning. Son objectif principal est de regrouper des données similaires en clusters, permettant ainsi d'analyser et de simplifier des ensembles de données complexes.

L'algorithme K-means fonctionne en suivant un processus itératif qui cherche à minimiser la distance entre chaque point de données et le centroïde de son cluster respectif. Voici les étapes clés de son fonctionnement :

- Initialisation : Choisir aléatoirement K points à partir de l'ensemble de données comme centroïdes initiaux.
- Affectation : Pour chaque point de données, déterminer le centroïde le plus proche et l'affecter à ce cluster.
- Mise à jour : Recalculer les centroïdes en prenant la moyenne des points qui ont été affectés à chaque cluster.
- Répétition : Répéter les étapes d'affectation et de mise à jour jusqu'à ce que les centroïdes ne changent plus significativement, indiquant que l'algorithme a convergé.

✓ *Algorithme k-means*

Entrée

Ensemble de N données, notés par x ;

Nombre de groupes souhaiter, noté par k ;

Sortie

Une partition de K groupes {**C1** ,**C2** ,...**Ck** }

Début

1) $\begin{cases} C_1 = x_1; \\ C_2 = x_2; \end{cases}$

avec $d(x_1, x_2) = max_{i,j \in \{1,\dots,N\}} \left(d(x_i - x_j)\right)$; $i \neq j$

Répéter

2) Initialiser les centres i-1 par le résultat de l'étape précédente ;

3) Trouver l'$i^{ème}$ centre C_i :

$$C_i = x; \quad x = max_{i \in [1,N]}(d^i_{k-1})$$

4) Appliquer le k-means jusqu'à la convergence ;

Jusqu'à obtenir une partition en k groupes ;

Fin.

✓ *Exemple d'application de l'algorithme k-means sur CTA*

Dans cette partie nous présentons une proposition d'application du modèle intelligent sur une centrale de traitement d'air prise comme exemple d'application. Nous précisons que cette partie n'a pas été implémentée dans la partie software développé.

Nous avons opté pour 3 paramètres essentiels de la centrale de traitement d'air, à savoir la température, la pression et l'humidité. Le K-means a été appliqué sur des données fictives.

Voici les matrices d'apprentissage de la classe normal et panne.

- On a choisi 5 valeurs de pression, température et humidité pour un système de traitement d'air en bon état fonctionnement (Normal):

P1= 6bar	T1=10,23 °C	H1=40%
P2=8,25bar	T2=12 °C	H2=63,02%
P3=6,73bar	T3=14,88 °C	H3=52%
P4=7bar	T4=15,31 °C	H4=65%
P5=9,11bar	T5=11,01 °C	H5=43,11%

Voici la matrice d'apprentissage normal généré par l'algorithme k-means (par souci d'explication, nous avons défini des valeurs inconnues) :

$$DN = \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 6 & 8,25 & 6,73 & 7 & 9,11 \\ 10,23 & 12 & 14,88 & 15,31 & 11,01 \\ 40 & 63 & 52 & 65 & 43,11 \end{pmatrix}$$

- Et aussi on a choisi 5 valeurs de pression, température et humidité pour un système de traitement en panne :

P1= 3,87bar	T1=25,25 °C	H1=30%
P2=1,11bar	T2=36,71 °C	H2=19,97
P3=5,02bar	T3=50,63°C	H3=70,22%
P4=2,98bar	T4=43,07 °C	H4=20%
P5=4,76bar	T5=0 °C	H5=90,19%

Voici la matrice d'apprentissage panne généré par l'algorithme k-means (par souci d'explication, nous avons défini des valeurs inconnues) :

$$\begin{pmatrix} 3,87 & 1,11 & 5,02 & 2,98 & 4,76 \\ 25,25 & 36,71 & 50,63 & 43,07 & 0 \\ 30 & 19,97 & 70,22 & 20 & 90,19 \end{pmatrix}$$

$$DP= \begin{pmatrix} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \end{pmatrix}$$

- Nous considérons maintenant que RPI a transmis les valeurs suivantes au VPS (valeurs de CTA) :P=4,8bar, T=45°C et H=30%.

$$DH=\begin{pmatrix}4,8\\45\\30\end{pmatrix}$$

- Le modèle IA calcule la distance entre DH et DN puis entre DH et DP par la loi suivante :

$$DN=\sqrt{(4,8-X1)^{\wedge 2}+(45-X2)\wedge 2+(30-X3)\wedge 2}$$

$$DP=\sqrt{(4,8-Y2)^2+(45-Y2)^2+(30-Y3)\wedge 2}$$

En conséquence, nous concluons que si la distance entre DN et DH est très proche, cela indique que le CTA est en bon état, et le VPS envoie un message à l'application lorsqu'il utilise un protocole webSocket pour indiquer que la machine est en bon état, mais si la valeur est comprise entre DP et DH. Très proches l'une de l'autre, cela indique que la machine sera prochainement confrontée à un problème, car un message est envoyé à l'application précisant que la machine sera prochainement confrontée à un problème. Si la distance entre DP et DH est nulle, cela indique un dysfonctionnement. (Voir la figure III.8 pour un exemple dans notre l'application).



Figure III. 8: *Exemple de Notification*

III.5 Conception du prototype

Cette section correspond à la partie interactive du projet, c'est une application Android développée avec Kotlin.

III.5.1 Appellation et Logo

Nous avons nommé notre application, comme le montre la figure III.9 « INTMAIN», pour mettre l'accent sur une maintenance régulière et en temps réel.

Figure III. 9: Le logo de notre application INTMAIN

III.5.2 Interface d'application

Comme le montre la figure III.10, lorsque vous entrez dans l'application INTMAIN, celle-ci apparaît avec nous dans l'interface :

- Une section pour les activités récentes.
- Une section pour les réglages.
- Icônes en haut à droite de l'écran (Recherche, Notification, Option et Liste secondaire).

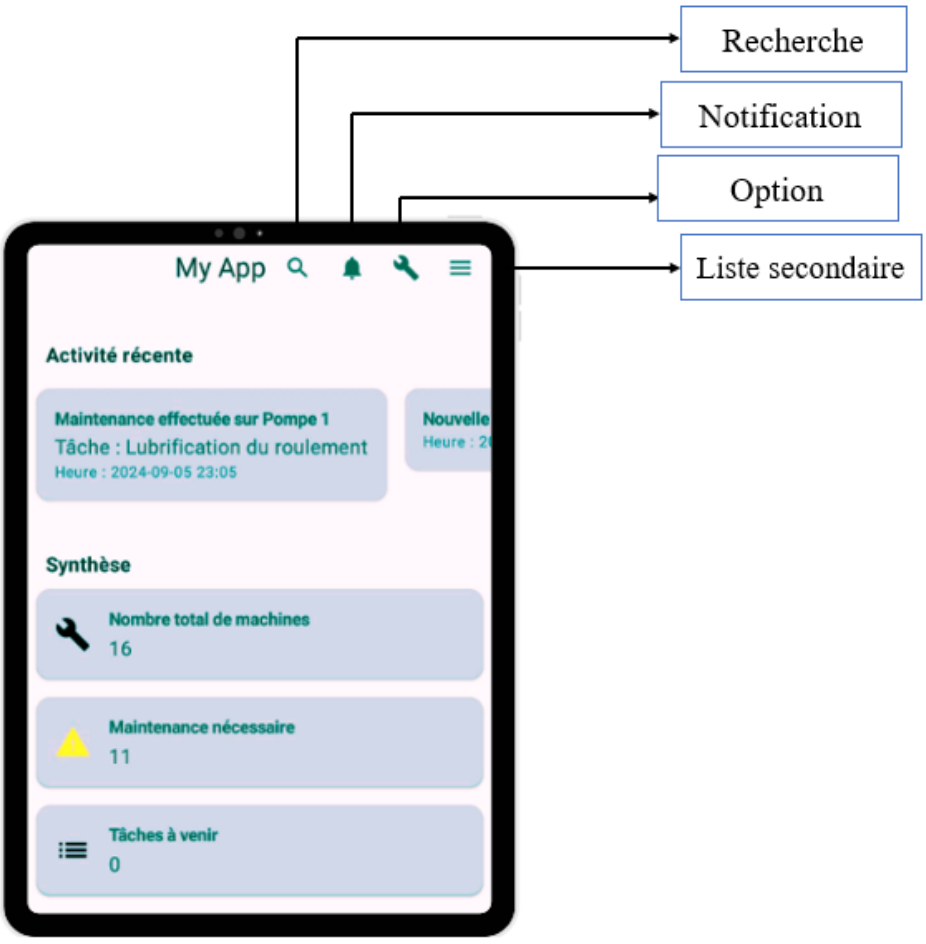


Figure III. 10: L'interface de l'application de INTMAIN

III.5.2.1 Section des activités récentes

Elle nous montre le dernier travail effectué sur une machine spécifique avec le type (remplacer un élément, ajouter un élément, ou vérifier …) et l'heure de sa maintenance.

III.5.2.2 Synthèse

Cette section indique le nombre total de machines disponibles dans l'usine, le nombre de machines qui nécessitent une maintenance ainsi que le nombre de tâches futures à effectuer par le travailleur.

III.5.2.3 Icônes en haut à droite de l'écran

1. ***Icône de recherche***

Cette fonction est le moyen le plus simple d'accéder à n'importe quelle machine qu'un travailleur souhaite rechercher. Voir figure III.11



Figure III. 11: *Icône de recherche*

2. *Icône Notifications*

Une icône qui permet d'accéder à l'historique des notifications reçues précédemment (notifications à l'utilisateur d'effectuer certaines tâches de maintenance de la machine).

3. *Icône des options*

Une icône extrêmement importante et essentielle, qui renferme à son tour deux icônes, comme illustré dans la figure III.12.

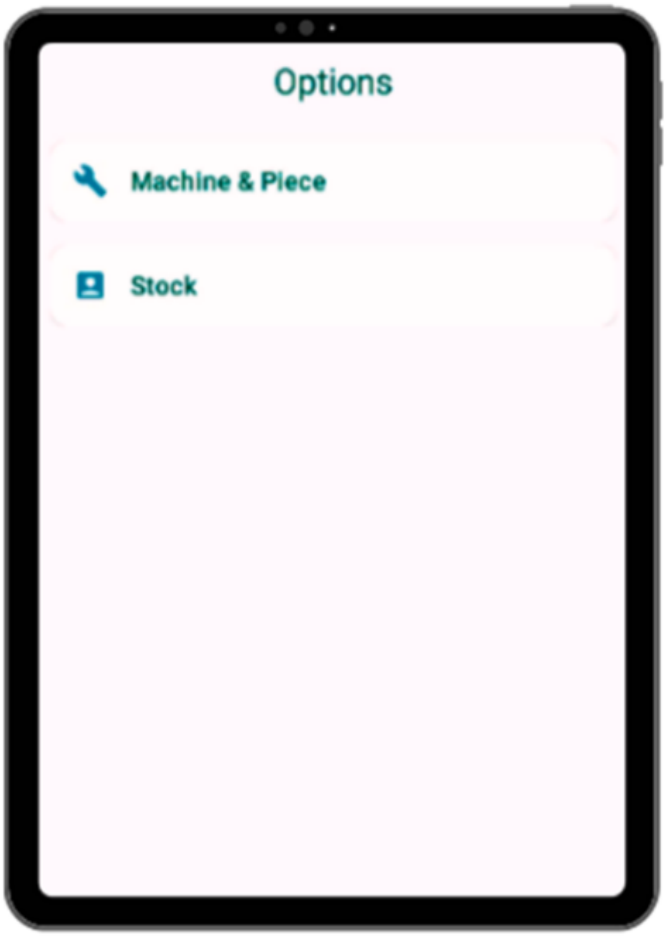


Figure III. 12: *Icône des options*

3.1 Icône des machines et pièces

Lorsque vous cliquez sur cette icône, toutes les machines apparaissent (voir figure III.13), lorsque vous cliquez sur une machine spécifique, elle nous montre : (voir figure III.14)

- Informations générales : Identifier cette machine en mettant le nom total, l'heure de la dernière maintenance de cette machine.

- Les indicateurs de maintenance :

- Le MTTR (Temps moyen de réparation) est le temps moyen nécessaire pour reprendre l'activité après une panne de machine à partir du moment où vous êtes informé de la panne. Il est calculé en additionnant tous les temps d'arrêt sur une période donnée et en divisant par le nombre d'incidents.
- Le MTBF (Temps moyen entre pannes) est la moyenne arithmétique du temps de fonctionnement entre les pannes de machines réparables. Elle est calculée en divisant le temps de fonctionnement total de la machine par le nombre de pannes survenues.

- Historique des réparations : L'historique de la maintenance d'une machine avec une mention de la maintenance qui lui a été apportée (remplacement d'un élément ou ajout d'un élément …).



Figure III. 13: *Icône Machines& Pièces*



Figure III. 14: *Informations sur machine*

3.2 Icône de stock

Comme le montre la figure III.34, il y a une section spéciale qui contient des informations utiles pour le travailleur sur les pièces :

- Nom de la pièce.
- Code d'identification de l'entrepôt.
- Le nom détaillé (complet) de la pièce.
- Le nom de l'entreprise qui vend le même type de pièce.
- Nombre de pièces disponibles dans le stock.

Remarque : Lorsque le nombre de pièces est faible, une couleur rouge apparaît (recommandation requis).



Figure III. 15: *Icône de stock*

III.5.2.4 Icône de liste secondaire

Comme illustré dans la figure III.16, lorsque l'on appuie sur cette icône, on découvrira trois icônes :

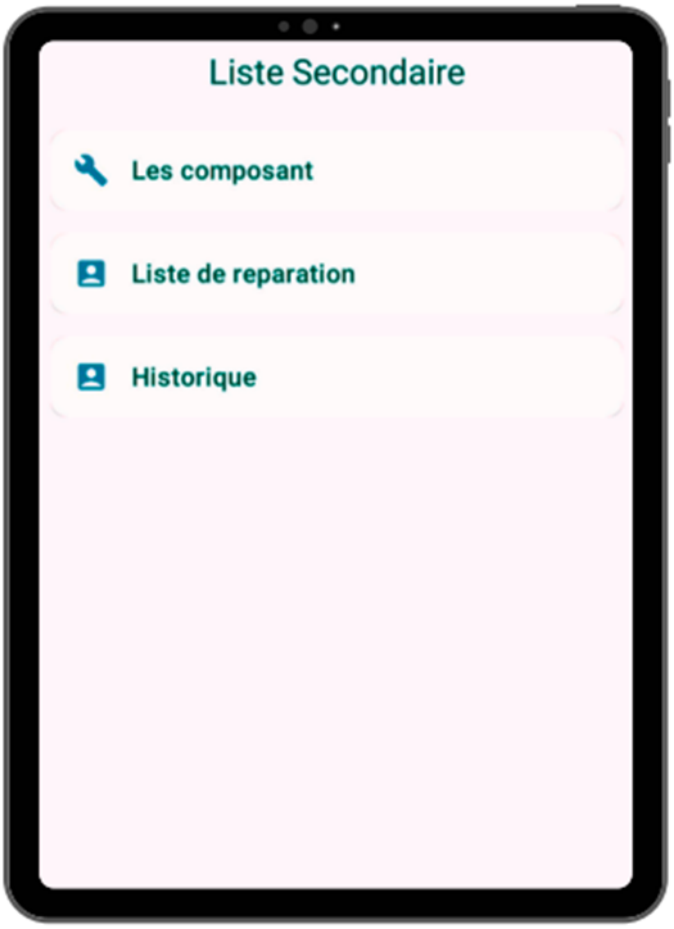


Figure III. 16: *Icône de liste secondaire*

1. Icône des composants

Cette section indique les noms de tous les composants d'une machine particulière, afin de faciliter l'étude de la machine et d'en faciliter la maintenance. (Voir la figure III.17)



Figure III. 17: *Composants des Machines*

2. Icône de Liste de réparation

Comme on le voit dans la figure III.18

- Affiche le nom de la machine concernée par la réparation
- Type de tâche (maintenance effectuée sur cette machine)
- Le nom de la personne responsable de la maintenance de la machine
- Le statut de la tâche (la case apparaît en vert lorsque la tâche est terminée, tandis qu'elle apparaît en rouge avec la phrase « tâche est en attente » au cas où la tâche ne serait pas terminée).



Figure III. 18: *Icône de Liste de réparation*

3. Icône de l'historique

Indique le nom de la machine, l'heure à laquelle elle a été entretenue, la tâche effectuée et la personne responsable de la maintenance de la machine. (Voir figure III.19)



Figure III. 19: *Icône de l'historique*

III.6 Analyse du questionneur

Afin de donner plus d'importance à l'opinion des travailleurs et de montrer l'ampleur de l'opportunité de mener à bien ce projet, nous avons élaboré un questionnaire qui inclut le contenu de l'application, où les travailleurs et les propriétaires du domaine (étudiants universitaires) expriment leur opinion en votant et en répondant aux différentes questions que nous avons posées.

Dans les trois premières questions, nous avons mis le vote pour identifier la catégorie (âge, sexe, étudiant ou travailleur) qui prédomine dans le vote pour prendre en compte cela et clarifier la différence entre les opinions, et les résultats ont été les suivants :

75% des votants ont entre 18 et 30 ans et 25% ont entre 30 et 45 ans, tandis que les plus de 45 ans sont absents du vote. Le sexe masculin prédomine dans le vote avec 62,5% tandis que le

reste est féminin (37,5%), tandis qu'en termes d'état civil, 56,2% des électeurs sont des travailleurs et les 43,8% restants sont des étudiants universitaires.

Nous avons posé aussi une question générale pour savoir combien de personnes soutiennent les applications qui utilisent l'intelligence artificielle et les technologies avancées, et la réponse a été 93,8 % de oui, tandis que le reste du pourcentage n'est pas en faveur de ces applications.

Une question essentielle a été posée en particulier pour les travailleurs et les personnes expérimentées, car le domaine est également ouvert aux étudiants, la question (rencontrez-vous des problèmes lors de l'entretien des appareils ?) Le pourcentage de vote était de 75 % pour dire qu'il y a des problèmes lors de l'entretien des appareils, tandis que 25 % pensent que les choses sont normales et sous contrôle, la réponse était 93,8 % de oui, tandis que le reste n'est pas en faveur de ces applications.

Nous avons finalement atteint la partie qui nous intéresse le plus dans les avis, qui est la présentation de l'idée de notre application et de ses nombreux avantages, où nous avons mis le vote pour voir à quel point les travailleurs sont désireux et enthousiastes pour l'idée du projet, le pourcentage a été élevé et encourageant pour nous de continuer à travailler pour fournir notre meilleur et bénéficier à la communauté en général et à nous en particulier, le pourcentage de vote a été de 93,8% en faveur de l'idée du projet, de ses objectifs et de son importance, tandis qu'un petit pourcentage a vu le contraire.

D'une manière générale, nous remercions tous ceux qui ont voté et nous ont consacré un peu de leur temps. Les opinions diffèrent et nous devons respecter et apprécier tous les segments de la société, en particulier ceux qui ont voté.

III.7 Conclusion

Dans notre projet de fin d'études, nous avons essayé de concevoir une application pour aider les ingénieurs à résoudre les dysfonctionnements courants auxquels ils sont confrontés quotidiennement sur le terrain. Nous avons présenté les techniques, l'équipement, les outils et leurs caractéristiques nécessaires à la construction de cette application, et nous avons mentionné la conception et le prototype.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

La maintenance industrielle est essentielle pour garantir la fiabilité et les performances des instruments de production. Elle contribue à diminuer les périodes d'arrêt coûteuses, à améliorer la productivité et à assurer la sécurité des employés. En investissant dans des programmes de maintenance préventive et prédictive, les sociétés ont la possibilité de prolonger la durée de vie de leurs actifs, réduire les dépenses liées aux réparations et maintenir une qualité de production élevée, ce qui renforce leur compétitivité à long terme sur le marché.

La technologie de l'intelligence artificielle a bouleversé le domaine de la maintenance industrielle en offrant des analyses prédictives qui permettent d'anticiper les pannes avant qu'elles ne surviennent. L'intelligence artificielle améliore les programmes de maintenance en utilisant l'apprentissage automatique et l'analyse des données, ce qui permet de diminuer les temps d'arrêt et les dépenses liées. L'intégration de l'IA permet aux entreprises d'améliorer non seulement leur efficacité opérationnelle, mais également la sécurité et la durabilité de leurs opérations industrielles.

Pour cela, nous avons divisé notre mémoire en trois chapitres : Le premier chapitre se concentre sur la définition des concepts fondamentaux de la maintenance, les différentes catégories de maintenance, ainsi qu'une vue d'ensemble de l'intelligence artificielle, incluant ses fondements et ses applications.

Le deuxième chapitre expose les avantages de l'intelligence artificielle pour le développement et l'amélioration de la maintenance industrielle, ainsi que les applications et techniques les plus significatives de cette technologie dans ce domaine.

Le plan de construction de notre application est présenté dans le troisième chapitre. Celui-ci aborde en profondeur tous les aspects de notre projet, examine les différents mécanismes de ses parties et fournit une explication détaillée du contenu et du fonctionnement de l'application.

INTMAIN a pour objectif de simplifier le service aux ingénieurs en leur rappelant leurs tâches de maintenance en leur envoyant un message sur un téléphone portable. Elle renferme aussi de nombreux renseignements concernant les équipements nécessaires à l'ingénieur et répond le plus rapidement possible.

Perspective

Bien entendu, notre projet n'a pas encore été achevé en raison de contraintes de temps, car il s'agissait de deux projets combinés en un seul. Le premier projet avait pour objectif de créer une application et de collecter les données qui y sont liées, tandis que le deuxième projet impliquait l'intégration d'un modèle d'intelligence artificielle pour la maintenance préventive.

Concernant le modèle, il existe de nombreux algorithmes, tels que les algorithmes de deep learning, qui sont des réseaux neuronaux inspirés du fonctionnement du cerveau humain.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Dr. Djamel Frihi, Maintenance industrielle, Université du 8 mai 1945 – Guelma.

[2] AFNOR, NF X60-010 : Maintenance. Vocabulaire de maintenance et de gestion des biens durables, Norme Afnor,1984.

[3] AFNOR, NF-EN-13306-X-60-319 : Terminologie de la maintenance., Norme, Association Française de Normalisation, 2001.

[4] Llaurens Jérémy, Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique, université joseph Fourier, 2011.

[5] Driss Bouami, Le grand livre de maintenance, Afnor 2019, ISBN 978-2-12-465682-0.

[6] Jean Marie, Maintenance industrielle : de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté, 2004, ISBN 2-7298-2011-6.

[7] Jérémy Llaurens. Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique. Sciences pharmaceutiques. 2011.ffdumas-01059490ff (fonction de maintenance+ objectif) + Kaffel, Hédi. 2001. La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre. Thèse de Doctorat. Québec : Université de Laval, Octobre 2001.

[8] Kechroud Farid,Optimisation de la maintenance par la fiabilité et la disponibilité des équipements, université Larbi tebessi- Tébessa 2020.

[9] Raymond Labrecque et Nora Desrochers, Organisation de la maintenance de la machinerie de production dans l'industrie manufacturière, 1999, ISBN 2-550-337328.

[10] Mobility Work, "Histoire de la maintenance dans l'industrie". https://mobility-work.com/fr/blog/histoire-maintenance-dans-industrie/.

[11] Léa Marmande, Le machine Learning dans le cadre de l'innovation technologique, Conservatoire national des arts et metiers centre régional associe de Mulhouse, le 28 septembre 2020.

[12] Rached Mona Bouchra et Choual Maroua, Techniques d'intelligence artificielle dans l'analyse d'imageries médicales à l'aide de python, Université d'Oran-2- Mohamed Ben-Ahmed, 2022.

[13] Mezili Houcine, Vers une amélioration de la détection d'intrusion par les méthodes de sélection des fonctionnalités à l'aide des arbres de décision, Université Ibn Khaldoun – Tiaret 2021.

[14] Microsoft Experiences, "Comprendre et utiliser l'intelligence artificielle". https://experiences.microsoft.fr/articles/intelligence-artificielle/comprendre-utiliser-intelligence-artificielle/, 30 juillet 2017.

[15] Alliot Jean-Marc et Schiex Thomas. Intelligence artificielle et informatique théorique, édition Cépaduès, 1994, 520 p. (Collection Intelligence Artificielle (Toulouse), ISSN 1151-6119).

[16] K. Kasambya Moïse, H. Nsenge, et V. Baraka, Déploiement mobile d'un réseau de neurones profond pour l'identification des étudiants de l'UAC/ISDA en salle d'examens, International Journal of Innovation and Applied Studies ,vol. 39, p. 136-155, mars 2023.

[17] Matcha wyao, Identification des composants prioritaires pour les tests unitaires dans les systèmes oo : une approche basée sur l'apprentissage profond, Université du Québec à Trois-Rivières, avril 2020.

[18] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., and Bengio, Y. (2016). Deep Learning, volume 1. MIT press Cambridge.

[19] Mohamed Abd Elmoumen Djaballah, Système de prédiction de la consommation d'énergie basé Deep Learning, Université de 8 Mai 1945 - Guelma -Septembre 2021.

[20] Senani Samy, Réseaux de neurones convolutionnels pour la détection précoce de la rétinopathie diabètique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, juillet 2019.

[21] Hammache Arezki, Recherche d"information : un modele de langue combinantmots simples et mot composés, these de doctorat en informatique, Université Mou-loud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.

[22] Maintenancia, "Télémaintenance industrielle : un levier de performance". https://www.ibitek-group.com/2022/04/14/telemaintenance-industrielle-levier-de-performance/, 23 janvier 2023.

[23] Mathilde Lebrun, "Comment l'IA peut optimiser les processus". https://blog.aqmanager.com/comment-l-ia-peut-optimiser-les-processus, 30 janvier 2024.

[24] Au cœur de l'innovation : l'IA redéfinit la maintenance préventive. https://www.gmao.com/types-de-maintenance/ia-et-maintenance-preventive/.

[25] Nicolas Malatray, "Expert RA/RM chez Spectral TMS, La Réalité Augmentée au service de la maintenance préventive", https://www.spectraltms.com/blog/la-realite-augmentee-au-service-de-la-maintenance-preventive, le 1 septembre 2020.

[26] Freina Laura et Michela Ott. "A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education : State of the Art and Perspectives". eLearning and Software for Education (eLSE), avril 2015.

[27] IBITEK Group, "Télémaintenance industrielle : un levier de performance". https://www.ibitek-group.com/2022/04/14/telemaintenance-industrielle-levier-de-performance/.

[28] Xavier Biseul, Praxedo, "Les robots au service de la maintenance". https://www.praxedo.fr/notre-blog-specialise/les-robots-au-service-de-la-maintenance/, 17 juin 2020.

[29] GMAO, "Au cœur de l'innovation : l'IA redéfinit la maintenance préventive". https://www.gmao.com/types-de-maintenance/ia-et-maintenance-preventive/.

[30] Developer.android.com, " Use Java 8 language features and APIs". https://developer.android.com/studio/write/java8-support, 25 Octobre 2017.

[31] Andrey Breslav, "JVM Languages Report: Extended Interview With Kotlin Creator Andrey Breslav" jrebel.com, https://www.jrebel.com/blog/interview-with-kotlin-creator-andrey-breslav, le 22 Avril 2013.

[32] Raspberry Pi "Series and Generations". https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi

[33] Upton Eban, " Raspberry Pi 4 on sale now from $35", Raspberry Pi Blog, Raspberrypi.com, https://www.raspberrypi.com/news/raspberry-pi-4-on-sale-now-from-35/, 24 Juin 2019.

[34] "christinaa/rpi-open-firmware: Open source VPU side bootloader for Raspberry Pi", GitHub.com, https://github.com/christinaa/rpi-open-firmware, 4 Février 2019.

[35] geeksforgeeks.org, "What is web socket and how it is different from the HTTP? " https://www.geeksforgeeks.org/what-is-web-socket-and-how-it-is-different-from-the-http/, 21 février 2022.