



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 : Maintenance en Instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme Master

**Filière : Génie Industriel**

**Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation**

## **Thème**

# **La digitalisation de la maintenance industrielle**

Présenté et soutenu publiquement par :

**BEKOUICHE Abdelkader & ARDJOUN Mohammed Abdelwahab**

Devant le jury composé de : jeudi 29 septembre 2022

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
LALAOUI Mohamed El amine	MAA	IMSI UNIV ORAN-2-	Président
ROUAN SERIK Mehdi	MCB	IMSI UNIV ORAN-2-	Examinateur
CHENNOUFI Mohamed	MCA	IMSI UNIV ORAN-2-	Encadrant

Année universitaire : 2021/2022

***Je dédie ce modeste travail :***

***A mes chers parents***

*Pour tous leurs sacrifices, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

***A ma grand-mère Hlima,***

*Pour son amour, sa tendresse,*

***A ma tante Kheira,***

*Pour son support illimité ,*

***A mes chères sœurs Chahrazed , Soumia, Hasnaa, Aya***

*Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

***A mon cher frère, Habib,***

***A toute ma famille et mes amis un par un,***

*Pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A tout ceux qui ont contribué à ce travail, de près ou de loin*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien  
infaillible,*

***Merci d'être toujours là pour moi.***

**Ardjoun mohammed abdelwahab**

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler  
pour que je puisse atteindre mes objectifs*

*A mon frère yacer,*

*A ma sœur hanaa,*

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études*

*A ma chère grande- mère,*

*Qui je souhaite une bonne santé*

*A mon cher binôme abdelwaheb,*

*Pour son entente et sa sympathie*

*A mes chers amis,*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles*

**Merci à tous**

**Bekouche abdelkader**

### **Résumé :**

La maintenance prédictive commence à prendre progressivement une importance dans l'industrie et se révèle être une des fonctions clé de l'entreprise de production moderne. Les domaines de l'intelligence artificielle tels que l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond aident à développer le domaine de maintenance en général et de la maintenance prédictive en particulier et ce en prédisant les défaillances avant qu'elles ne surviennent. Ceci a pour but d'anticiper les pannes qui pourraient nuire au bon fonctionnement de l'entreprise. Ce projet décrit un système de monitoring en temps réel de mesure de vibration des machines tournantes, aligné sur les principes de l'Industrie 4.0. Nous avons appliqué programme et des modules électroniques minimiser aux perspectives de d'acquisition de la donnée et les sauvegardé en tant qu'historique en basant sur l'architecture de maintenance prédictive et ses technologies bien que l'analyse vibratoire, afin d'extraire les mesures et les classé dans des matrices de risques prédéfinis.

**Mot clé :** la maintenance 4.0, la maintenance prédictive, l'industrie 4.0, ,data collection, monitoring , smart sensor, cloud, big data , IIOT.

### **Abstract :**

Predictive maintenance is gradually gaining importance in the industry and is proving to be one of the key functions of the modern manufacturing enterprise. Artificial intelligence fields such as machine learning and deep learning are helping to develop the field of maintenance in general and predictive maintenance in particular by predicting failures before they occur. This aims to anticipate failures that could affect the smooth running of the company. This project describes a real-time monitoring system for vibration measurement of rotating machines, aligned with the principles of Industry 4.0. We have applied program and electronic modules minimize the data acquisition perspective and save them as history based on the predictive maintenance architecture and its technologies as well as the vibration analysis, in order to extract the measurements and classify them in predefined risk matrices.

## Table de Matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE	
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 DEFINITION DE LA MAINTENANCE:.....	4
1.3 Les politiques de maintenance.....	5
➤ La maintenance Corrective.....	5
➤ La maintenance palliative.....	5
➤ La maintenance curative.....	6
➤ Maintenance préventive.....	6
➤ Maintenance préventive systématique.....	6
➤ Maintenance préventive conditionnelle.....	7
1.4 Opération de maintenance préventive.....	7
1.5 LES NIVEAUX DE MAINTENANCE.....	9
1.6 LES OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE.....	10
1.7 TRAVAUX ANTERIEURS DES METHODES DE MAINTENANCE.....	11
➤ la TPM.....	11
➤ l'AMDEC.....	11
➤ Le QQQCCP.....	12
➤ Le kaizen.....	12
➤ Pareto ou l'analyse ABC.....	13
➤ Le PDCA.....	13
➤ L'outil Méride.....	14
➤ Méthode de MAXER.....	14
➤ Le diagramme d'Ishikawa.....	15
1.8 CONCLUSION.....	16
CHAPITRE 2 : LES TECHNOLOGIES UTILISE DANS L'INDUSRTIE 4.0	
2.1 INTRODUCTION.....	18
2.2 DEFINITION DE L'INDUSTRIE 4.0:.....	18
2.3 LES TECHNOLOGIES POUR L'INDUSTRIE 4.0:.....	19
2.3.1 IIOT:.....	20
2.3.2 Big Data.....	20
a. Les trois « V » du Big Data:.....	21

Table de matières	
b. Fonctionnement du Big Data: .....	22
c. Cas d'utilisation du Big Data: .....	22
2.3.3 Cloud computing .....	23
a) Les différents types de Cloud Computing.....	23
2.3.4 Machine learning .....	24
➤ Exemple de machine learning .....	24
a) Trois catégories de machine learning.....	24
b) Trois types d'algorithmes du machine learning.....	26
2.3.5 IA.....	28
a) Fonctionnement de l'intelligence artificielle.....	28
b) Exemples de technologie d'IA .....	29
2.3.6 Fabrication additive .....	29
a) Les différentes technologies de fabrication additive.....	30
b) Les matériaux utilisés.....	31
c) Comment fonctionne la fabrication additive ? .....	31
2.3.7 Communication Inter Machines (M2M).....	31
2.3.8 Digital Twin.....	32
a) Les composants d'un Digital Twin .....	32
b) Niveau d'intégration .....	33
2.3.9 Cyber sécurité.....	34
2.4 CONCLUSION .....	35
<b>CHAPITRE 3 : LA MIANTENANCE PREDICTIVE</b>	
3.1 INTRODUCTION.....	37
3.2 DEFINITION DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE.....	37
3.3 LES DIFFERENCES ENTRE MAINTENANCE PREDICTIVE ET MAINTENANCE PREVENTIVE ET CORRECTIVE.....	38
3.5 LES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 AU CŒUR DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE.....	40
❖ Les capteurs IIoT pour capteur les données: .....	40
❖ IA et ML pour le traitement des données .....	40
3.7 LES TYPES DE DONNEES .....	42
3.8 LES OUTILS DE MAINTENANCE PREDICTIVE .....	43
a. Imagerie thermique.....	43

Table de matières	
b. Analyse de la vibration.....	43
c. Détection des ultrasons.....	43
d. Analyse de l’huile.....	44
e. Test d’émission .....	44
3.9 ALTERNATIVES A LA MAINTENANCE PREDICTIVE .....	44
3.10 LES RAPPORTS POUR ORGANISER LA MAINTENANCE.....	45
3.11 LA MAINTENANCE PREDICTIVE DES MACHINES .....	45
3.12 Méthodologie générale de la méthode d’entretien prédictif .....	47
3.13 ANALYSE VIBRATOIRE: .....	48
3.14 Mesure des vibrations:.....	49
3.14.1 Accéléromètres:.....	50
➤ Principe:.....	50
3.14.5 Vélocimétries:.....	54
3.14.6 Capteurs de déplacement: .....	54
3.15 CONCLUSION .....	55
<b>CHAPITRE 4 : REALISATION ET RESULTATS</b>	
4.1 INTRODUCTION.....	58
4.2 L’ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL.....	58
4.2.1 Définition logiciel ARDUINO IDE.....	58
4.2.2 ESP8266 NODE-MCU .....	62
a. Description technique d’ESP8266.....	62
b. Les avantages d’ESP8266 .....	63
c. Schéma interne d’ESP8266 .....	63
4.2.3 L’accéléromètre ADXL345 .....	64
➤ Fonctionnalités et avantages.....	65
4.2.4 ARDUINO IOT CLOUD .....	65
4.3 CABLAGE ET INSTALLATIONS .....	66
4.4 CONFIGURATION DE ARDUINO IOT CLOUD .....	67
4.4.1 Enregistrer esp8266 .....	67
4.4.2 Ajouter un nouveau périphérique Arduino .....	68
4.4.3 Création du Things .....	69
4.4.4 Création du Dashboard .....	69
4.5 CREATION DU CROQUIS.....	70

Table de matières

- Bibliothèque et variable..... 70
- Setup function ..... 70
- Loop function ..... 70

4.6 RESULTATS ET DISCUSSION ..... 71

4.7 CONCLUSION: ..... 73

CONCLUSION GENERALE ..... 74



## Liste de figures :

Figure 1.1 : Les méthodes de maintenance .....	05
Figure 1.2 : Les opérations de maintenance .....	08
Figure 1.3 : Diagram by Karn G. Bulsuk .....	13
Figure 1.4 : Le diagramme de causes et effets 5M.....	18
Figure 2.1 : Evolution des revolutions industrielles à l’horizon 2020 .....	19
Figure 2.2 : Les objets connectés par IIOT .....	14
Figure 2.3 : six Vs du big data.....	20
Figure 2.4 : Les principaux types d’apprentissage automatique .....	25
Figure 2.5 : Les systèmes de traitement de l’information neuronale Apprentissage automatique Apprentissage non-supervisé Intelligence artificielle, technologie, électronique .....	27
Figure 2.6 : prototypage rapide, impression et modélisation .....	29
Figure 2.7 : Le déroulement de la communication entre machines (M2M).....	31
Figure 2.8 Les éléments d’un modèle de Digital Twin .....	32
Figure 2.9 : Flux de données dans un Digital Model. ....	33
Figure 2.10 : Flux de données dans un Digital Shadow. ....	33
Figure 2.11 : Flux de données dans un Digital Twin .....	34
Figure 3.1 : Comparaison entre MC,MP et maintenance prédictive sur le coût .....	37
Figure 3.2 : La différence entre la maintenance prédictive et préventive en temps d’intervention... ..	38
Figure 3.3 : Architecture de maintenance prédictive.....	38
Figure 3.4 : Exemple d’interface de télémétrie pour la maintenance prédictive .....	39
Figure 3.5 : infographie des trois étapes du ML.....	40
Figure 3.6 Les niveaux de maturité de la PdM.....	41
Figure 3.7 : réduction des temps d’arrêts avec l’entretien prédictif... ..	45
Figure 3.8 : courbe de tendance.....	47
Figure 3.9 : Classification des techniques de la maintenance préventive dédiées aux machines tournantes... ..	49
Figure 3.10 : schéma de principe d'un accelerometer.....	50
Figure 3.11 : Réponse en fréquence d'un capteur Piézoélectrique .....	51
Figure 3.12 : Fixation du capteur sur palier .....	52
Figure 3.13 : Choix directionnel pour la prise de mesure .....	52

## Table de figures

Figure 3.14 : direction favorisée pour transmission par poulies courroies.....	53
Figure 3.15 : choix de l'emplacement du capteur .....	53
Figure 3.16 : Les surfaces de contact avec les capteurs doivent etre lisses et planes...	53
Figure 3.17 : Choix de l'emplacement du capteur .....	54
Figure 3.18 : réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation .....	54
Figure 3.19 : Vélocimétrie.....	55
Figure 4.1 : Interface logiciel ARDUINO IDE .....	59
Figure 4.2 : La carte NodeMCU (ESP8266) .....	62
Figure 4.3 : Composition d'une carte NodeMCU (ESP8266).....	63
Figure 4.4 : Les différents composant d'esp8268 .....	63
Figure 4.5 : Accéléromètre ADXL345.....	64
Figure 4.6 : interface IOT CLOUD ARDUINO.....	65
Figure 4.7 : câblage entre ADXL345 et NodeMCU.....	66
Figure 4.8 : placement d'accélérometre sur CPU FAN 12v.....	66
Figure 4.9 : menu de l'interface arduino iot cloud.....	67
Figure 4.10 : arduino create agent.....	67
Figure 4.11 : Ajoue a 3rd party device .....	68
Figure 4.12 : Arduino IoT Cloud détecte esp8266.....	68
Figure 4.13 : onglet devices dans interface iot cloud arduino.....	69
Figure 4.14 : création du things et 3 variables.....	69
Figure 4.15 : Création du Dashboard et 3 graphes pour les 3 variables.....	69
Figure 4.16 : Monitoring de mesures vibratoires en temps reel.....	71
Figure 4.17 : Les seuils définis pour les machines à respecter.....	71
Figure 4.18 : spectre d'accélération a l'axe X et Y sans balourd ...	72
Figure 4.19 : spectre d'accélération a l'axe X et Y avec balourd.....	73

## **Nomenclature :**

**IIOT** : Industrial Internet Of Things

**CPS** : Cyber Physical System

**IA** : Intelligence Artificielle **IOS** : Internet des Services

**TPM** : Total Productive Maintenance

**TRS** : Taux de Rendement Synthétique

**CND** : Contrôle Non Destructif

**IND** : Investigations Non Destructif

**PM** : Physical 5M

**IoE** : Internet de Tout

**IoMs** : Internet des Services Sanufacturiers

**IOP** : Internet des Personnes

**ELT** : Extract Transform, and Load

**SaaS** : Software As a Service

**IaaS** : Infrastructure As a Service

**PaaS** : Platform As a Service

**ANN** : Artificial Neural Network

**ML** : Machine Learning

**SVM** : Machine à Vecteurs de Support

**DQN** : Deep Q Network

**SARSA** : State-Action-Reward-State-Action

**CART** : Classification and Regression Tree

**IA** : Intelligence Artificielle

**RPA** : Robotic Process Automation

**NLP** : Natural Language Processing

**SLA** : Stereo Lithography Apparatus

**SLS** : Selective Laser Sintering

**FDM** : Fused Deposition Modeling

**SLT** : Standard Triangle Language

**TCP** : Transmission Control Protocol

**DLNA** : Digital Living Network Alliance

**OPC** : Ordonnancement, Pilotage et Coordination

**PLM** : Product Lifecycle Management

**VPN** : Virtual Private Network

## Nomenclature

**ML** : Machine Learning

**AFNOR** : Association Française de Normalisation

**IDE** : Integrated Development Environment

**ESP** : Electronic Stability Program

**SDK** : Software Development Kit

**CPU** : Central Processing Unit

**PDM** : Prédictive Maintenance

**RFID** : Radio Frequency Identification

**DNSSEC** : Domain Name System Security Extensions

**P2P** : Peer to peer

**MC** : Maintenance Corrective

**MP** : Maintenance Prédictive

## **Introduction générale :**

De notre jour, les entreprises essaient d'être à jour avec le développement connu dans le domaine industriel au but d'être le leadership vu la grande concurrence dans le marché. Ce qui l'oblige à mettre un système intelligent, moderne, flexible. Avec les récentes évolutions technologiques des systèmes cyber-physiques (CPS), de l'Internet des objets (IoT) et de l'Internet des services (IoS), une quatrième révolution industrielle est sur le point de se produire appelée « Industrie 4.0 », qui permet aux entreprises d'atteindre leurs objectifs. L'industrie 4.0 est apparue outre-Rhin à la fin de l'année 2012, et dévoilé au grand public par l'Association des constructeurs allemands de machines et équipements de production (Verband Deutscher Maschinen-und Anlagenbau, VDMA) lors de la Foire de Hanovre 2013, ce concept vise à renforcer la numérisation et l'interconnexion entre les processus.

Maintenant, avec l'industrie 4.0, des approches de maintenance innovantes doivent être développées pour répondre aux nouvelles exigences que nous appelons « maintenance 4.0 » ou « la maintenance prédictive ».

La maintenance des machines est un domaine important que chaque entreprise doit aborder. L'objectif des stratégies de maintenance est de maintenir l'équipement en fonctionnement. Dans la maintenance corrective, les interventions ne sont effectuées que lorsque le composant critique est complètement usé et défaillant. Elle minimise le nombre de remplacements de pièces ou de réparations inutiles puisque la maintenance n'est effectuée que si nécessaire. Cependant, cette approche peut également entraîner des pertes de production imprévues, des risques pour la sécurité lorsqu'un système est proche de la défaillance, ou des réparations et remplacements coûteux.

En maintenance préventive, les interventions sont placées selon des intervalles périodiques quel que soit l'état de santé des équipements et donc la durée de vie des composants critiques ne sont pas pleinement utilisées.

Face à l'augmentation rapide des exigences de qualité, de fiabilité et de sécurité des machines dans le secteur de l'industrie, il existe une demande croissante de surveillance et d'évaluation précoces de l'état des machines et des systèmes, ainsi que de prédiction de l'état des machines afin de réduire les temps d'arrêt imprévus.

Actuellement, la plupart des industries investissent dans la maintenance prédictive. Elle identifie l'état des machines ou des équipements et détermine si une machine spécifique va tomber en panne ou non. En conséquence, il peut diminuer les coûts de maintenance et les

temps d'arrêt, augmente la disponibilité de l'équipement et améliorer la productivité et la qualité Ce nouveau paradigme est rendu possible par les machines connectées qui génèrent une grande quantité de données instrumentées et par les capacités d'apprentissage automatique qui permettent de tirer un sens de ces données et construire un modèle qui indique la défaillance à venir.

Dans ce projet de fin d'étude, notre étude a été consacrée à l'application de l'un des technologies de maintenance prédictive. La collection et le monitoring de donnée en temps réel en réalisant un système à base arduino iot cloud en visant une étape d'architecture de cette politique de maintenance et plusieurs technologies de l'industrie 4.0 .

Ce mémoire est composé de quatre chapitres dont le contenu est comme suit :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur la maintenance.

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit les notions théoriques relative à l'industrie 4.0 et nous avons décrit les différentes techniques utilisées dans la maintenance prédictive.

Le troisième chapitre est consacré au techniques de la maintenance prédictive basée sur les données et l'analyse vibratoire.

Dans le quatrième chapitre, nous avons décrire le système à réaliser l'environnement exploiter ainsi que l'interprétation de spectre a base de donnée collecter.

Enfin ce manuscrit s'achève par une conclusion générale qui récapitule les résultats obtenus au cours de ce travail.

# **Chapitre 1 :** **Etat de l'art de la** **maintenance industrielle**

**1.1 Introduction :**

En industrie, la Maintenance est l'une des fonctions essentielles du système de production et dans les systèmes fortement automatisés, elle est une fonction capitale.

Parfois, la Maintenance constitue un élément stratégique de l'entreprise qui nécessite des moyens importants et beaucoup de dépenses.

Une Maintenance mal organisée, mal gérée ou mal exécutée, peut avoir des impacts néfastes sur le fonctionnement du système de production :

- Arrêts multiples et indisponibilité des installations,
- Surcoûts de production,
- Grands risques de mauvaise qualité et d'indisponibilité des produits.

De même, une mauvaise Maintenance ou une Maintenance insuffisante, peut être parfois à l'origine d'importantes catastrophes (aéronautique, transport, nucléaire, ..) et peut mettre en danger l'existence même de l'entreprise.

Nous allons donc faire une explication des généralités et les notions de bases sur la maintenance industrielle dans ce chapitre.

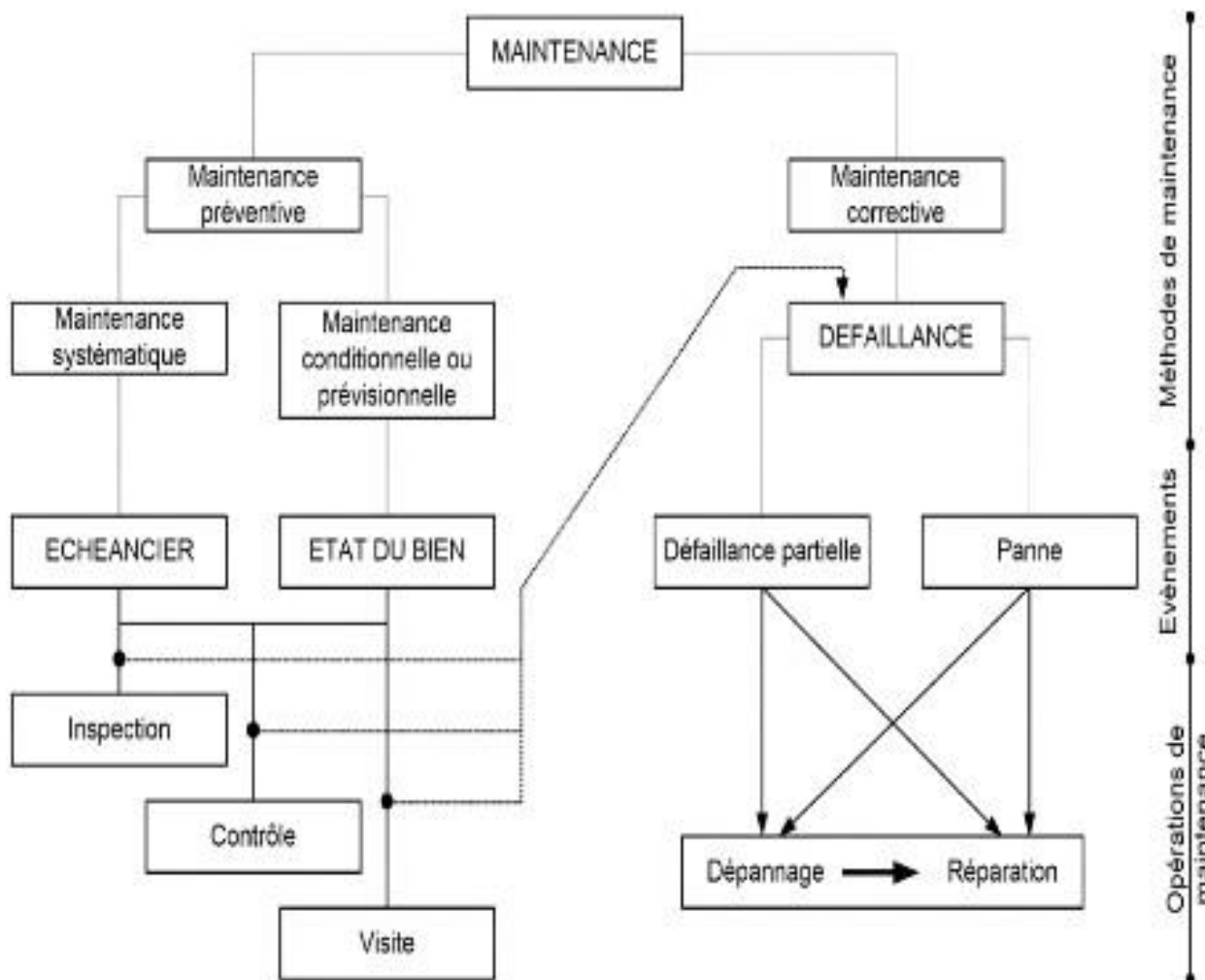
**1.2 Définition de la maintenance :**

La maintenance d'après la norme AFNOR x60-010 : « l'ensemble des actions destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise ».[1]



### 1.3 Les politiques de maintenance :

La figure 1.1 ci-dessous résume les méthodes de maintenance selon la norme NF X 60-000



*Fig1.1 : Les méthodes de maintenance*

#### ➤ La maintenance Corrective :

Définition AFNOR (norme X 60-010) : « Opération de maintenance effectuée après défaillance »

#### Les différents types de maintenance corrective :

##### ➤ La maintenance palliative

D'après la norme AFNOR [2] la décrit comme : « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise, appelée couramment dépannage ». La maintenance palliative est doivent être suivies d'actions curatives.

### ➤ **La maintenance curative**

D'après la norme AFNOR X60-319/NF EN 13306 2010 AFNOR est défini comme :  
« une action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent ». Ce type d'intervention de maintenance curative est définitif.

#### **Les opérations de maintenance corrective**

- **Localisation** : Action conduisant à rechercher précisément le (ou les) pièces parle (ou les) quel(s) la défaillance se manifeste.
  - **Diagnostic** : identification des causes de la défaillance à l'aide d'une analyse oud'un raisonnement logique fondu sur un ensemble d'information.
  - **Dépannage** : remise en état de fonctionnement qui peut être appliqué sur des équipements fonctionnant en continue dont les impératifs de production interdisent toute visiteou intervention à l'arrêt. Le dépannage a un caractère provisoire.
  - **Réparation** : intervention définitive après une panne ou une défaillance. La réparation caractérise la maintenance curative.
- **Maintenance préventive :**

La maintenance préventive est une maintenance qui consiste à intervenir sur un bien selon des critères prédéterminés ou à intervalles réguliers avant qu'il ne soit en panne, son objectif principal est de diminuer la probabilité de défaillance ou dégradation du bien et d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation.

L'analyse des coûts de la maintenance préventive doit avoir un gain supérieur aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Elle peut prendre deux formes différentes qui sont la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle.

#### **Les différents types de maintenance préventive :**

##### ➤ **Maintenance préventive systématique :**

La maintenance systématique est une maintenance préventive planifiée sur un équipement suivant un échancier en fonction du temps ou en fonction du nombre d'unités d'usage.

➤ **Maintenance préventive conditionnelle :**

La maintenance conditionnelle est une maintenance préventive qui n'est effectuée qu'en franchissant un certain seuil prédéterminé significatif en fonction de l'état de dégradation du bien.

**1.4 Opération de maintenance préventive :**

**L'inspection :**

Action de maintenance et de surveillance qui s'exécute en suivant une certaine mission définie afin de relever des anomalies sur un bien.

**Le contrôle :**

Action de maintenance qui consiste à mesurer et examiner pour vérifier la conformité de certaines caractéristiques du bien par rapport à des données préétablies.

**La vérification :**

Action permettant de vérifier si l'écart entre une valeur de référence et une valeur mesurée par un appareil de mesure est inférieur aux erreurs maximales tolérées.

**La visite :**

Action de maintenance consistant à faire un examen détaillé et prédéterminé sur tout ou une certaine partie du bien.

**Rénovation :**

Action qui consiste à inspecter complètement tous les organes d'un bien et vérifier ses caractéristiques, avec possibilité de remplacement des pièces déformées et réparation des pièces et sous-ensembles défectueux tout en conservant des pièces bonnes.

**La reconstruction :**

Remise en état du bien défini par le cahier de charge initial et démontage du bien principal, qui impose le remplacement des pièces vitales qui approchent de la fin de leur durée de vie par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut inclure des modifications et des améliorations. Elle permet de donner à un bien une durée de vie plus longue que celle d'origine.

**La modernisation :**

Remplacement d'équipements ou d'appareils apportant une amélioration de l'aptitude du fonctionnement du bien n'existant pas sur le bien d'origine.

**Les échanges standards :**

Reprise d'un article ou sous ensemble ou organe usagé par le constructeur pour donner le même au client neuf ou remis en état selon des spécifications.

**La modification :**

Opération définitive effectuée sur un bien dans le but d'améliorer le fonctionnement.

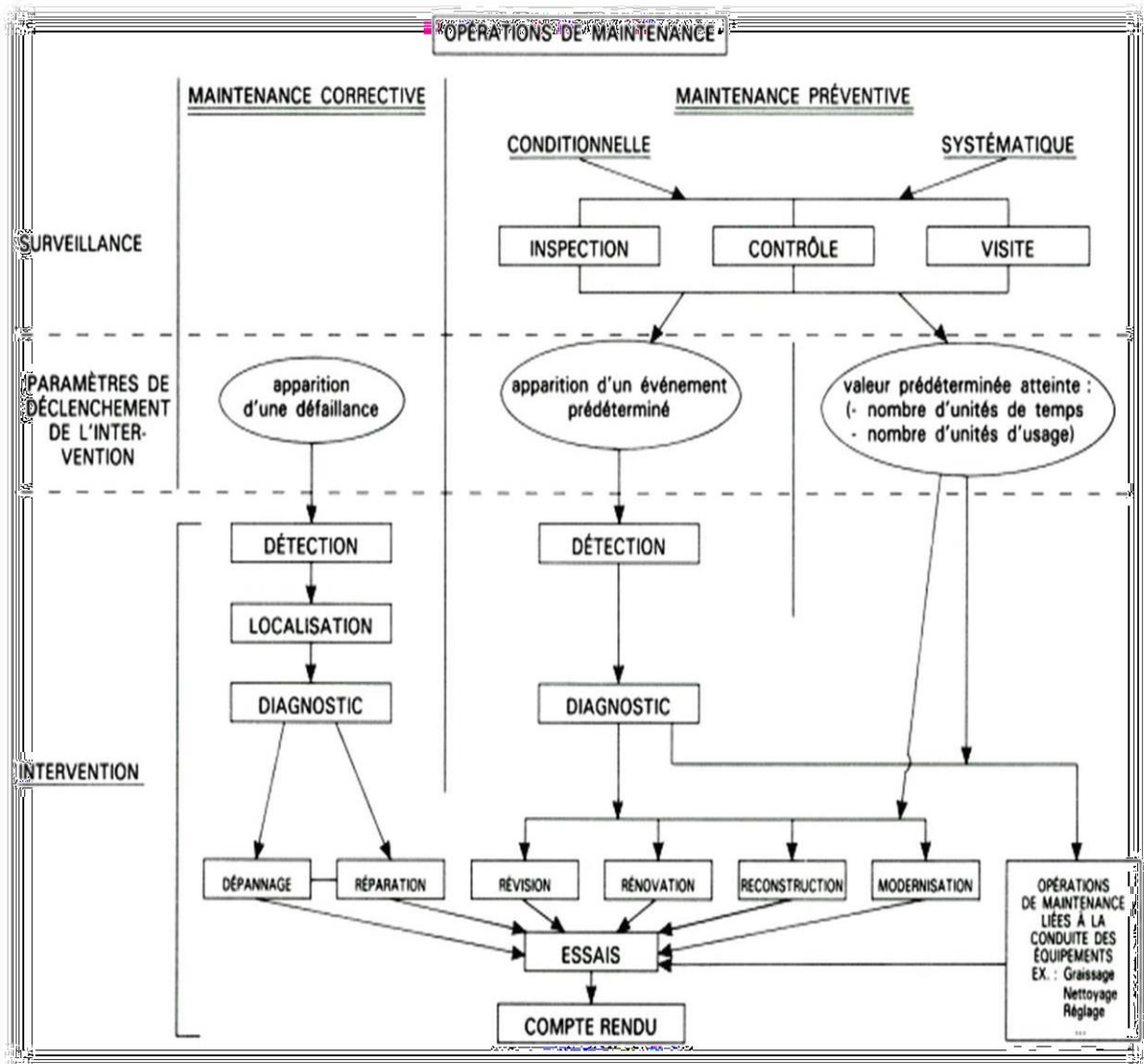


Fig1.2 : Les opérations de maintenance

## **1.5 Les niveaux de maintenance :**

### **Premier niveau :**

C'est des actions simples et réglages effectués sur des éléments qui sont accessibles en toute sécurité sans aucun démontage ou ouverture sur l'équipement, sans avoir à utiliser un outillage ou bien un outillage léger est utilisé. Ce type de maintenance est effectué par l'exploitant du bien sur place et à l'aide des instructions d'utilisation.

### **Deuxième niveau :**

C'est des actions qui nécessitent des procédures simples avec des équipements de soutien simples, ou opérations mineures de maintenance préventive qui sont régulièrement effectuées sur les équipements. Ce type de maintenance est effectué par une personne habilitée qui a reçu une formation spécifique lui permettant d'accomplir sa tâche en sécurité et en suivant les instructions de maintenance à propos des tâches et outillages.

### **Troisième niveau :**

C'est des opérations de maintenance préventive, curative, réglages et réparations qui nécessitent des procédures complexes avec des équipements de soutien complexes et outils spécifiques. Ce type de maintenance est effectué par un technicien spécialisé et qualifié sur place ou dans le local de maintenance avec l'aide des instructions de maintenance et procédures détaillés.

### **Quatrième niveau :**

C'est des opérations de maintenance qui nécessitent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière à l'aide d'outillage complet et d'équipements spécialisés, c'est en général tous les travaux importants de maintenance préventive ou corrective à l'exception de la reconstruction et la rénovation. Ce type de maintenance est effectué par des techniciens ou équipe spécialisé à l'aide de toutes les instructions de maintenance générales ou particulières.

### **Cinquième niveau :**

C'est des opérations lourdes de rénovation et de reconstruction dont les procédures impliquent la technologie du bien avec des équipements de soutien définis par le constructeur. Ce type de maintenance est effectué par le constructeur du bien ou par une équipe spécialisée.

### 1.6 Les objectifs de la maintenance :

D'une manière générale, la maintenance a pour but d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production à un coût optimal.

Les principaux objectifs que doit se fixer la fonction maintenance sont :

- **Améliorer la fiabilité du matériel** : La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement du matériel. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.
- **Garantir la qualité des produits** : La surveillance quotidienne des machines est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglages et de fonctionnement soient respectés. Le contrôle des jeux (vibrations) et de la géométrie de la machine permet d'éviter les aléas de fonctionnement. La qualité des produits est ainsi assurée l'absence des rebuts.
- **Améliorer l'ordonnement des travaux** : La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au planning d'arrêt machine, devra être validée par le service production. Cela implique la collaboration de ce service, afin de faciliter la tâche de la maintenance. Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable de production ne permet pas l'arrêt de l'installation, alors qu'il a reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un planning défini à l'avance prenant en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.
- **Assurer les sécurités humaines** : La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning, mais elle doit tenir compte aussi des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.
- **Améliorer la gestion de stock** : La maintenance préventive est planifiable. Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion des stocks. Elle permet aussi d'éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les commander que le moment venu.

### 1.7 Travaux antérieurs des méthodes de maintenance :

#### ➤ la TPM :

La TPM (de l'anglais « *total productive maintenance* », ou maintenance productive totale) est une technique qui a vu le jour au Japon, en 1971. Elle consiste en une évolution des techniques de maintenance et a pour but final d'augmenter le rendement des machines d'une entreprise. Elle vise à bannir les arrêts non planifiés, les pertes de temps lorsqu'un technicien démarre une machine ou encore les retouches et les déchets engendrés par des performances machines dégradées. On évite ainsi les pertes de productivité dues à des équipements défectueux ou au possible manque d'attention de certains techniciens. [2]

Pour parvenir à cet objectif, la TPM se divise en trois outils distincts :

- le TRS, ou taux de rendement synthétique, qui est un indicateur mesurant le taux d'utilisation des machines ;
- le **5s** :
- **Seiri** – ordonner
- **Seiton** – ranger
- **Seiso** – dépoussiérer
- **Seiketsu** – rendre évident
- **Shitsuke** – être rigoureux ;
- l'auto-maintenance, qui permet aux opérateurs de production de réaliser des tâches simplifiées de maintenance.

#### ➤ l'AMDEC

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) a pour but de vous aider à mener une analyse poussée de vos interventions de maintenance et de votre parc machine. L'AMDEC vous permet de gérer votre maintenance industrielle puisque cet outil de sûreté de fonctionnement est aussi très utilisé dans le cadre de démarches qualité. [3]

Pour l'utiliser au mieux, il vous suffit de suivre ces quelques étapes :

- Déterminer le mode de défaillance ainsi que la cause ;
- Mesurer les effets sur le système, la fonction touchée ainsi que le dommage induit ;
- Identifier les critères suivants :
  - N : Nombre de pannes

- F : Fréquence
  - G : Gravité
  - E : Évidence ;
- Calculer la criticité d'après la formule suivante : Fréquence \* Gravité \* Évidence.

La forme de l'AMDEC peut être multiple (fonctionnelle, produit, processus, moyen de production, flux) et avoir chaque fois des effets différents, mais qui permettront toujours d'obtenir un document de travail incontournable pour savoir quelles actions entreprendre, quelles interventions réaliser, etc.

En définitive, cette méthode permet d'augmenter la production en limitant les problèmes de défaillance, d'analyser les défauts de production, de constamment chercher à s'améliorer...

#### ➤ **Le QQQQCCP**

Le **QQQQCCP** est une méthode de questionnement par rapport à un problème précis, qui a le mérite d'être simple et rapide à utiliser. [4] L'objectif est de prendre une problématique industrielle et de répondre à l'ensemble des questions suivantes :

- Qui ?
- Quoi ?
- Où ?
- Quand ?
- Comment ?
- Combien ?
- Pourquoi ?

Grâce à cette méthode, vous pouvez rassembler tout un ensemble d'informations qui vous permettront sûrement de mieux isoler votre problématique. Vous dégager ainsi des priorités, les classez selon leur importance et pouvez agir rapidement en trouvant les solutions et propositions adéquates

#### ➤ **Le kaizen**

Le **Kaizen** est une méthode japonaise qui consiste à améliorer l'efficacité et la qualité de production d'une usine à travers de petites améliorations continues. [5] Pour que cette méthode puisse fonctionner, chaque employé doit s'impliquer dans ce processus d'amélioration continue et tous doivent rassembler leurs efforts pour parvenir à l'objectif fixé. Pour mettre en place cette méthode, il est nécessaire :



- D'organiser des sessions de sensibilisation pour pousser les employés à s'impliquer et à se sentir concernés ;
- De former les managers et techniciens à cette méthode pour qu'ils mesurent toute son utilité ;
- De standardiser l'ensemble des processus et de mettre en place des outils comme le pdca, présenté ci-dessus, ou encore de gestion de la qualité, qui permettent à chacun de s'exprimer librement et de donner son avis.

➤ **Pareto ou l'analyse ABC :**

L'analyse Pareto, autrement appelée méthode des 20-80, permet d'analyser les pannes les plus importantes, aussi bien en termes de fréquence d'intervention que de temps passé. Elle permet d'affirmer que 20 % (voire moins) des causes sont responsables de 80 % des problèmes rencontrés dans une usine, et donc d'analyser toutes les problématiques pour trouver une réponse adaptée. Pour utiliser cette méthode et avoir un aperçu général de la situation, vous devez au préalable vous munir de vos historiques de défaillance.

L'analyse ABC, quant à elle, se base sur le même principe que l'analyse Pareto puisqu'elle en découle directement. C'est une méthode de classification très utilisée dans l'analyse des stocks.[6]

➤ **Le PDCA :**

Le PDCA, plus connu en français sous le nom de Roue de Deming, est une technique qui permet d'améliorer l'anticipation et la gestion de vos projets industriels. [7] Cet outil aide à mettre ses idées en pratique et à découper le travail à réaliser en plusieurs étapes pour en suivre le bon déroulement. L'acronyme PDCA correspond à :

- P – « Plan » : planifier ce que l'on va faire
- D – « Do » : faire ce qui a été prévu
- C – « Check » : vérifier que le travail effectué correspond à ce qui était prévu au départ
- A – « Act » : réagir et ajuster en dressant un bilan du travail réalisé.



*Fig1.3 : Diagram by Karn G. Bulsuk*

➤ **L'outil Méride :**

La méthode d'évaluation des risques industriels et des dysfonctionnements des équipements (MÉRIDE) est particulièrement appréciée dans le cadre de la planification d'opérations de maintenance. Pour l'utiliser au mieux, vous devez évaluer lesdites défaillances et finalement réaliser une étude générale d'évaluation des risques. [8]

➤ **Méthode de MAXER :**

La **méthode Maxer** est une méthode servant à analyser les pannes et les défaillances, en particulier en milieu industriel. Elle a été conçue par le groupe Lausanne pour le compte de la société Michelin dans les années 1970.[9]

a. Concept :

La méthode utilise les concepts principaux suivants :

- Une « installation » est quelque chose susceptible d'avoir une défaillance, par exemple une fraiseuse ;
- Un « objet » est un élément d'une installation ;
- Un « défaut » est un problème rencontré par un objet ; un défaut peut être intrinsèque (par exemple une fêlure) ou extrinsèque (par exemple, le fil qui permet de commander l'objet est cassé) ;
- Un « symptôme » est un défaut qui a amené à constater une défaillance ;
- Un « facteur contributif » est une cause qui contribue à la défaillance ;
- La « chaîne causale » est la suite des causes et conséquences qui a abouti à la défaillance ;
- Un « défaillogramme » est la représentation graphique de l'analyse de la défaillance, y compris la chaîne causale.

b. Evolutions dans le domaine de la maintenance :

Que s'est-il passé depuis le début des années 70 dans le domaine de la maintenance ?

- L'apparition des premières GMAO ;
- La disponibilité des premiers appareils de contrôles non destructifs (CND – thermographie IR, analyse des lubrifiants, ultrasons pour les fuites et mesures d'épaisseurs) où d'investigations non destructifs (IND) de plus en plus petits,

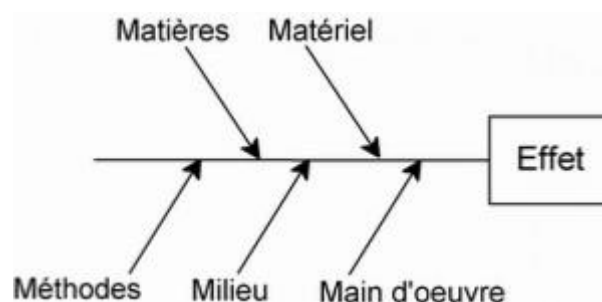
performants, mais considérés par certains comme des moyens sur étagère, qu'on utilise de temps de temps, mais pas complètement intégrés dans les plans de maintenance préventifs prévisionnels ;

- Des méthodes d'organisation venant du Japon, comme la TPM, aujourd'hui un peu dépassée dans sa mise en œuvre globale. On ne retient qu'aujourd'hui les 5S que l'on trouve également dans les outils du Lean, le premier niveau de maintenance réalisé par les opérateurs, mais on oublie de les former au premier niveau de diagnostic ;
- Il n'a pas été retenu à l'époque, une méthode de résolution de problème, la méthode PM (Physical, 5M) qui était complexe à mettre en œuvre, car elle ne possédait pas la représentation de la chaîne causale, le défaillogramme comme dans la méthode MAXER (méthode de résolution de problèmes par le raisonnement).

Note : Aujourd'hui, l'efficacité en production passe, en plus du premier niveau de maintenance, par la formation des opérateurs au premier niveau du diagnostic, afin de les intégrer dans le processus de diagnostic et les faire participer avec les techniciens de maintenance au processus de recherche de la cause de la panne (on ne peut pas à ce stade identifier la cause première, car cela fait l'objet d'une analyse plus approfondie) et ce, le plus rapidement possible.

#### ➤ Le diagramme d'Ishikawa :

Le **diagramme d'Ishikawa**, également appelé diagramme de causes et effets, 5M (voir *fig1.4*) ou encore diagramme en arêtes de poissons, est utilisé dans la gestion de la qualité. Il aide à identifier les différentes causes et effets d'une problématique donnée. [10]



*Fig1.4: Le diagramme de causes et effets 5M*

Son fonctionnement est simple : il vous suffit de lister l'ensemble des potentielles causes imputables à la problématique que vous rencontrez et de les classer selon différentes catégories. Sur une machine donnée, on pourrait par exemple créer les catégories électrique, mécanique,

hydraulique, automatisme, et retrouver sous chacune d'entre elles tout un ensemble de problèmes que l'on peut rencontrer sur la machine en question.

Cet outil, assez visuel, est particulièrement utilisé dans la gestion des risques, propre à la gestion de projet, puisqu'il vous permet d'anticiper tout un éventail de difficultés qui pourraient avoir des retombées assez catastrophiques sur l'activité de votre entreprise

### **1.8 Conclusion :**

Ce chapitre nous avons expliqué un état de l'art la maintenance et ses différentes politiques et techniques en citant les opérations qui doit être exécuter ainsi que les travaux antérieur or les techniques de maintenance appliqué de la génération ultérieure de maintenance 3.0 ou bien avant .

# **Chapitre 2 :**

## **Les technologies utilisé dans l'industrie 4.0**

## **2.1 Introduction :**

L'industrie depuis son apparition n'a cessé de se développer, en commençant par le charbon puis en se développant avec l'électricité jusqu'à ce que l'électronique les rejoigne, désormais une nouvelle révolution industrielle est née, c'est une convergence des technologies numérique et des objets industriels réels, appelée l'industrie 4.0 c'est elle qui sera à l'origine de l'usine du futur elle vise à obtenir des produits uniques et beaucoup plus performants en produisant mieux et intelligemment, indéniablement l'industrie 4.0 a conduit à l'apparition d'une nouvelle forme de maintenance, la maintenance prédictive qui est une méthode permettant de détecter et de prédire l'instant où la défaillance va survenir sur l'équipement avec ses nombreux avantages puisque le temps d'entretien de l'équipement ainsi que le coût des équipements vont être réduits, elle permet d'optimiser et d'améliorer la productivité, c'est une véritable innovation au sein du secteur industriel où les machines sont au cœur des usines modernes, et leur bon fonctionnement nécessite l'adoption de programmes et technologie intelligente comme recueillir et analyser des données grâce à des capteurs afin de générer des algorithmes prédictifs.

A l'avenir les industries utiliseront de plus en plus les analyses de données, capteurs intelligents et les algorithmes afin de mettre en place des systèmes intelligents capables de prédire les pannes, ce nouveau concept ne pourra se développer sans l'intelligence artificielle, IIOT, le cloud computing, le big data, machine learning, fabrication additive, digital twin.

## **2.2 Définition de l'industrie 4.0:**

Le terme a été inventé en 2011 par un groupe de scientifiques et d'ingénieurs travaillant sur le projet du gouvernement allemand visant à promouvoir et à mettre en œuvre la numérisation totale des systèmes de production.

L'industrie 4.0, également appelée industrie intelligente, vise à transformer l'entreprise en une organisation intelligente capable d'obtenir les meilleurs résultats. Pour ce faire, elle propose un nouveau modèle basé sur l'interconnexion de tous les départements de l'entreprise.

L'industrie 4.0 s'engage pour l'automatisation et la numérisation de tous les processus industriels. Ainsi, des données sont collectées et des informations partagées sont générées

pour améliorer la productivité, la qualité, les performances, la rentabilité et l'efficacité, entre autres aspects. Cette révolution vient de la main des nouvelles technologies telles que la robotique, l'analytique et le big data, l'intelligence artificielle, la fabrication additive, le cloud-computing, la vision artificielle, la technologie des capteurs, les technologies cognitives, les nanotechnologies et l'Internet industriel des objets (IIoT), entre autres. Dans un sens plus large, l'industrie 4.0 est comprise comme toute approche visant à interconnecter toutes les unités de production d'une entreprise, impliquant l'utilisation de machines capables d'automatiser des tâches monotones ou mécaniques. À première vue, il peut sembler que nous le faisons déjà depuis plus de 50 ans. Cependant, avec ce nouveau paradigme, ce qui est recherché est de mettre en œuvre des moyens intelligents, capables de s'autogérer, de se configurer et de prendre des décisions sur la base de leur connexion avec d'autres mécanismes à l'intérieur et à l'extérieur de l'industrie. Faire des moyens de production des outils beaucoup plus intelligents, capables de gérer des productions personnalisées individuelles et de masse. Non seulement pour atteindre les meilleures performances opérationnelles, mais aussi pour être en mesure de répondre à des demandes importantes de produits uniques adaptés à chaque personne, sans affecter la productivité.

[11]

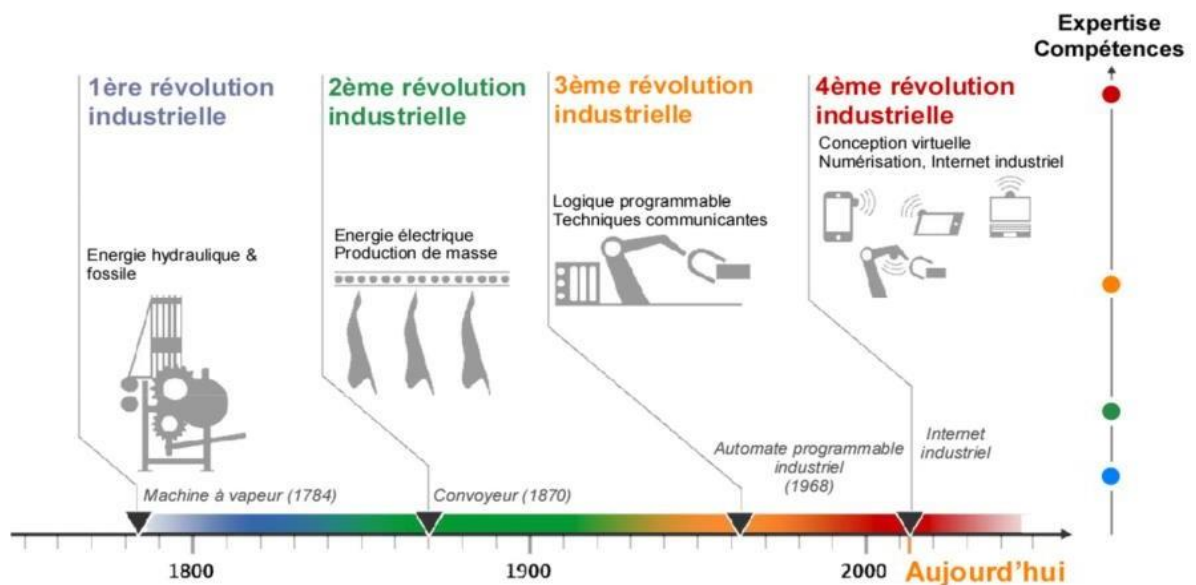


Fig2.1: Evolution des révolutions industrielles.

### 2.3 Les technologies pour l'industrie 4.0:

Les technologies liées à l'industrie sont nombreuses, elles ont permis l'émergence de l'industrie 4.0, et la découverte des solutions qui concourent à l'amélioration quotidienne

des processus industriels.

Ces technologies qui sont le cœur de l'industrie 4.0 fleuriront au fil des années puisque la révolution industrielle 4.0 n'en est qu'à ses débuts, et joueront un rôle clé dans l'industrie du futur.

### 2.3.1 IIOT:

Selon la norme ISO/IEC 30141, l'internet des objets est défini comme étant une infrastructure d'interconnexion d'entités physiques, de systèmes, de sources d'information et de services intelligents traitant les informations du monde physique et du monde virtuel.[12]

Dans l'industrie 4.0, l'internet des objets industriel permet de connecter une variété de ressources numériques les reliant à des technologies embarquées leur permettant d'interagir, de communiquer, de collecter, d'échanger et d'analyser. Ceci permet de décentraliser la prise de décision, avec une réactivité en temps réel.

Internet des objets (IoT) devrait aussi être connu sous le nom de l'internet de tout (IoE) qui consiste en l'internet des services (IoS), l'internet des services manufacturiers (IoMs), internet des personnes (IoP).



*Fig2.2: Les objets connectés par IIOT*

**Exemple:** Bosch Rexroth, un fournisseur de systèmes d'entraînement et de contrôle, a équipé une installation de production de vannes avec un processus de production décentralisé semi-automatisé. Les produits sont identifiés par des codes d'identification par radiofréquence, et les postes de travail « savent » quelles étapes de fabrication doivent être effectuées pour chaque produit et peuvent s'adapter pour effectuer l'opération spécifique

### 2.3.2 Big Data :

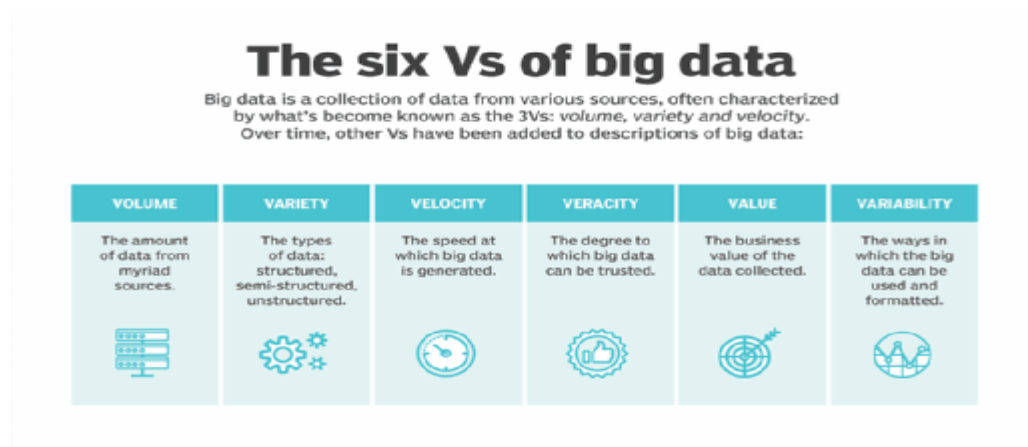
La définition du Big Data est la suivante : des données plus variées, arrivant dans des volumes de plus en plus importants et avec une vitesse plus élevée. Cette définition est également connue sous le nom des trois « V ».



En d'autres termes, le Big Data est composé de jeux de données complexes, provenant essentiellement de nouvelles sources. Ces ensembles de données sont si volumineux qu'un logiciel de traitement de données traditionnel ne peut tout simplement pas les gérer. Mais ces énormes volumes de données peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes que vous n'auriez jamais pu résoudre auparavant. [13]

**a. Les trois « V » du Big Data:** nous avons choisis les 3 gros Vs pour définir.

- 1) **Volume:** La quantité de données a son importance. Avec le Big Data, vous devrez traiter de gros volumes de données non structurées et à faible densité. Il peut s'agir de données de valeur inconnue, comme des flux de données Twitter, des flux de clics sur une page web ou une application mobile ou d'un appareil équipé d'un capteur. Pour certaines entreprises, cela peut correspondre à des dizaines de téraoctets de données. Pour d'autres, il peut s'agir de centaines de pétaoctets.
- 2) **Vitesse:** La vitesse à laquelle les données sont reçues et éventuellement traitées. Normalement, les données haute vitesse sont transmises directement à la mémoire, plutôt que d'être écrites sur le disque. Certains produits intelligents accessibles via Internet opèrent en temps réel ou quasi réel et nécessitent une évaluation et une action en temps réel.
- 3) **Variété:** La variété fait allusion aux nombreux types de données disponibles. Les types de données traditionnels ont été structurés et trouvent naturellement leur place dans une base de données relationnelles. Avec l'augmentation du Big Data, les données ne sont pas nécessairement structurées. Les types de données non structurés et semi-structurés, tels que le texte, l'audio et la vidéo, nécessitent un prétraitement supplémentaire pour en déduire le sens et prendre en charge les métadonnées.



*Fig2.3 : les six Vs du big data*

**b. Fonctionnement du Big Data:**

Le Big Data offre de nouvelles perspectives, qui ouvrent de nouvelles opportunités et favorisent de nouveaux business models. Son adoption implique trois actions principales:

- **Intégré:** Le Big Data rassemble des données provenant de nombreuses sources et applications disparates. Les mécanismes traditionnels d'intégration de données, tels que ELT(extract, transform, and load ) ne sont généralement pas à la hauteur de la tâche. Pour analyser des jeux de Big Data à l'échelle de téraoctets, voire de pétaoctets, il est nécessaire d'adopter de nouvelles stratégies et technologies.
- **Gérer:** Le Big Data nécessite du stockage. Votre solution de stockage peut se trouver dans le cloud, sur site, ou les deux à la fois. Vous pouvez stocker vos données sous la forme de votre choix et imposer à ces jeux de données vos exigences de traitement, ainsi que les moteurs de traitement nécessaires, à la demande. Nombreux sont ceux qui choisissent leur solution de stockage en fonction de l'endroit où sont hébergées leurs données. Le cloud est de plus en plus adopté, car il prend en charge vos besoins informatiques actuels et laisse la possibilité d'augmenter les ressources en fonction des besoins.
- **Analyser:** Votre investissement dans le Big Data porte ses fruits dès lors que vous êtes en mesure d'analyser vos données et d'agir à partir de l'analyse. Forgez-vous un nouveau point de vue grâce à une analyse visuelle de vos divers jeux de données. Explorez davantage les données afin de faire de nouvelles découvertes. Partagez vos conclusions avec d'autres utilisateurs. Créez des modèles de données avec l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle. Exploitez vos données.

**c. Cas d'utilisation du Big Data:**

Le Big Data peut vous aider à réaliser diverses activités commerciales, de l'expérience client aux analyses. En voici quelques-unes.

- **Maintenance predictive:** Les facteurs permettant de prédire les défaillances mécaniques peuvent être profondément enfouis dans des données structurées, telles que l'année, la marque et le modèle de l'équipement, ainsi que dans des données non structurées couvrant des millions d'entrées de journal, de données de capteur, de messages d'erreur et de température du moteur. En analysant ces indications de problèmes potentiels avant que ceux-ci surgissent les entreprises sont à même de déployer leur maintenance de manière plus rentable et d'optimiser le temps de fonctionnement de leurs pièces et équipements.
- **Machine Learning:** Le machine learning est un sujet brûlant en ce moment. Les données plus particulièrement le Big Data, l'ont rendu possible. Nous sommes désormais capables d'enseigner aux machines, plutôt que de simplement les programmer. La disponibilité du Big Data pour former des modèles de machine learning rend cela possible.

### 2.3.3 Cloud computing :

Le cloud donne accès à des ressources informatiques partagées (Réseaux, serveurs, stockage applications et services) en externalisant la gestion de celles-ci ce qui implique une réduction des coûts. L'infonuagique facilite le partage de données entre les sites et les systèmes. Dans l'industrie4.0, de nombreuses ressources sont impliquées dans la virtualisation des infrastructures, nous notons: Software as a service (SaaS), Infrastructure as a service (IaaS), Platform as a service (Paas).[14]

#### a) Les différents types de Cloud Computing :

Le concept du Cloud Computing est assez simple, mais le passage au cloud peut impliquer de nombreuses approches, allant du relativement simple au très sophistiqué. Voici les trois approches (IaaS, PaaS, SaaS) les plus courantes de la migration vers le cloud...

- **Infrastructure-as-a-Service (IaaS):** En automatisant les briques d'une infrastructure de classe mondiale, les organisations à tous les niveaux maximisent le contrôle de leurs coûts tout en bénéficiant d'une évolutivité et d'une agilité accrues. Sans la nécessité de déployer, de gérer et d'entretenir les infrastructures sur site, les organisations augmentent leur liberté d'innovation. Avec l'IaaS, les entreprises louent une infrastructure informatique (pour la puissance de calcul, le stockage ou encore la mise en réseau) à un fournisseur de services cloud, mais elles continuent de superviser la gestion de leurs applications critiques ainsi que leurs systèmes de sécurité, leurs bases de données et leurs systèmes d'exploitation.
- **Platform-as-a-Service (PaaS):** Avec le PaaS, les équipes peuvent gérer et construire, tester et déployer leurs propres applications sur une plateforme cloud conçue pour bénéficier à l'utilisateur. Les infrastructures informatiques sous-jacentes, comme le matériel et les intergiciels, sont gérées par un prestataire cloud de confiance. Sans avoir à entretenir l'infrastructure, les équipes informatiques internes peuvent alors se concentrer sur les besoins de l'entreprise en matière de données et d'applications, ce qui leur permet de se consacrer à la croissance prolongée de l'entreprise.
- **Software-as-a-Service (SaaS):** Avec le modèle SaaS, les plateformes logicielles sont hébergées en externe dans le cloud. Les utilisateurs peuvent accéder à des logiciels sur Internet grâce à un abonnement. Les organisations sont alors libérées de la nécessité d'acheter, d'installer et de mettre à jour les principales plateformes

logicielles tout en garantissant que leurs outils clés sont accessibles aux équipes du monde entier. Avec le SaaS, l'utilisateur doit uniquement se soucier de la gestion de ses propres données au sein d'une application, le logiciel étant géré dans le cloud par un fournisseur externe.

#### 2.3.4 Machine learning :

Le machine learning est une technique d'apprentissage automatique utilisée en intelligence artificielle. Il consiste à entraîner des modèles à partir de base de connaissances en vue de réaliser des tâches complexes. [15]

##### ➤ Exemple de machine learning :

Un bon exemple de machine learning est la voiture autonome. Une voiture autonome est équipée de plusieurs caméras, plusieurs radars et d'un capteur lidar. Ces différents équipements assurent les fonctions suivantes:

- Utiliser le GPS pour déterminer l'emplacement de la voiture en permanence et avec précision.
- Analyser la section de route située en avant de la voiture.
- Détecter les objets mobiles ou fixes situés sur l'arrière ou les côtés de la voiture.

Ces informations sont traitées en permanence par un ordinateur central également installé dans la voiture. Cet ordinateur collecte et analyse en permanence des volumes considérables de données et les classe de la même manière que les réseaux neuronaux d'un cerveau humain.

Pour guider la voiture dans son environnement, l'ordinateur prend des milliers de décisions par seconde en fonction de probabilités mathématiques et de ses observations : comment tourner le volant, quand freiner, accélérer, changer les vitesses, etc.

##### a) Trois catégories de machine learning:

Le machine learning n'est pas une nouvelle technologie. Le premier réseau neuronal artificiel, appelé « Perceptron », a été inventé en 1958 par le psychologue américain Frank Rosenblatt.

Au départ, Perceptron devait être une machine, et non un algorithme. En 1960, il a été utilisé pour le développement de la machine de reconnaissance d'images « Mark 1 Perceptron ». Mark 1 Perceptron a été le premier ordinateur à utiliser des réseaux neuronaux artificiels (ANN) pour simuler la réflexion humaine et apprendre par essais et erreurs.

Le machine learning est de plus en plus utilisé en raison de la multiplication des bibliothèques et des frameworks open source et de la multiplication par plusieurs milliards de fois de la puissance de traitement des ordinateurs entre 1956 et 2018. Aujourd'hui, le

machine learning est partout : des transactions boursières à la protection contre les logiciels malveillants en passant par la personnalisation du marketing. Quelle que soit sa simplicité ou sa complexité, le machine learning peut être classé en trois grandes catégories :

➤ **Machine learning avec supervision:**

Le machine learning avec supervision est une technologie élémentaire mais stricte. Les opérateurs présentent à l'ordinateur des exemples d'entrées et les sorties souhaitées, et l'ordinateur recherche des solutions pour obtenir ces sorties en fonction de ces entrées. Le but recherché est que l'ordinateur apprenne la règle générale qui mappe les entrées et les sorties.

Le machine learning avec supervision peut être utilisé pour faire des prédictions sur des données indisponibles ou futures (on parle de « modélisation prédictive »). L'algorithme essaie de développer une fonction qui prédit avec précision la sortie à partir des variables d'entrée – par exemple, prédire la valeur d'un bien immobilier (sortie) à partir d'entrées telles que nombre de pièces, année de construction, surface du terrain, emplacement, etc.

Le machine learning avec supervision peut se subdiviser en deux types :

Classification – La variable de sortie est une catégorie.

Régression – La variable de sortie est une valeur spécifique.

Les principaux algorithmes du machine learning avec supervision sont les suivants : forêts aléatoires, arbres décisionnels, méthode du k plus proche voisin (k-NN), régression linéaire, classification naïve bayésienne, machine à vecteurs de support (SVM), régression logistique et boosting des gradients.

➤ **Machine learning sans supervision**

Dans le machine learning sans supervision, l'algorithme est laissé à lui-même pour déterminer la structure de l'entrée (aucun label n'est communiqué à l'algorithme). Cette approche peut être un but en soi (qui permet de découvrir des structures enfouies dans les données) ou un moyen d'atteindre un certain but. Cette approche est également appelée « apprentissage des caractéristiques » (feature learning).

Un exemple de machine learning sans supervision est l'algorithme de reconnaissance faciale prédictive de Facebook, qui identifie les personnes sur les photos publiées par les utilisateurs.

Il existe deux types de machine learning sans supervision :

Clustering – L'objectif consiste à trouver des regroupements dans les données.

Association – L'objectif consiste à identifier les règles qui permettront de définir de grands

groupes de données.

Les principaux algorithmes du machine learning sans supervision sont les suivants : K-Means, clustering/regroupement hiérarchique et réduction de la dimensionnalité.

➤ **Machine learning par renforcement:**

Dans le machine learning par renforcement, un programme informatique interagit avec un environnement dynamique dans lequel il doit atteindre un certain but, par exemple conduire un véhicule ou affronter un adversaire dans un jeu. Le programme-apprenti reçoit du feedback sous forme de « récompenses » et de « punitions » pendant qu'il navigue dans l'espace du problème et qu'il apprend à identifier le comportement le plus efficace dans le contexte considéré.

En 2013, c'était déjà un algorithme de machine learning par renforcement (Q-learning) qui s'était rendu célèbre en apprenant comment gagner dans six jeux vidéo Atari sans aucune intervention d'un programmeur.

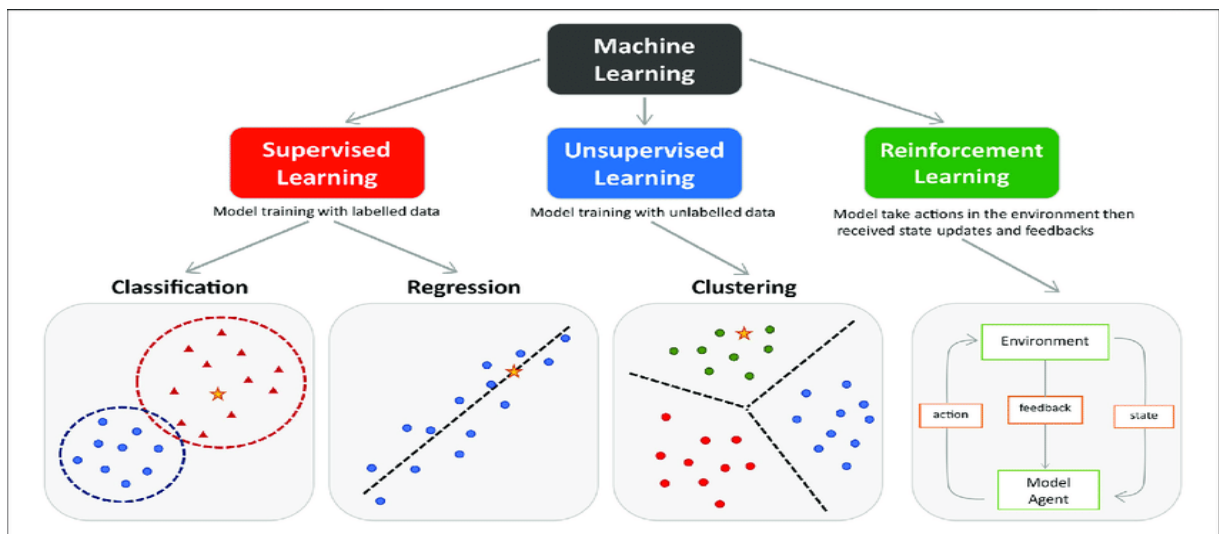
Il existe deux types de machine learning par renforcement :

Monte Carlo – Le programme reçoit ses récompenses à la fin de l'état « terminal ».

Machine learning par différence temporelle (TD) – Les récompenses sont évaluées et accordées à chaque étape.

Les principaux algorithmes du machine learning par renforcement sont les suivants :

Q-learning, Deep Q Network (DQN) et SARSA (State-Action-Reward-State-Action).



*Fig2.4: Les principaux types d'apprentissage automatique*

**b) Trois types d'algorithmes du machine learning:**

Un algorithme est une séquence d'actions qui s'exécutent pour résoudre un problème, effectuer un réglage, etc. L'informatique utilise des algorithmes pour décrire les étapes détaillées nécessaires à l'exécution d'une opération. Le machine learning utilise de nombreux types d'algorithmes (en plus de ceux énumérés ci-dessus).

L'algorithme utilisé dépend de la complexité et du type de problème à résoudre ou d'action à exécuter. Il peut, par exemple, s'agir de clustering (examiner les regroupements de données) ou de régression (prédire une sortie sous forme de valeur réelle). Exemples d'algorithmes du machine learning :

➤ **Algorithmes avec arbre décisionnel:**

Un arbre décisionnel est un type d'algorithme qui peut être appliqué à de nombreux contextes : grande distribution, finance, produits pharmaceutiques, etc. La machine se contente d'établir l'arborescence de divers résultats qui peuvent ou ne peuvent pas se produire, et suit chaque événement jusqu'à sa conclusion naturelle tout en calculant toutes les probabilités des événements pouvant se produire.

Par exemple, une banque pourra utiliser des algorithmes d'arbre décisionnel pour décider si elle finance tel ou tel emprunt. Les compagnies pharmaceutiques utilisent ces algorithmes pendant leurs tests pour calculer la probabilité des effets secondaires et le coût moyen du traitement.

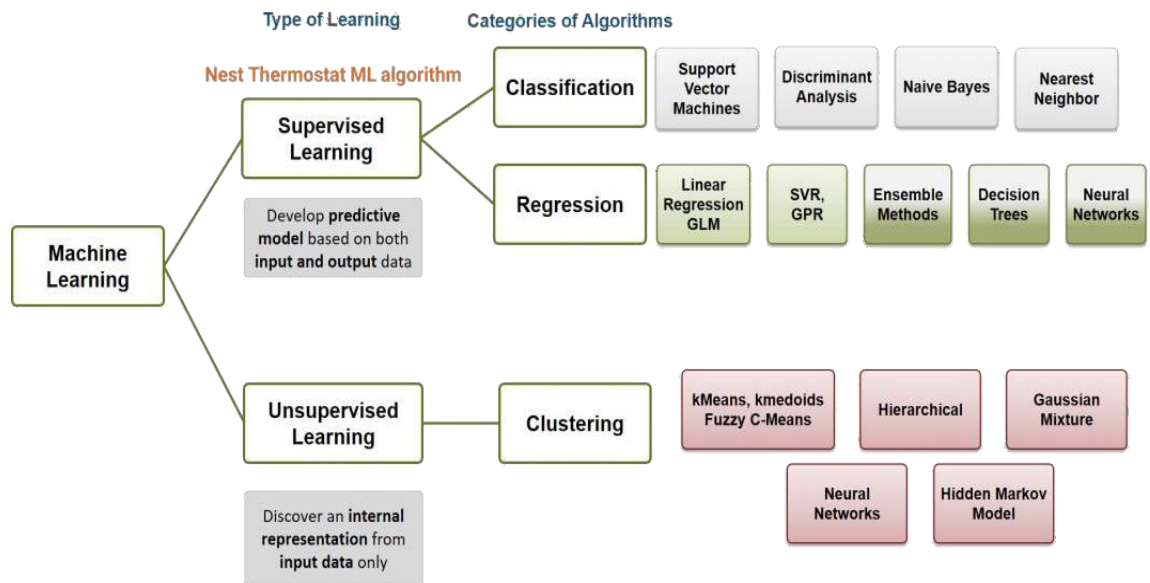
➤ **Algorithmes des forêts aléatoires:**

La forêt aléatoire est un autre algorithme utilisé très couramment. Cet algorithme construit plusieurs arbres de classification et de régression (CART, Classification and Regression Tree), chaque arbre étant associé à différents scénarios et différentes variables initiales. L'algorithme est randomisé, ce qui n'est pas le cas des données. Ce type d'algorithme est utilisé pour la modélisation prédictive de classification et de régression. Par exemple, vous disposez de 1000 observations sur une population, avec 10 variables. Pour construire le modèle CART à utiliser, l'algorithme de forêt aléatoire va prendre un échantillon aléatoire de 100 observations et cinq variables au hasard. L'algorithme répète ce processus à de nombreuses reprises, puis il fait une prédiction finale sur chaque observation. La prédiction finale n'est qu'une fonction correspondant à la somme des différentes prédictions.

➤ **Algorithmes K-Means:**

Les K-Means sont des algorithmes de machine learning sans supervision qui sont utilisés pour résoudre des problèmes de clustering. Ils divisent et classent un ensemble de points de données non affectés d'un label (sans classification externe) en un groupe appelé « cluster » (sans rapport avec les clusters de serveurs). Chaque itération de l'algorithme assigne chaque

point à un groupe présentant des caractéristiques similaires. Les points de données peuvent être suivis dans le temps pour détecter les changements qui se produisent dans les clusters. Les algorithmes K-Means peuvent confirmer des hypothèses sur les types de groupes qui existent dans un dataset spécifique, ou être utilisés pour découvrir des clusters inconnus. Parmi les cas d'usage commerciaux, citons le regroupement de l'inventaire par activité commerciale et la détection d'anomalies dans des données – par exemple, les données brutes collectées par un bot (robot logiciel).



*Fig2.5: Les systèmes de traitement de l'information neuronale Apprentissage automatique Apprentissage non-supervisé Intelligence artificielle, technologie, électronique*

### 2.3.5 IA :

L'intelligence artificielle (IA) est un processus d'imitation de l'intelligence humaine qui repose sur la création et l'application d'algorithmes exécutés dans un environnement informatique dynamique. Son but est de permettre à des ordinateurs de penser et d'agir comme des êtres humains.

Pour y parvenir, trois composants sont nécessaires:

- Des systèmes informatiques
- Des données avec des systèmes de gestion
- Des algorithmes d'IA avancés (code)

Pour se rapprocher le plus possible du comportement humain, l'intelligence artificielle a besoin d'une quantité de données et d'une capacité de traitement élevées. [16]

#### a) **Fonctionnement de l'intelligence artificielle :**

Les machines dotées d'une intelligence artificielle mémorisent des comportements. Ce



travail de mémorisation leur permet par la suite de résoudre des problèmes, et d'agir correctement face à telle ou telle situation. Cet apprentissage se réalise à l'aide de bases de données et d'algorithmes. Ce travail complexe aide la machine à mesurer l'importance d'un problème, à passer au crible les solutions possibles et les situations passées similaires afin de bien agir. C'est en réalité un système de statistiques sophistiqué et très performant qui conduisent la machine à prendre une décision ou à avoir le comportement attendu.

## b) Exemples de technologie d'IA

- **L'automatisation:**

C'est ce qui fait qu'un système ou un processus fonctionne automatiquement. Par exemple, le RPA (Robotic Process Automation, pour automatisation robotique des procédés) peut être programmée pour exécuter des tâches répétitives plus rapidement que les humains.

- **La vision par ordinateur:**

Il s'agit d'une technologie qui capture et analyse l'information visuelle à l'aide d'une caméra.

On l'utilise dans l'identification de signature ou encore l'analyse d'images médicales

- **Le NLP :**

Le traitement du langage naturel est le traitement du langage humain par un programme. La détection de spam en est un vieil exemple. Toutefois, les approches actuelles sont basées sur le machine learning. Elles comprennent donc la traduction de texte, l'analyse des sentiments et la reconnaissance vocale.

- **La robotique:**

Il s'agit de la conception et la fabrication de robots. Ils sont ensuite utilisés dans les chaînes de montage pour la production automobile, ou encore par la NASA afin de déplacer de gros objets dans l'espace. Les chercheurs tentent désormais d'intégrer le machine learning pour construire des robots qui peuvent interagir dans des contextes sociaux.

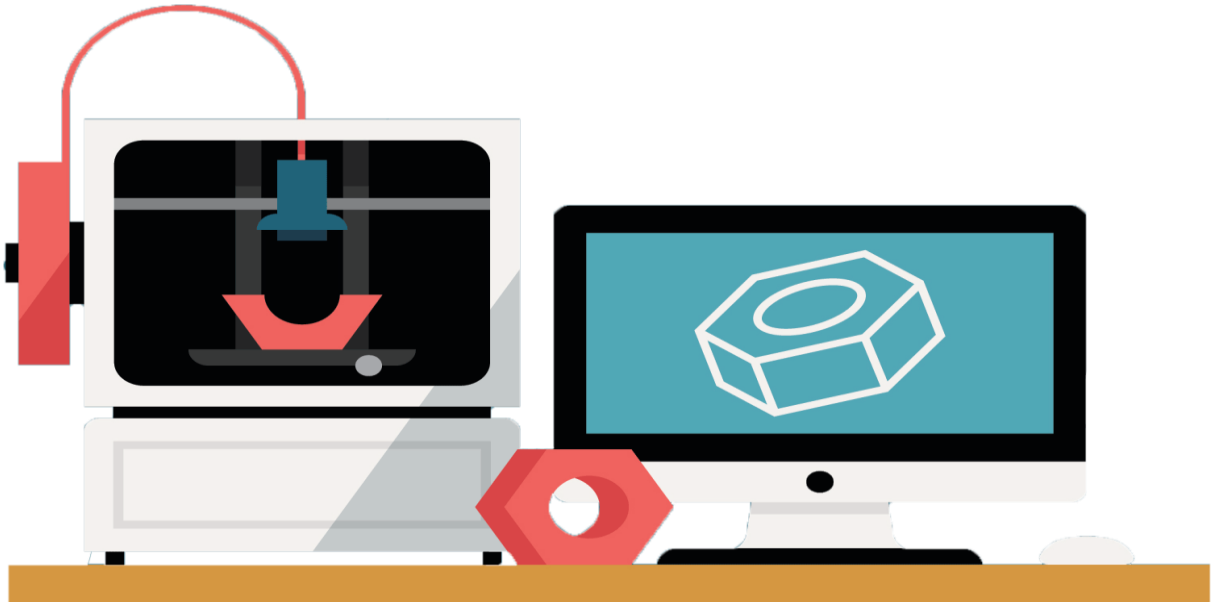
- **Les voitures autonomes:**

Ces véhicules combinent la vision par ordinateur, la reconnaissance d'images et le deep learning. Ainsi, l'intelligence artificielle développe une habileté automatisée à piloter un véhicule. Et ce, tout en restant dans une voie donnée et en évitant les obstacles imprévus, tels que les piétons.

### 2.3.6 Fabrication additive :

La fabrication additive est une méthode de production qui consiste à fabriquer des objets à la

demande, à partir d'un modèle numérique sans utiliser de moule. Plus communément appelée impression 3D, cette technologie a révolutionné les centres de production grâce à des procédés plus efficaces et plus économiques.[17]



*Fig2.6 : prototypage rapide, impression et modélisation 3D*

a) **Les différentes technologies de fabrication additive :**

La fabrication additive est une technologie en constante évolution. Nous passons en revue les procédés de fabrication additive, actuels :

- **Stéréolithographie (SLA pour Stereo Lithography Apparatus) :** la première technique de fabrication additive à voir le jour. Ce procédé utilise une résine liquide qui est solidifiée grâce à un rayonnement UV.
- **Frittage Sélectif par Laser (SLS pour Selective Laser Sintering) :** inventée à la fin des années 80 à l'Université du Texas, avec ce procédé de fabrication additive on agglomère des couches de poudre plastique grâce à un laser pour créer de nouveaux objets.
- **Dépôt de matière en fusion (FDM pour Fused Deposition Modeling) :** ce procédé est le plus connu en raison de sa facilité d'utilisation et de son faible coût, cette technique — brevetée sous le terme FDM — permet la modélisation de prototypes et la fabrication d'objets à petite échelle.
- **Injection de liants (Binder Jetting) :** ce procédé consiste à pulvériser un agent liant sur un lit de poudre qui va lier les particules de poudre entre elles et former un objet solide.

- **PolyJet ou Material Jetting** : il s'agit d'une machine composée d'un laser dirigé qui dépose de la matière sur un lit de poudre métallique. Ce procédé sert à créer des prototypes et à construire des pièces finales en métal, entièrement fonctionnels après quelques jours seulement. Bien qu'il existe de nombreuses techniques qui utilisent le métal et le plastique pour construire des objets couche par couche, de plus en plus d'entreprises expérimentent avec d'autres matériaux, y compris de la nourriture.

**b) Les matériaux utilisés :**

On dénombre de multiples matériaux comme des poudres, des résines, des filaments... tout dépend des types de pièces souhaitées, du traitement thermique, des propriétés mécaniques et d'autres critères

**c) Comment fonctionne la fabrication additive ?**

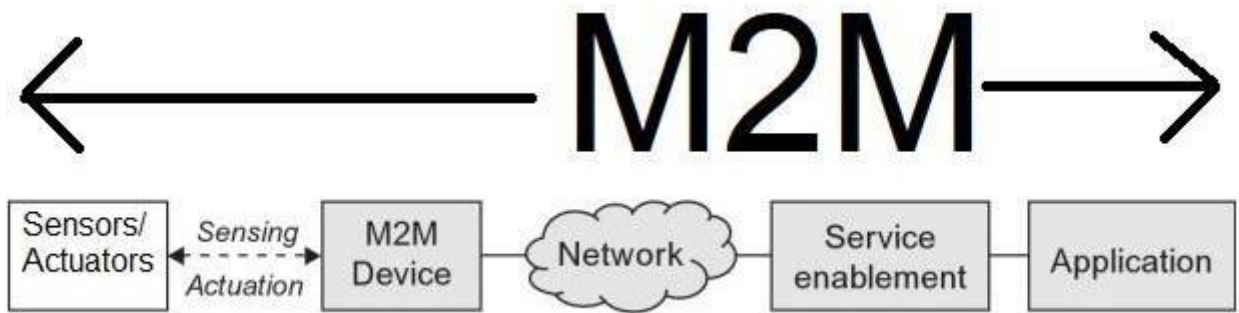
Le procédé de fabrication par ajout de matière se décompose en cinq étapes principales :

1. La création d'un modèle 3D de l'objet que l'on veut reproduire. Le poste de travail doit être équipé d'un ordinateur et d'un logiciel de conception assistée par ordinateur CAD.
2. Le fichier créé sur le logiciel est converti en un format qui découpe virtuellement l'objet en couches successives. Il est généralement converti au format STL (*Standard Triangle Language*).
3. Ce fichier doit être transféré à l'imprimante 3D ou à la machine qui va reproduire l'objet final.
4. Ensuite, la machine imprime en série et couche par couche le nombre d'articles configurés sur le poste de travail.
5. Après un temps de refroidissement, selon les normes de sécurité, l'opérateur récupère le modèle de la ligne de production, qui est prêt à être transporté vers la zone de stockage ou d'expédition.

Il convient de noter que lorsque le produit est conçu sur le logiciel CAD, la ligne de production utilise le modèle numérique pour le produire en série, ce qui accélère cette étape et permet de gagner en efficacité et en précision.

**2.3.7 Communication Inter Machines (M2M) :**

Les technologies de communication inter machines connaissent une croissance. Les technologies M2M créent des réseaux locaux en s'appuyant sur des protocoles et des standards tels que : TCP/IP, OPC DA, OPC UA, DLNA...Etc. [17]



*Fig2.7 : Le déroulement de la communication entre machines (M2M)*

### 2.3.8 Digital Twin :

La première définition du Digital Twin a été donnée en 2002 par Michael Grieves à l'Université du Michigan dans le cadre d'une présentation de l'industrie concernant la gestion du cycle de vie du produit (PLM) [18], où il expliquait que la représentation numérique devrait inclure de manière optimale toutes les informations concernant le système actif qui pourraient être potentiellement obtenues à partir de son inspection approfondie dans le monde réel.

Le jumeau numérique (en allemand: digitaliseur Zwilling) [19] fut défini pour par la NASA en 2010 comme une simulation d'un véhicule ou d'un système utilisant le meilleur modèle possible afin de représenter l'image de son jumeau réel.

Une définition plus détaillée et dans le domaine de la recherche largement reconnue est donnée dans [20]: le « *jumeau numérique est une simulation multi-physique, multi-échelles et intégrée d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, mises à jour par les capteurs pour refléter la vie de son jumeau correspondant.* »

#### a) Les composants d'un Digital Twin :

La figure présente ci-dessous représente un processus de fabrication réel et son jumeau numérique virtuel ainsi que les éléments qui les composent et les relie [21], nous citons:

- **Les capteurs** qui permettent au jumeau numérique de récolter les données en temps réel afin de reproduire le même comportement que le processus de fabrication.
- **Les données** récoltées en temps réel ainsi que les données opérationnelles de l'entreprise, on peut retrouver même les dessins techniques, les données externes sont combinées.
- **Intégration des données** communiquées par les capteurs au monde numérique grâce à la périphérie, les interfaces de communication et la sécurité.
- **Analyse des données** au moyen de simulation et de visualisation par le jumeau

numérique.

- **Actionneurs** – Le jumeau numérique va produire la même action que le modèle réel au moyen des informations transmises par les actionneurs.

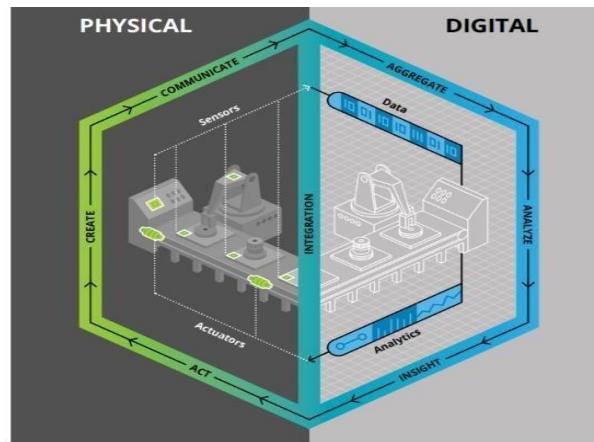


Fig2.8: Les éléments d'un modèle de Digital Twin

**b) Niveau d'intégration :**

Sur la base des définitions données d'un jumeau numérique dans n'importe quel contexte, on pourrait identifier une compréhension commune des jumeaux numériques, en tant que contreparties numériques d'objets physiques. Dans ces définitions, les termes Digital Model, Digital Shadow et Digital Twin sont souvent utilisés comme synonymes. Cependant, les définitions données diffèrent dans le niveau d'intégration des données entre l'homologue physique et numérique. Certaines représentations numériques sont modélisées manuellement et ne sont liées à aucun objet physique existant, tandis que d'autres sont entièrement intégrées à l'échange de données en temps réel. Par conséquent, les auteurs souhaitent proposer une classification des jumeaux numériques en trois sous-catégories, en fonction de leur niveau d'intégration des données. [22]

- **Digital model** : Un modèle numérique est une représentation numérique d'un objet physique existant ou planifié qui n'utilise aucune forme d'échange de données automatisé entre l'objet physique et l'objet numérique

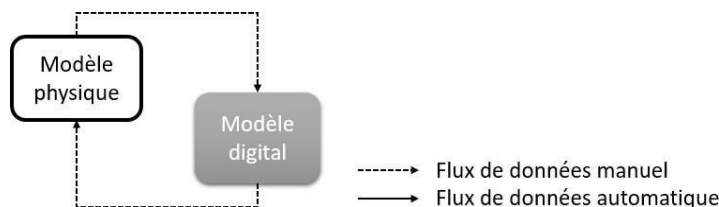
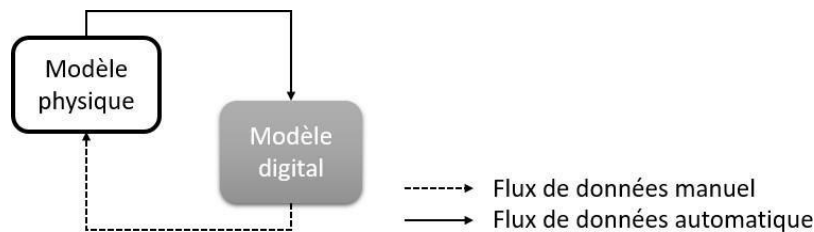


Fig2.9: Flux de données dans un Digital Model.

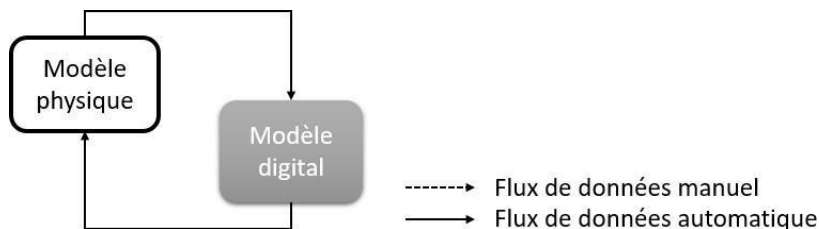
- **Digital Shadow**: Sur la base de la définition d'un modèle numérique, s'il existe en outre un flux de données unidirectionnel automatisé entre l'état d'un objet

physique existant et un objet numérique, on pourrait se référer à une telle combinaison comme ombre numérique. Un changement d'état de l'objet physique entraîne un changement d'état de l'objet numérique, mais pas l'inverse.



*Fig2.10: Flux de données dans un Digital Shadow.*

- **Digital Twin:** Si, en outre, les flux de données entre un objet physique existant et un objet numérique sont entièrement intégrés dans les deux sens, on pourrait l'appeler Digital Twin. Dans une telle combinaison, l'objet numérique pourrait également agir comme instance de contrôle de l'objet physique. Il peut également y avoir d'autres objets, physiques ou numériques, qui induisent des changements d'état dans l'objet numérique. Un changement d'état de l'objet physique entraîne directement un changement d'état de l'objet numérique et inversement.



*Fig2.11: Flux de données dans un Digital Twin*

### 2.3.9 Cyber sécurité :

A l'aube de l'industrie 4.0, l'échange de données industrielles et le contrôle à distance des systèmes de production laissent apparaître un risque critiques de la cyber sécurité. Cela a fini par accroître les mesures de sécurité en faisant recours à des standards et des protocoles de communication plus fiables comme le VPN, P2P, DNSSEC et les étiquettes RFID. [23]

**2.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation du paradigme de l'industrie 4.0 ainsi que ces piliers technologiques principaux. Ces derniers sont indispensables pour l'implémentation de cette nouvelle version d'industrie 4.0

Ce chapitre met en évidence l'apport de nos travaux et situe la problématique dans le contexte de recherche global et réalisation ou nous avons défini les généralités afin de comprendre le cheminement de ce qui suivra.

# **Chapitre 3 :**

# **Maintenance prédictive**



### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous voulons expliquer en première partie autour de la maintenance prédictive, son architecture, ses outils et ses technologies ainsi que la différence entre la maintenance prédictive et préventive.

L'un des outils de de maintenance prédictive c'est l'analyse vibratoire ce qu'on va donc faire une explication de l'utilité, le fonctionnement, et le placement des capteur sur les machines.

### 3.2 Définition de la maintenance prédictive :

La maintenance prédictive ou prévisionnelle est le processus qui consiste à utiliser l'analyse des données, l'apprentissage automatique, l'intelligence artificielle et d'autres techniques de gestion des données pour prédire quand des équipements industriels sont susceptibles de tomber en panne.

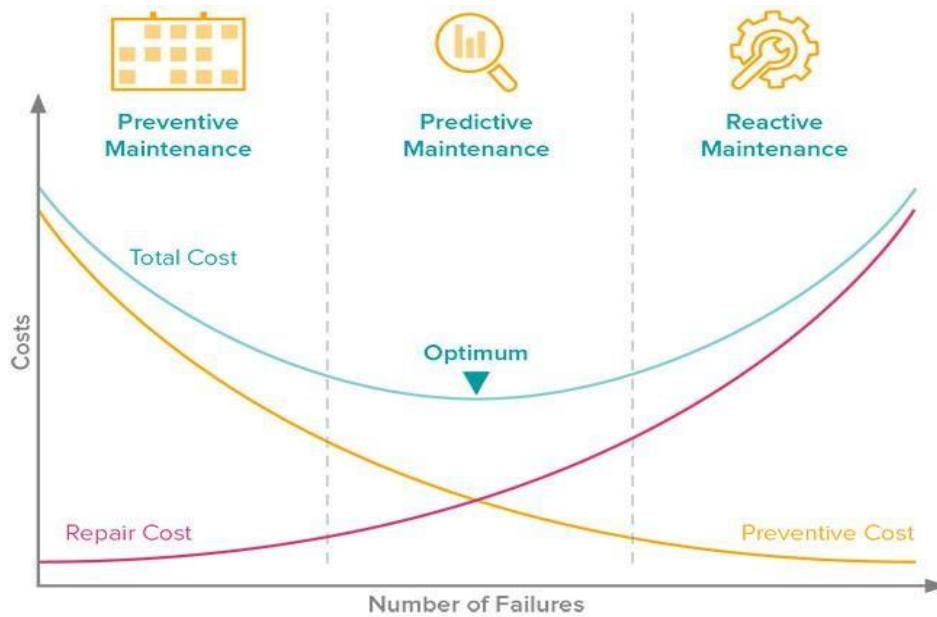
L'objectif de la maintenance prédictive est de détecter la défaillance imminente des actifs avant qu'ils ne tombent en panne, notamment grâce à des systèmes de seuils et d'alertes. Autrement dit, elle s'attaque directement à l'une des pertes de productivité pure pour un industriel, à savoir ces temps d'arrêt machine.

Les enjeux financiers sont évidemment énormes. En moyenne, les outils industriels sont immobilisés 27 heures par mois rien que ça.

Avec l'avènement des IIoT, et plus généralement des données au sein des usines, la maintenance prédictive se développe de plus en plus. Les solutions logicielles et leurs algorithmes sont capables d'analyser les données, de repérer des modèles et de prédire le moment où certains matériels sont susceptibles de tomber en panne.

Cela est particulièrement utile pour la maintenance régulière des équipements, comme les moteurs d'avion ou les lignes de production, par exemple.

La maintenance prédictive peut également être utilisée pour prévoir le besoin de nouveaux équipements industriels. Par exemple, les données des capteurs peuvent montrer que certains composants s'usent, et peuvent donc servir à prédire quand ils devront être remplacés.[23]



*Fig3.1: Comparaison entre MC, MP et maintenance prédictive sur le coût..*

### 3.3 Les différences entre maintenance prédictive et maintenance préventive et corrective:

La maintenance préventive est un travail effectué sur une machine ou un système, en prévention d'une panne. Par exemple, le nettoyage régulier ou le remplacement de petites pièces mécaniques font partis d'opérations de maintenance dites préventives.

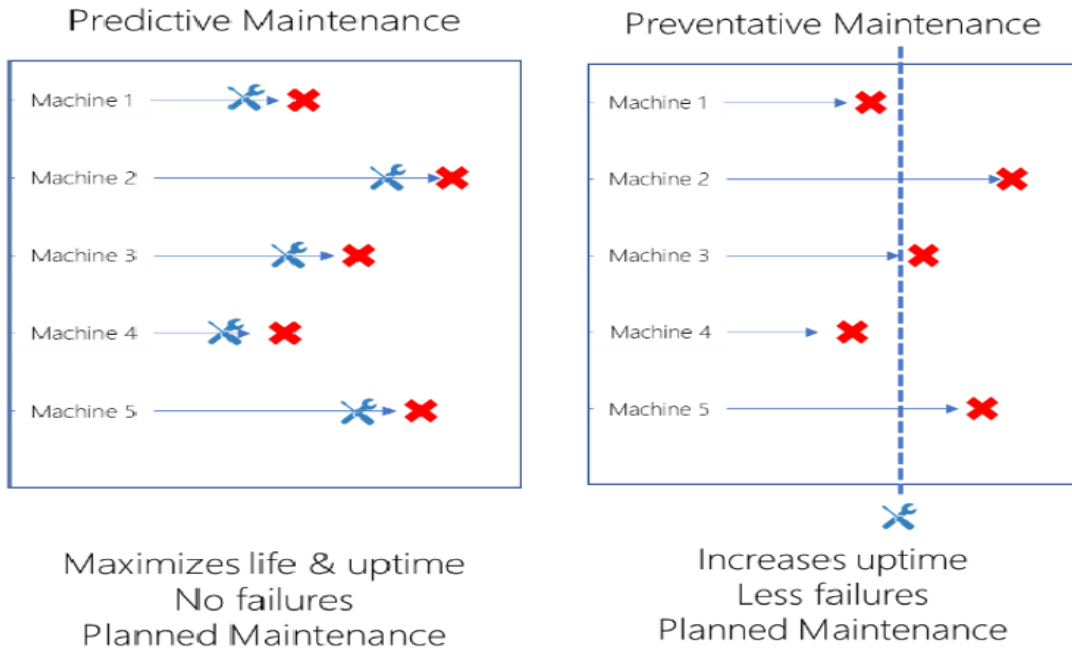
Elle est effectuée régulièrement, souvent à des heures fixes. Elle vise à permettre à une machine, ou à un système, de fonctionner plus longtemps sans qu'une panne ne se produise.

Et toute la nuance est là ! L'approche de la maintenance préventive consiste donc à "faire au mieux" pour que les pannes n'arrivent pas, grâce à des contrôles et des opérations régulières de dépannage; alors que la maintenance prédictive se base sur l'exploitation de données pour anticiper les pannes machines ou le renouvellement nécessaire d'un équipement industriel.

Une autre différence, tout aussi importante, réside dans le coût d'implémentation.

Les solutions nécessaires à la compilation et l'analyse des données seront plus chères à l'acquisition, que de mettre en place des processus de maintenance préventive ou de maintenance corrective.[24]

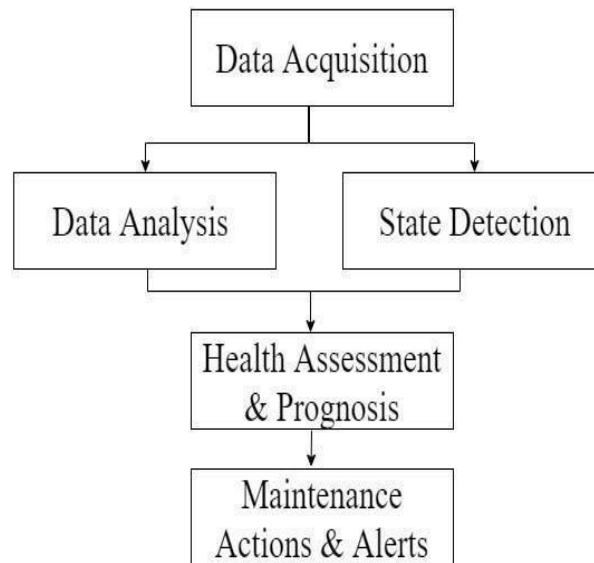
Cependant, il sera bien évidemment indispensable d'effectuer un calcul de retour sur amortissement pour faire son choix!



*Fig3.2 : La différence entre la maintenance prédictive et préventive en temps d'intervention*

**3.4 Architecture de maintenance prédictive :**

Comme tous les systèmes de ML, les systèmes de maintenance prédictive s'appuient sur des données. Comme indiqué précédemment dans ce document, trois types de données sont essentiels à tout système de maintenance prédictive : les métadonnées de l'appareil, la télémétrie de l'appareil, ainsi que les données sur les défaillances et la maintenance.[25]



*Fig3.3 : Architecture de maintenance prédictive.*

### 3.5 Les technologies de l'industrie 4.0 au cœur de la maintenance prédictive:

#### ❖ Les capteurs IIoT pour capter les données:

La première étape de la maintenance prédictive consiste à collecter des données sur l'équipement.

Ces données peuvent être recueillies par des capteurs installés sur l'équipement, tels que des capteurs de pression sur une chaudière, des capteurs de vibration sur un moteur ou des capteurs de tension sur une installation électrique.

Les capteurs IIoT étant reliés au réseau, toutes les données mesurées sont envoyées vers un serveur ou dans le cloud afin d'être exploitées par une solution logicielle qui effectuera l'analyse des données, indispensable pour la maintenance prédictive.



*Fig3.4: Exemple d'interface de télémétrie pour la maintenance prédictive*

#### ❖ IA et ML pour le traitement des données :

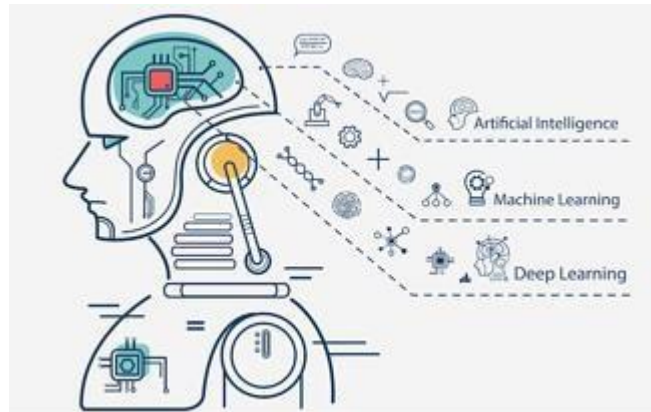
Pour permettre une analyse des données très précise, les techniciens de maintenance peuvent avoir recours à des solutions utilisant l'intelligence artificielle ou les principes du ML. L'analyse des données comprend généralement les étapes suivantes:

1. Les données sont recueillies à partir de plusieurs équipements industriels pour créer un modèle de risque.
2. Les données sur l'état des équipements sont analysées pour identifier d'autres modèles.

3. Les données sont utilisées pour développer un modèle prédictif qui prévoit l'état futur de l'équipement.

Sur la base de ces modèles prédictifs, l'intelligence artificielle va recommander des actions pour prévenir les défaillances ou les pannes de l'équipement industriel.

Tout en surveillant les performances des équipements industriels grâce aux IIoT, la solution va enrichir ses modèles prédictifs au fur et à mesure de son utilisation. On parle alors de ML(maintenance prédictive active).



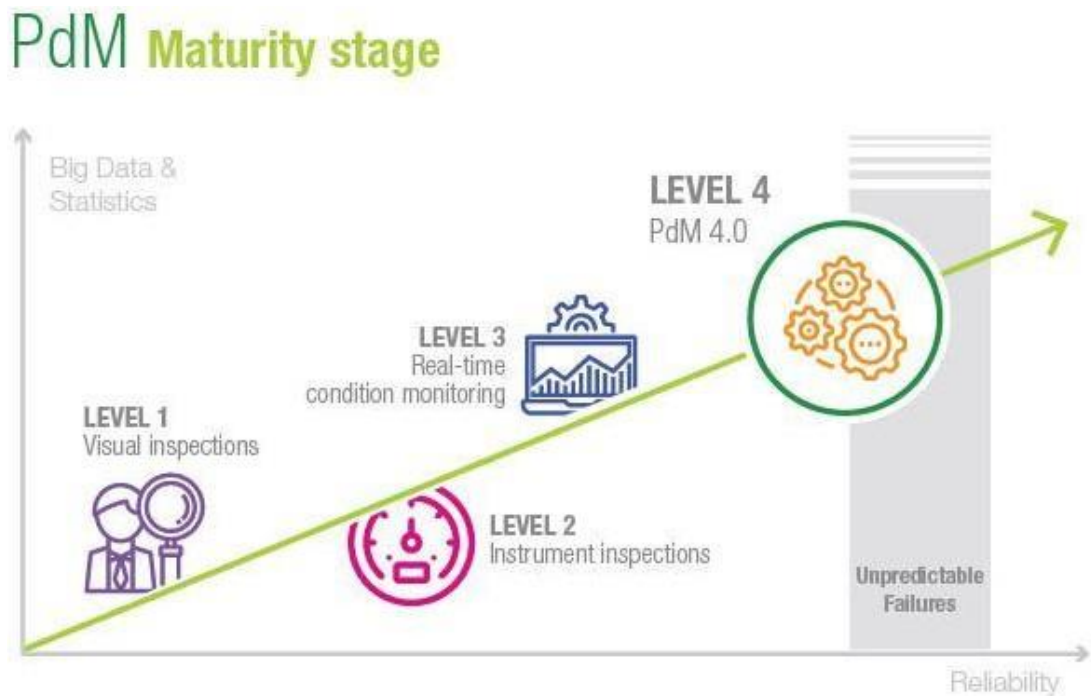
*Fig3.5 : infographie des trois étapes du ML*

Ces solutions permettent surtout des gains de temps et de coûts. Dans certaines industries où le coût de la maintenance (direct et indirect) est très élevé, l'intelligence artificielle permettra de les réduire drastiquement, en anticipant les problèmes et surtout, en ne mobilisant pas les techniciens de maintenance industrielle quand ce n'est pas nécessaire.

### **3.6 Les niveaux de maintenance prédictive :**

- Niveau 1 Inspections visuelles : inspections physiques périodiques ; les conclusions sont basées uniquement sur l'expertise de l'inspecteur.
- Niveau 2 Inspections aux instruments : inspections périodiques ; les conclusions sont basées sur une combinaison de l'expertise de l'inspecteur et des relevés des instruments.
- Niveau 3 Surveillance de l'état en temps réel : surveillance continue en temps réel des actifs, avec des alertes données en fonction de règles préétablies ou de niveaux critiques.
- Niveau 4 Maintenance prédictive avec analyse du Big Data : surveillance continue en temps réel des actifs, avec des alertes envoyées sur la base de techniques prédictives, telles que l'analyse de régression. Deux tiers des répondants sont

encore en dessous du niveau de maturité 3 pour la maintenance prédictive. Seuls 11 % environ ont déjà atteint le niveau 4. Ces résultats indiquent que, malgré le buzz qui entoure l'utilisation de l'analyse des big data sur le marché de la maintenance, celle-ci représente réellement un nouveau niveau de maintenance prédictive, que seules quelques entreprises ont déjà atteint.



*Fig3.6: Les niveaux de maturité de la PdM*

### 3.7 Les types de données:

Les paramètres de détection utilisés sont nombreux. Il peut s'agir :

- De vibration
- De température
- D'imagerie thermique
- De force exercée (jauge de contrainte ou déformation)
- De pression (déformation)
- De couple pour des pièces en rotation
- De son

Concernant la temporalité des collectes de données, elles peuvent intervenir à différents stades des processus :

- Les données en cours de fabrication : ces données en cours de processus sont collectées pendant le fonctionnement de la machine.
- Les données de surveillance : ces données sont collectées lorsque la machine ne produit pas.
- Les données historiques : ces données sont collectées à une certaine date pendant le fonctionnement de la machine.

### **3.8 Les outils de maintenance prédictive :**

Certains outils vont vous aider à optimiser votre maintenance industrielle : vous pouvez alors décider de charger vos équipes en interne de les mettre en place, ou missionner un tiers spécialisé. Ils vont vous permettre, lesquels fonctionneront par ailleurs à capacité normale, ce qui signifie qu'ils n'interféreront pas avec vos calendriers de production. Découvrez ci-dessous les outils de maintenance prédictive les plus couramment utilisés.

#### **a. Imagerie thermique :**

Cette technique d'imagerie technique fonctionne par infrarouge : elle va vous donner la possibilité de prendre une image de l'équipement pour identifier les points les plus chauds. Les composants usés tout comme les circuits électriques défectueux vont en effet émettre de la chaleur, qui va donc être représentée à l'écran. Vous pouvez ainsi localiser tout dysfonctionnement avant que des dommages sérieux ou des pannes ne surviennent.

#### **b. Analyse de la vibration :**

Vous pouvez également utiliser un analyseur de vibrations portatif ou avoir recours aux moniteurs intégrés à la machine, qui vont rendre possible le contrôle des vibrations. Il arrive souvent que certains éléments, tels que les arbres ou les paliers, s'usent rapidement et tombent en panne. Ils vont alors générer des schémas de vibration, sur lesquels des spécialistes pourront se pencher pour en identifier rapidement les causes et en prévenir les conséquences.

Cette technique permet par ailleurs de comparer les relevés d'analyses de la vibration avec les modes de défaillance déjà connus pour localiser les défaillances.

#### **c. Détection des ultrasons :**

Semblable à l'analyse de la vibration, la détection des ultrasons met en évidence des dysfonctionnements qui pourraient autrement passer inaperçus. Les machines vont émettre des sons non perceptibles par l'oreille humaine qui pourront être analysés dès leur

apparition, évitant ainsi bon nombre de problèmes sur les équipements.

Plus concrètement, il est recommandé de procéder à une telle analyse des ultrasons puisqu'elle va mettre en évidence les fissures ou les soudures médiocres avant qu'elles n'engendrent de pannes.

**d. Analyse de l'huile :**

Vous n'êtes pas sans savoir qu'il est crucial, pour toute équipe de maintenance industrielle, de vérifier régulièrement l'état de l'huile ainsi que la présence d'autres particules ou liquides. Une telle analyse permet de détecter les fuites d'autres fluides (comme le liquide de refroidissement par exemple), même si elles restent mineures. Il est également recommandé de mesurer et de détecter les particules de composants métalliques éventuellement présents dans l'huile afin d'identifier les parties de l'équipement qui s'usent.

**e. Test d'émission :**

Nous vous conseillons également, dans le cadre de cette démarche, de mettre en place des tests d'émission de gaz résiduels. Ceux-ci ne serviront pas uniquement à veiller à respecter les normes environnementales et à prouver votre démarche respectueuse de l'environnement, ils vous aideront aussi à analyser la composition desdits gaz, qui en disent long sur l'état des machines et peuvent vous aider à identifier d'éventuels problèmes. C'est en définitive une vérification supplémentaire à mettre en place.

**3.9 Alternatives à la maintenance prédictive :**

Il est communément admis que la maintenance prédictive peut coûter très cher. Les procédés à mettre en place qu'elle implique sont assez onéreux, mais ces coûts sont très rapidement amortis par les résultats obtenus. Vous pourrez en effet réaliser d'importantes économies, puisque vous serez en mesure de prévoir les pannes et d'agir en amont. Cependant, si votre entreprise ne recense pas beaucoup de machines, vous pouvez vous en tenir à des routines de maintenance préventive conventionnelle. Vous aurez donc des opérations de maintenance industrielle à réaliser à intervalles prédéfinis, et cela peut vous suffire : cela sera alors assurément plus économique.

Gardez néanmoins à l'esprit que les routines prédictives vous permettent d'économiser, entre autres, du temps, de la main d'œuvre ou encore de l'argent, et d'identifier des problèmes que vous n'auriez autrement jamais pu résoudre avec de simples inspections de routine. A vous donc de réfléchir à vos besoins



### 3.10 Les rapports pour organiser la maintenance :

Un rapport de maintenance prédictive est un document généré par votre solution logicielle qui résume les résultats d'une analyse de maintenance prédictive.

Il peut inclure des tableaux et des graphiques, des alertes et d'autres informations. Les rapports de maintenance prédictive peuvent aider à identifier de nouveaux modèles, des tendances, et des anomalies.

Véritable outil d'aide à la décision, ils permettent aux responsables de maintenance de planifier les interventions de leurs équipes sur le terrain, uniquement lorsque c'est nécessaire.

### 3.11 La maintenance prédictive des machines :

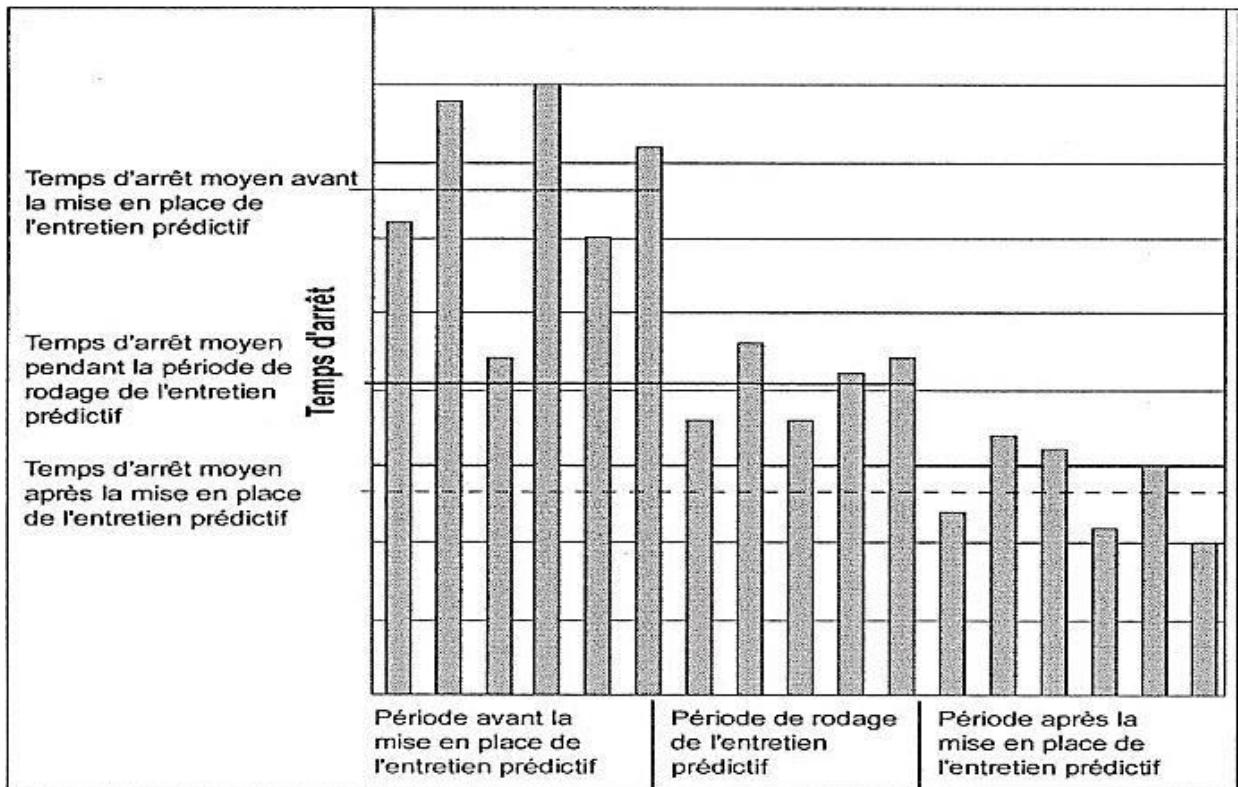
La maintenance prédictive ou (la maintenance suivant l'état de fonctionnement) s'effectue en mesurant régulièrement l'état de fonctionnement de la machine et en n'intervenant que lorsque les mesures révèlent la nécessité, c'est-à-dire lorsque l'élément montre des signes d'usure ou de vieillissement affectant ses performances. La maintenance prédictive concerne

matériels souffrant de défaillance par dérive, dont le remplacement est onéreux ou qui ont un impact important sur la production ou la sécurité.

L'application de cette méthode, bien que d'apparence coûteuse, s'avère rentable puisqu'elle réduit notamment les coûts liés aux arrêts de production, une étude menée par CSI, montrait que l'application de l'entretien prédictif permettait d'augmenter la rentabilité de 25% par rapport à l'entretien préventif et de 50% par rapport à l'entretien correctif. La figure 3.3 montre un exemple de diminution des temps d'arrêts dans une machine de pâtes et papiers

La méthode de maintenance prédictive présente également les avantages suivants :

- La gestion des stocks peut être effectuée en juste à temps, puisque la méthode permet de prédire quand les réparations doivent être effectuées
- Uniquement les pièces défectueuses seront remplacées, puisque la méthode permet d'établir un diagnostic préalable de défauts
- La planification des périodes de travail est bien réglée
- La surveillance périodique évite les ruptures catastrophiques; élimine virtuellement toutes les défaillances inattendues et améliore la disponibilité, la sécurité et le rendement d'installation



*Fig3.7: réduction des temps d'arrêts avec l'entretien prédictif*

Cette méthode présente par contre les inconvénients suivants :

- Les couts directs de surveillance sont accrus (matériels de surveillance et main-d'oeuvre)
- Une informations spécialisée en vibration et en essais non destructifs doit être donné a l'équipe de maintenance, à cet effet, un sondage sur les méthodes de maintenance mené par la centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) auprès de l'industrie pétrolière, de l'industrie des pâtes et papiers, des cimenterie, des compagnies de transformation du métal..etc. avait relève que la plus grosse difficulté des équipes de maintenance résidait dans l'interprétation des enregistrements vibratoires pour établir un diagnostic des défauts de machines.

Parmi les outils les plus couramment utilisés pour réalise cette maintenance prédictive, il ya :

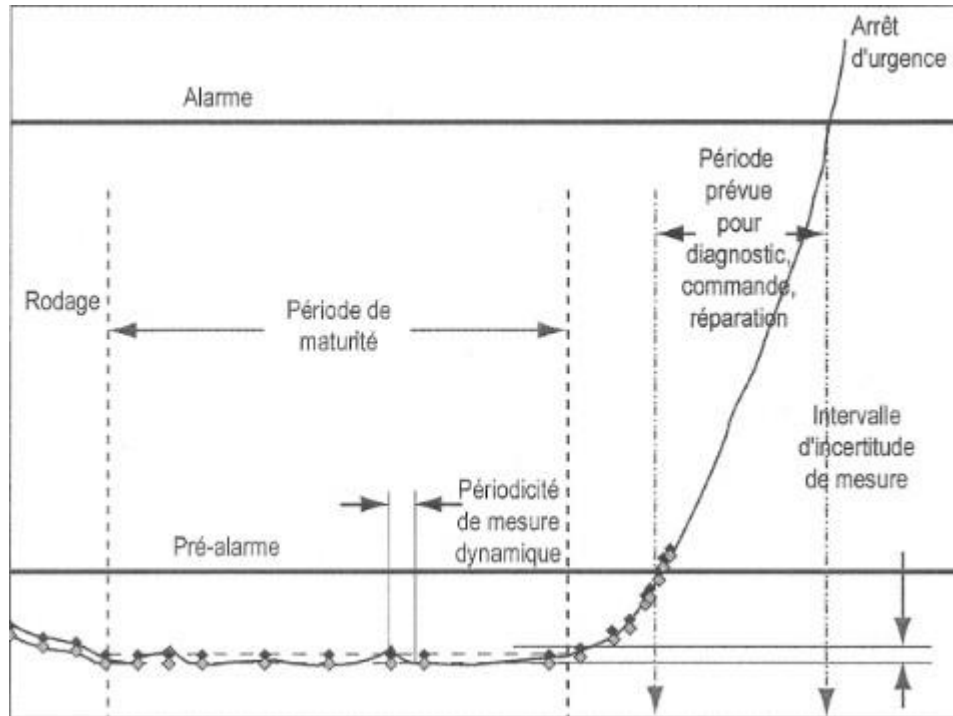
- L'analyse d'huile qui permet de qualifier et quantifier les particules métalliques résiduelles provenant de l'usure dans un bain d'huile.
- La thermographie pour mesurer l'échauffement des pièces de contact
- La mesure du bruit, lorsque le milieu environnât le permet

- L'analyse des vibrations, qui est une image des défauts mécaniques des systèmes

### 3.12 Méthodologie générale de la méthode d'entretien prédictif :

1. On doit au préalable choisir un paramètre de suivi, représentatif de fonctionnement de la machine (vibration, bruit, température, particule métalliques dans l'huile ..etc.)
2. On doit suivre l'évolution de l'amplitude de ce paramètre périodiquement. Les niveaux enregistrés sont comparés aux niveaux déterminés préalablement. La courbe d'évolution obtenue s'appelle la courbe de tendance (*fig3.8*). La courbe de tendance peut être divisée en trois périodes, soit la période infantile ou de rodage, la période de maturité et la période de veillesse ou d'usure. La périodicité de la prise de mesure peut être établie selon l'étude de fiabilité et peut être programmée dynamiquement en fonction de l'évolution de l'usure, la périodicité devant être plus fréquente pendant la période de veillesse que pendant la période de maturité.
3. Etant donné que chaque prise de mesure n'est pas réalisée dans des conditions exactement semblables (variation de la charge, de la température, erreur de mesure Etc.) Les paramètres mesurés vont présenter une certaine variation et on doit établir un intervalle d'incertitude de cette variation. Cet intervalle peut être déterminé à l'aide de l'écart type des mesures, calculé pendant la période de maturité de l'équipement.
4. Des seuils d'amplitude du paramètre suivi (appelés alarmes) doivent être déterminés. Une première alarme (appelée pré-alarme) permet de prédire la durée  $T_d$  pour effectuer le diagnostic, commander les pièces de rechange et planifier les travaux de réparation. Dès que le paramètre représentant l'état de la machine à un moment  $T_f$ , dépasse un niveau pré-déterminé, une alarme d'urgence informe le personnel concerné et éventuellement stoppe la machine. Les niveaux d'alarme présélectionnés sont déterminés soit d'après l'historique de la machine lorsque celui-ci est disponible, soit d'après des guides que l'on retrouve dans la littérature
5. Lorsqu'une pré-alarme a été déclenchée, on doit analyser les données pour établir avec certitude le diagnostic du défaut, puis commander des pièces de rechange (la gestion de stocks importants étant rendue moins nécessaire).
6. Une étude de régression sur l'évolution de l'amplitude des paramètres de surveillance

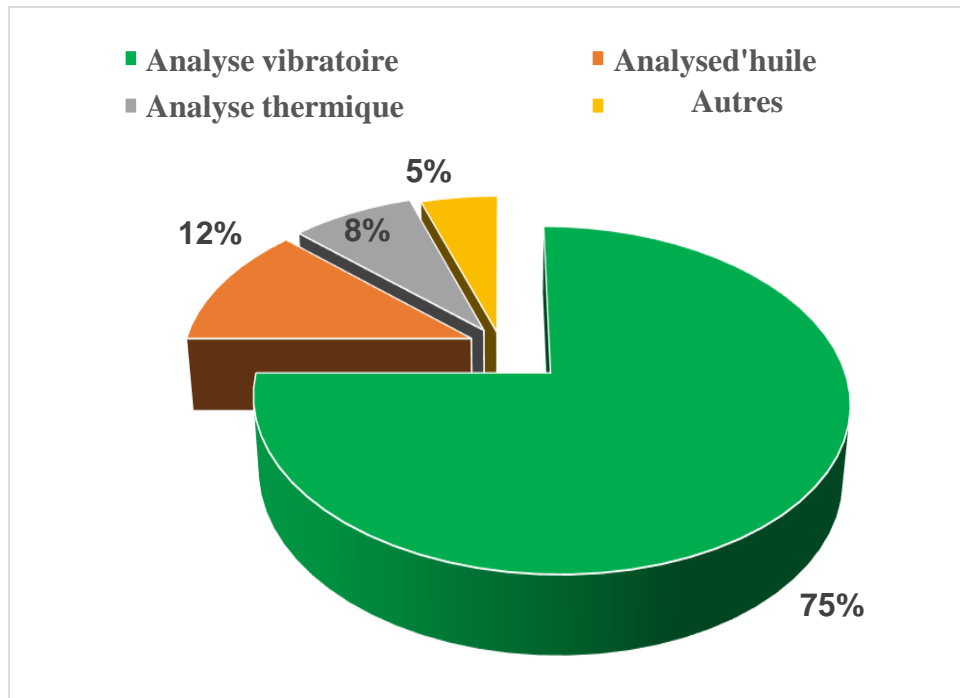
permet de prédire, par extrapolation du courbes, quand la machine devra être révisé en fonction de niveaux d'alarme prédéterminés. L'arrêt pour réparation peut alors être fixé au moment jugé le plus convenable. Un programme de travail comprenant les besoins de main-d'œuvre, outillage ou pièces de rechange peut être préparé avant l'arrêt programmé



**Figur3.8:** courbe de tendance

### 3.13 Analyse vibratoire:

L'analyse vibratoire figure parmi les techniques de la maintenance préventive conditionnelle et prédictive, dédiées aux machines tournantes, les plus répandues (*voir fig3.9*). Cette place qui lui revient est due aux multiples avantages, qu'elle offre. En effet, cette technique permet, principalement, de diminuer les temps d'arrêt, d'augmenter la disponibilité et d'améliorer la sécurité. Assurant, ainsi, la compétitivité de l'entreprise dans le monde cruel de l'industrie.[26]



*Fig3.9: Classification des techniques de la maintenance préventive dédiées aux machines tournantes .*

Le principal objectif de l'analyse vibratoire est d'identifier les défauts dans une machine, puis de lancer une alerte afin de préparer une intervention de réparation avant que les défauts atteignent les seuils tolérés. Ce qui permet d'assurer la qualité et la continuité de la production

### 3.14 Mesure des vibrations:

La norme AFNOR définit la vibration comme : « la variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite, qu'une certaine valeur moyenne ou de référence ». [Afnor 90] Ainsi, une vibration peut être caractérisée par trois paramètres :

- **La fréquence (F):** C'est le paramètre caractérisant la vitesse d'oscillation (nombre d'oscillations / seconde), elle s'exprime en **Hz (Hertz)** et elle est égale à l'inverse de la période ( $F=1/T$ ).
- **L'amplitude:** Elles expriment soit en déplacement, soit en vitesse, soit en accélération.
- **La phase:** Elle permet de déterminer la position de la particule d'un corps oscillant à un instant donné, en d'autres termes c'est l'indication de la situation instantanée

d'une grandeur qui varie cycliquement, elles expriment en **Radian**.

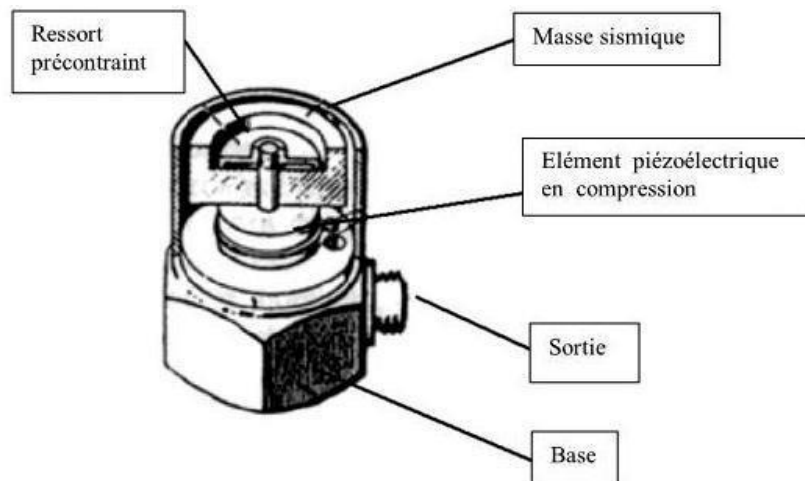
La mesure de vibration se fait à l'aide des capteurs fixés sur la structure contrôlée.

Généralement, un capteur parmi les trois suivants est utilisé :

### 3.14.1 Accéléromètres:

#### ➤ Principe:

Un accéléromètre piézoélectrique (fig3.10), est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.



*Fig3.10:* schéma de principe d'un accéléromètre

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

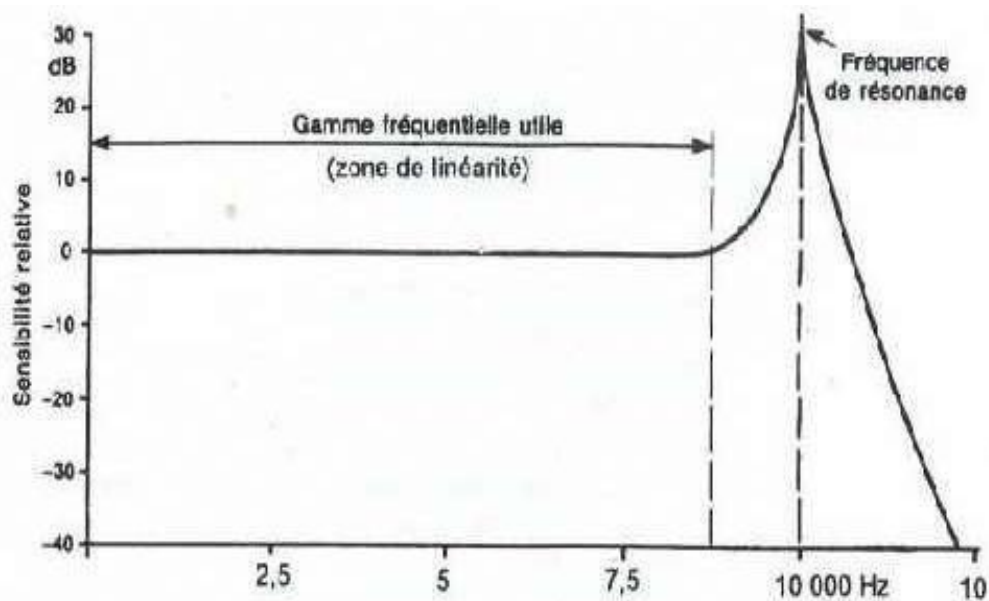
- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

### ➤ Réponse d'un accéléromètre:

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la fig 3.11 montre l'existence de deux zones:

Une zone de linéarité du capteur: c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée avec une bonne sensibilité. Cette zone définit la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.

Une zone englobant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est fautive. [27]



*Fig3.11: Réponse en fréquence d'un capteur Piézoélectrique.*

### 3.14.2 Choix de l'emplacement de capteurs:

#### ❖ Emplacement

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile (fig3.12 et 3.13) [26]. Ces efforts sont de deux types:

#### ❖ Efforts tournants

Ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;

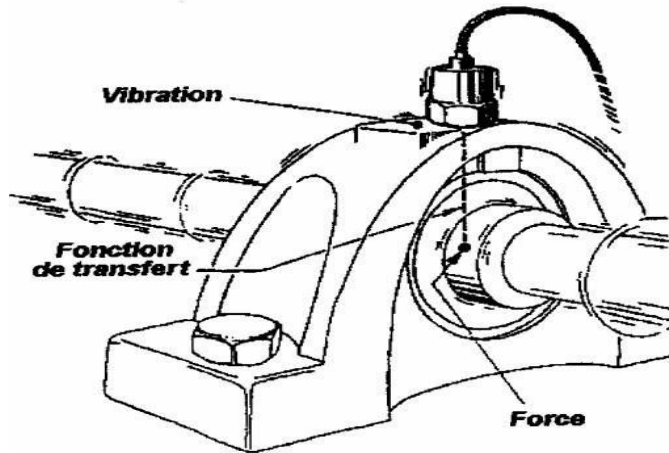


Fig3.12: Fixation du capteur sur palier

❖ Efforts directionnels

Ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial fig3.14), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

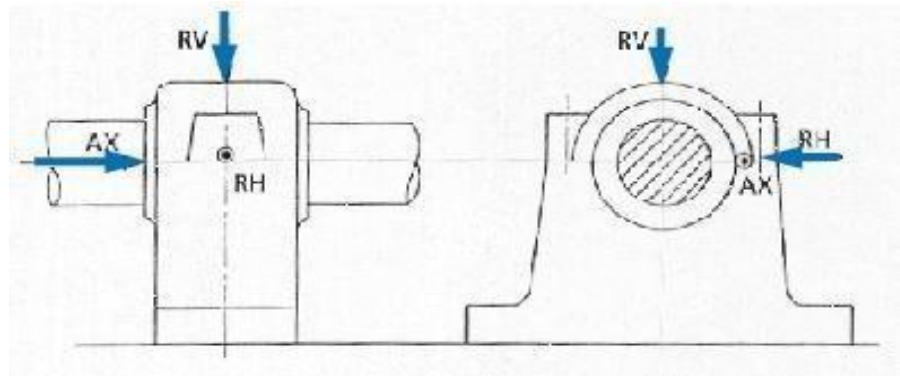


Fig3.13: Choix directionnel pour la prise de mesure

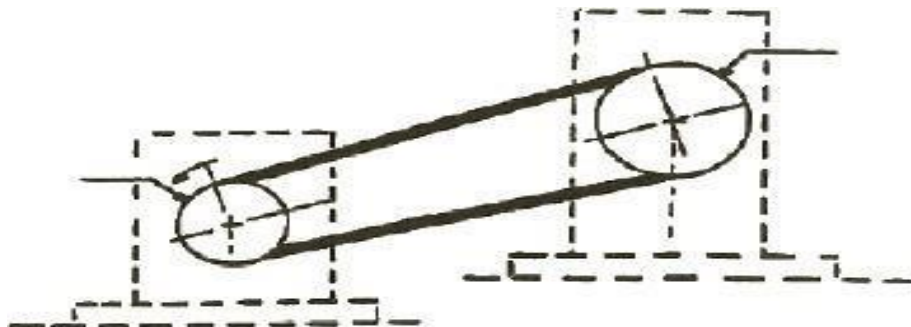


Fig3.14: direction favorisée pour transmission par poulies courroies



### 3.14.3 Consignes pour la fixation des capteurs:

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur [fig3.15].
- L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure [fig3.16].

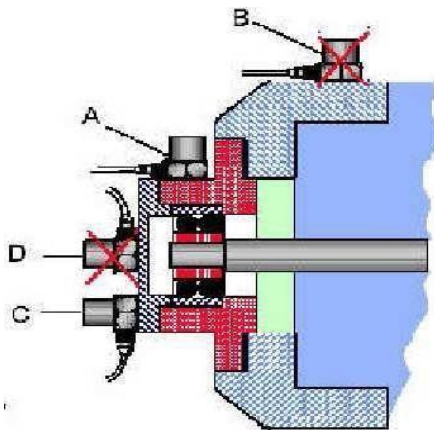


Fig3.15: choix de l'emplacement du capteur

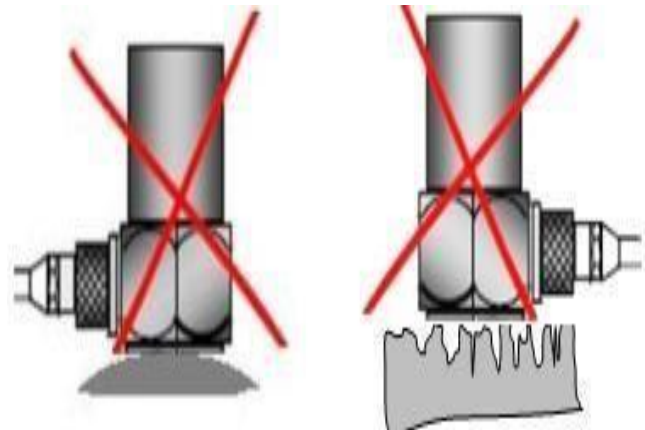


Fig3.16: Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes

- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs [fig3.17].
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repères, soit par la peinture, soit place de goujons. [26]

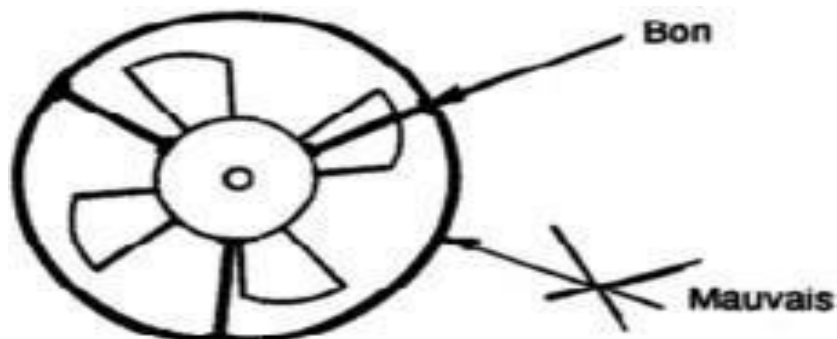
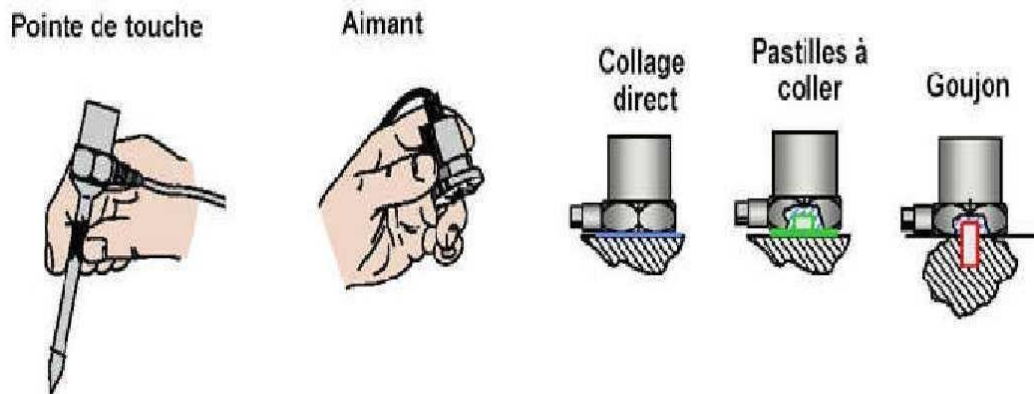


Fig3.17: Choix de l'emplacement du capteur

### 3.14.4 Modes de fixation:

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation (*fig3.18*).

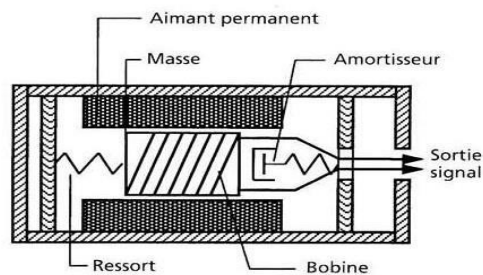
Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur. [27]



*Fig3.18: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation*

### 3.14.5 Vélométries:

Dans les capteurs de vitesses, ou vélocimétries, le mouvement d'une masse à l'intérieur d'une bobine provoque une variation de flux, générant, ainsi, une induction de courant dans la bobine. Ces capteurs ont une faible bande passante (10 à 1000Hz) .



*Fig3.19: Vélométrie .*

### 3.14.6 Capteurs de déplacement:

Les capteurs de déplacement sont très utilisés dans l'industrie. Ils permettent de mesurer, sans contact, le déplacement réel. Par contre, ils sont sensibles aux hautes fréquences .

**3.15 Conclusion :**

A travers ce chapitre qui donne une image explicite de la maintenance prédictive ses technologies, son architecture, bien que ses outils. Ce qu'il faut extraire de ce chapitre c'est les principales méthodologies pour implémenter la maintenance prédictive c'est bien ses outils et ses technologies, celle-là donne une idée sur notre contribution le chapitre

# **Chapitre 4 :**

# **Réalisation et résultats**

#### **4.1 Introduction :**

Notre contribution et réalisation touche beaucoup de piliers de industrie 4.0 et les technologies de maintenance digitale comme le cloud, IIOT, BIG DATA, smart sensor, M2M communication, bien que le monitoring en temps réel des mesures , la collection l'historique et l'acquisition de données. Donc nous voulons réaliser un modèle de collection de donnée des mesures de vibrations des machines tournantes pour le monitoring de ces données en temps réel et les sauvegarder en cloud, en utilisant des modèles minimiser d'arduino.

Comme 1<sup>er</sup> partie , nous allons présenter notre cahier de charge qui comprend l'environnement de travail, les composants utilisé , le câblage , configuration des modules utilisé , les codes pour exécuter .

La 2<sup>eme</sup> partie va comprendre l'exécution de système réalisé , les résultats et l'interprétation .

#### **4.2 L'environnement de travail :**

##### **4.2.1 Définition logiciel ARDUINO IDE :**

Les créateurs de Arduino ont développé un logiciel pour que la programmation des cartes arduino soit visuelle, simple et complète à la fois.

C'est ce que l'on appelle une IDE, qui signifie Integrated Development Environment ou Environnement de Développement « Intégré » en français (donc EDI).

" L'IDE Arduino est le logiciel qui permet de programmer les cartes Arduino. "

L'IDE affiche une fenêtre graphique qui contient un éditeur de texte et tous les outils nécessaires à l'activité de programmation.

Vous pouvez donc saisir votre programme, l'enregistrer, le compiler, le vérifier, le transférer sur une carte arduino...[28]



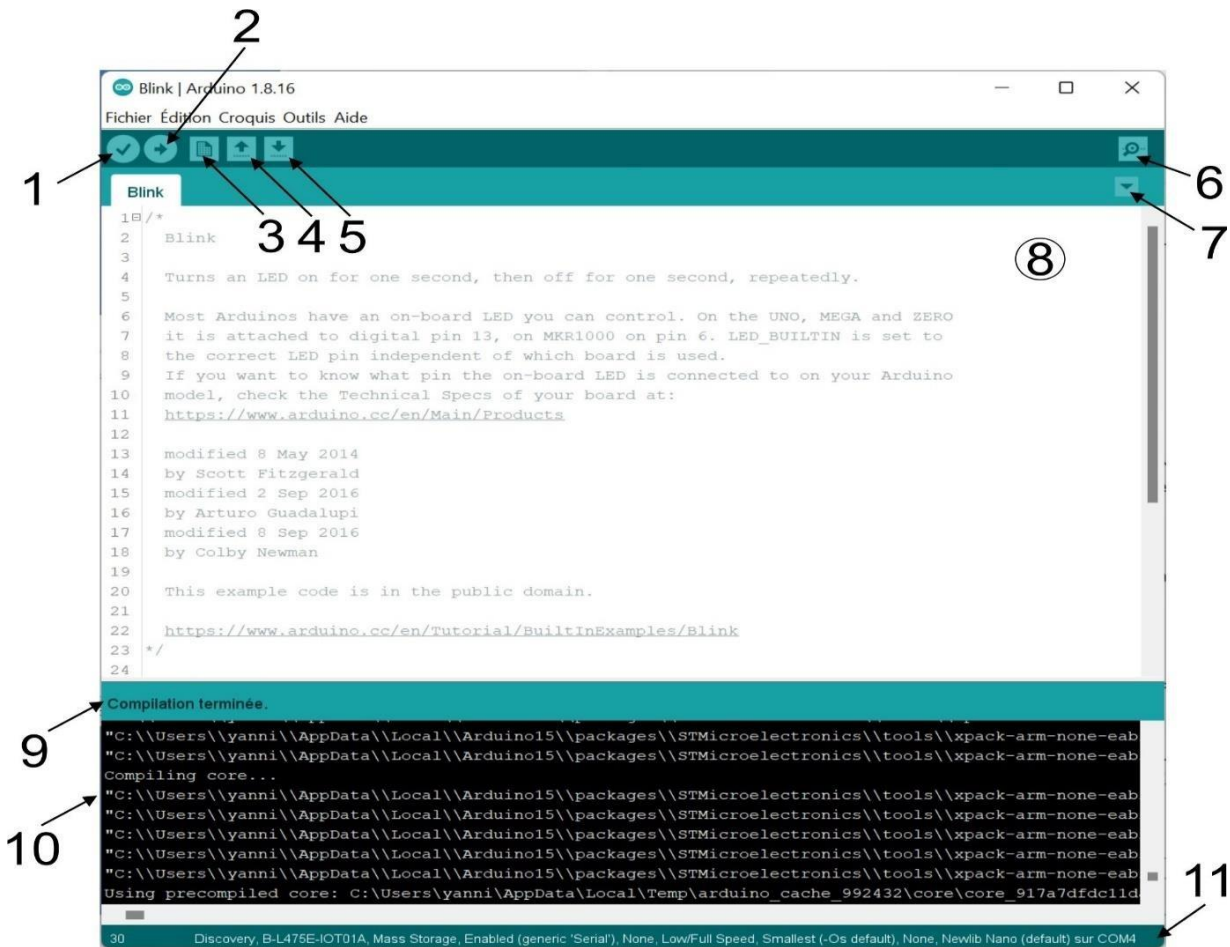
*Fig 4.1 : Interface logiciel ARDUINO IDE*

- **Menu** : les différents éléments du menu permettent de créer de nouveaux sketches (programmes), de les sauvegarder, et de gérer les préférences du logiciel et les paramètres de communication avec votre carte esp8266 Node MCU.

Le menu comprend :

- ❖ **File** : pour créer, sauvegarder en spécifiant la destination, et d'appeler un programme.
- ❖ **Edition** : Pour couper, copier, coller, supprimer, sélectionner..., etc.
- ❖ **Sketch** : regroupe les fichiers réalisés.
- ❖ **Tools** : pour spécifier le type de la carte, le port série, formater, recharger et réparer l'encodage, graver la séquence d'initialisation, de la carte branchée sur l'ordinateur.

➤ **Les boutons :**



- **(1) Bouton « Vérifier »**  
Lorsque vous appuyez sur ce bouton, le programme écrit dans votre sketch est transformé en instructions binaires par le compilateur gcc, puis il est « lié » pour fournir un fichier appelé *Firmware*.
- **(2) Bouton « Téléverser »**  
Réalise les mêmes opérations que le bouton « Vérifier » et transfère finalement le firmware dans le microcontrôleur de la carte sélectionnée.
- **(3) Bouton « Nouveau »**  
Ouvre un nouveau sketch vide comme le fait la commande « Fichier / Nouveau (Ctrl + N) ».
- **(4) Bouton « Ouvrir »**  
Appelle la commande « Ouvrir » autrement accessible par « Fichier / Ouvrir (Ctrl

+ O) ». Ouvre un sketch sélectionné par l'utilisateur.

- **(5) Bouton « Enregistrer »**

Appelle la commande « *Enregistrer* » autrement accessible par « *Fichier / Enregistrer (Ctrl + S)* ». Enregistre un sketch sélectionné par l'utilisateur.

- **(6) Bouton « Moniteur série »**

Appelle le moniteur série connecté au ST-LINK pour afficher les messages générés par les appels à `Serial.print(...)`; (et ses variantes). La fenêtre du moniteur série a l'aspect ci-dessous, pour une carte connectée au port COM4 (sous Windows). Vous noterez que le *débit du port série* doit être précisé dans cette fenêtre, ici 9600 bauds, ainsi que le format du séparateur de lignes. Ces valeurs doivent être les mêmes que celles écrites dans le sketch Arduino autrement l'affichage sera illisible.



- **(7) Pour gérer les onglets**

L'IDE est capable de gérer plusieurs onglets via ce menu.

- **(8) Fenêtre de l'éditeur**

C'est là que s'affiche le listing en C++ du programme Arduino, que vous pourrez modifier.

- **(9) Barre de statut**

Indique ce que l'IDE est en train de faire (compilation, transfert du sketch...).

- **(10) Zone de messages**

Ici s'affichent les messages de compilation, les messages de link, les messages d'erreur, etc. Il est possible de copier le contenu de cette zone (qui peut être conséquent) dans le presse-papier.

- **(11) Informations sur la configuration**



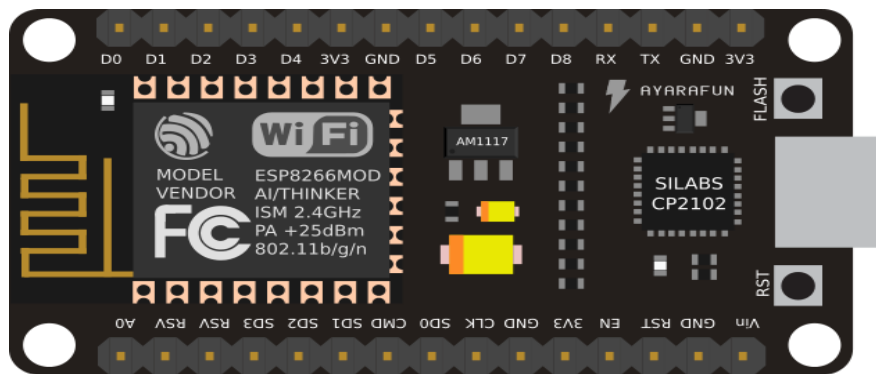
Rappelle une partie des informations renseignées dans le menu « Outils ».

#### 4.2.2 ESP8266 NODE-MCU

NodeMCU est une plate-forme open source, matérielle et logicielle basée sur un SoC Wi-Fi ESP8266 fabriqué par Espressif Systems. Le terme ‘NodeMCU’ se réfère par défaut au firmware plutôt qu'aux kits de développement. Le firmware, permettant nativement l'exécution de scripts écrits en Lua. L'ESP 8266 est un circuit intégré à microcontrôleur avec connexion Wi-Fi de taille réduite, permet de connecter un microcontrôleur à un réseau Wi-Fi et d'établir des connexions TCP/IP avec des commandes AT.

Il existe à ce jour plus de 12 versions de modules qui ont été construits à partir de ce composant.

Chaque version est identifiée par une nomenclature sous la forme : ESP-01, ESP-02 ...ESP-12 [24].



*Fig 4.2 : La carte NodeMCU (ESP8266)*

#### L'ESP8266 peut se programmer de plusieurs façons

- Avec des scripts Lua, interprétés ou compilés, avec le firmware NodeMCU.
- En C++, avec l'IDE Arduino,
- En JavaScript, avec le firmware Espruino,
- En Micro Python, avec le firmware MicroPython5 ou Circuit Python.
- En C, avec le SDK d'Espressif.
- En C, avec le SDK esp-open-sdk7 basé sur la chaîne de compilation GCC.
- En Go, avec le Framework Gobot.

##### a. Description technique d'ESP8266

Les spécifications principales de l'ESP8266 sont :

- WIFI direct 802.11 b/g/n,
- Une pile de protocoles TCP/IP intégrés.
- Processeur 32 bits intégré de faible puissance.
- Il fonctionne à 3,3 V et ne possède pas de régulateur de tension, il faudra donc bien veiller à

toujours l'alimenter en 3,3 V et non en 5 V ou depuis un pack de piles.

- Le processeur est cadencé à 80 MHz (contre 16 MHz pour carte Arduino UNO) et possède 80 KB de RAM (contre 2,5 KB pour une carte Arduino UNO).
- Il intègre une mémoire flash externe d'environ 400 KB (contre 32 KB pour une carte Arduino UNO) [24].

### b. Les avantages d'ESP8266

- Pas cher.
- Environnement de programmation clair et simple (Arduino).
- Outils de développement Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.
- Nombreux conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, sites persos, etc.).
- Existence de « Shield » (boucliers en français) : ce sont des cartes supplémentaires .

### c. Schéma interne d'ESP8266

L'ESP8266 possède plusieurs entrées-sorties comme le montre le schéma ci-dessous :

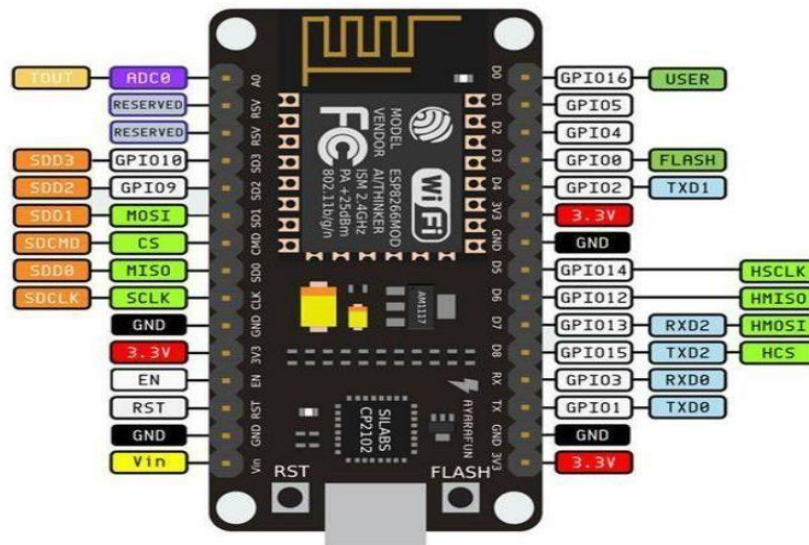


Fig 4.3 : Composition d'une carte NodeMCU (ESP8266)

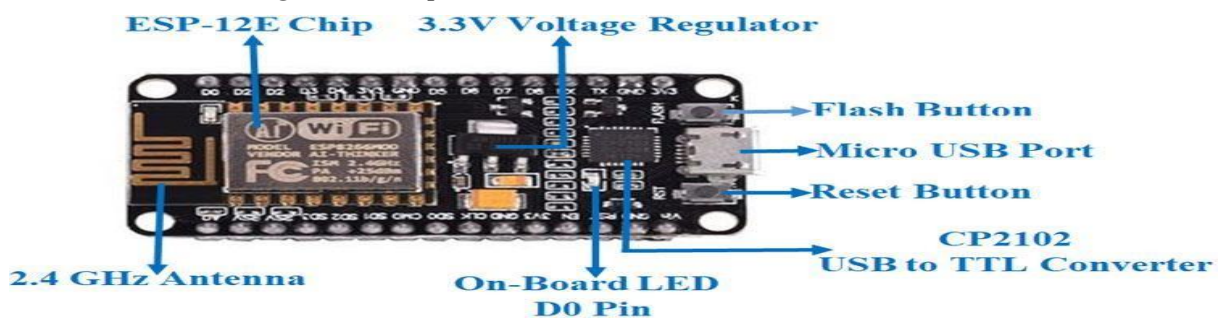


Fig4.4 : Les différents composants d'esp8268.

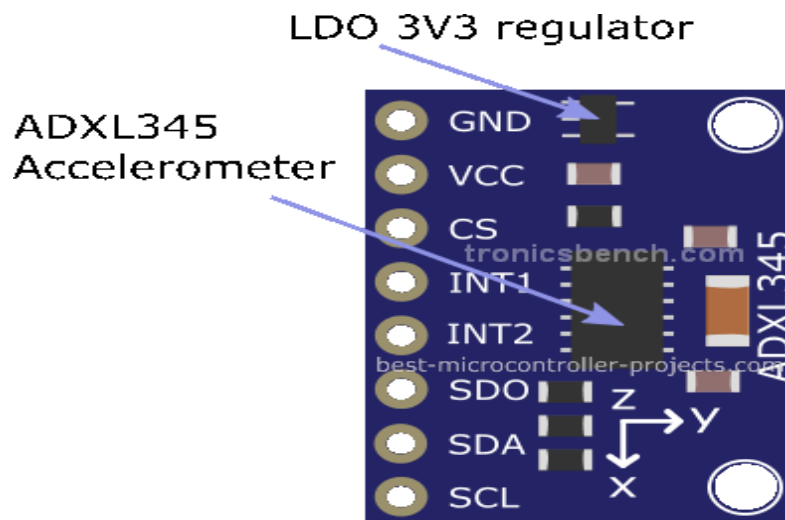
### 4.2.3 L'accéléromètre ADXL345 :

ADXL345 d'Analog Devices est un accéléromètre triaxial avec des mesures haute résolution (13 bits) jusqu'à  $\pm 16$  g. Les données de sortie numériques sont mises en forme en tant que complément à deux 16 bits, et sont accessibles par le biais d'une interface numérique I<sup>2</sup>C ou SPI (3 ou 4 fils).

L'ADXL345 est parfaitement adapté pour les applications de dispositifs mobiles. Il mesure l'accélération statique de la gravité dans les applications de détection d'inclinaison, et l'accélération dynamique résultant de mouvements ou de chocs. La haute résolution (4 mg/LSB) permet de mesurer les variations d'inclinaison inférieures à 1,0°.

Plusieurs fonctions de détection spéciales sont fournies. La détection d'activité et d'inactivité détecte la présence ou l'absence de mouvement, et si l'accélération sur un axe dépasse le niveau défini par l'utilisateur. La détection de toucher permet de détecter les pressions simples et doubles. La détection de chute libre permet de détecter si le dispositif tombe. Ces fonctions peuvent être mappées sur une ou deux des broches de sortie d'interruption. Un tampon FIFO à 32 niveaux intégré en attente de brevet peut être utilisé pour stocker des données et réduire l'intervention du processeur hôte.

Les modes basse consommation permettent la gestion de l'alimentation intelligente basée sur le mouvement avec mesure de l'accélération active et détection de seuil à très faible dissipation de puissance. L'ADXL345 est fourni dans un boîtier mince et compact en plastique à 14 broches de 3 mm × 5 mm × 1 mm.



*Fig4.5 : Accéléromètre ADXL345*

➤ **Fonctionnalités et avantages**

- Ultrabasse consommation : seulement 23  $\mu\text{A}$  en mode de mesure et 0,1  $\mu\text{A}$  en mode veille à  $V_s = 2,5 \text{ V}$  (typique)
- La consommation énergétique évolue automatiquement avec la bande passante
- Résolution sélectionnable par l'utilisateur :
  - Résolution 10 bits fixe
  - Résolution intégrale, où la résolution augmente avec la plage g, jusqu'à une résolution de 13 bits à  $\pm 16 \text{ g}$  (maintenant le facteur d'échelle de 4 mg/LSB dans toutes les plages g)

#### 4.2.4 ARDUINO IOT CLOUD:

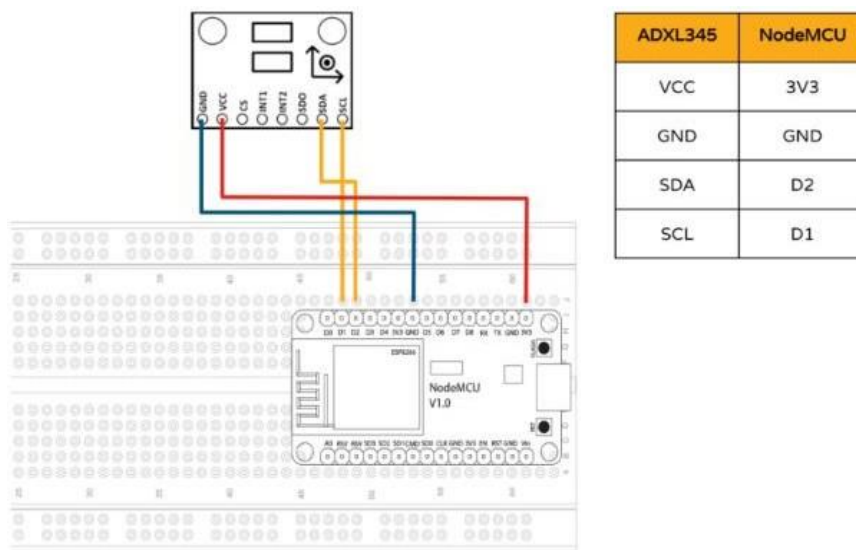
**Arduino Créer** est une plateforme en ligne intégrée. Cette plate-forme permet aux créateurs et aux développeurs professionnels d'écrire du code. Vous avez également accès au contenu et pouvez boards configurer. Il est également possible de partager vos projets avec d'autres. Passez d'une idée à une réalisation plus rapidement que jamais **Projet IoT**. Avec Arduino Create, vous pouvez utiliser une version en ligne de l'IDE. Ici, vous pouvez connecter plusieurs appareils au **Cloud IoT Arduino**. Vous pouvez contrôler chaque aspect de votre projet directement à partir d'un seul tableau de bord à gérer. L'environnement est accessible aux débutants ainsi que productif pour les professionnels.



*Fig4.6 : interface IOT CLOUD ARDUINO*

### 4.3 Câblage et installations :

nous commençons par la connexion des modules électroniques qu'on a. D'abord on commence par les 2 câbles d'alimentations VCC et GND de ADXL345 avec les pins 3V3 et GND sur ESP8268 et pour la transmission de donnée et contrôle on relie le SDA et SCL de l'accéléromètre par les pins D2 et D1 tout en série. D'autre part nous relierons le NodeMCU appelé aussi esp8266 par le câble d'alimentation de type MINI-USB pour téléverser le code de ARDUINO IDE et pour l'alimenter par une power bank ou le power supply de 5v après la configuration .



*Interfacing an ADXL345 accelerometer with NodeMCU*

**Fig4.7:** câblage entre ADXL345 et NodeMCU



**Fig4.8:** placement d'accéléromètre sur CPU FAN 12v

#### 4.4 Configuration de ARDUINO IOT CLOUD

Pour accéder et créer des programmes pour le cloud Arduino IoT, nous devons configurer nos appareils Arduino. Nous devons enregistrer un nouveau compte sur cette plateforme. Vous pouvez enregistrer votre compte sur Arduino IoT Cloud à ce lien, <https://create.arduino.cc/iot/>. Après l'enregistrement, nous enregistrons notre NodeMCU sur Arduino IoT Cloud.

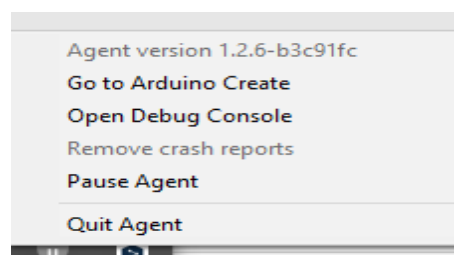
Vous pouvez voir le tableau de bord Arduino IoT Cloud dans *la Figure 4.9*. Nous avons trois menus : Choses, Tableaux de bord et Appareils. Les membres sans abonnement payant ne peuvent créer que le menu Things sur cette plateforme.



*Fig4.9 : menu de l'interface arduino iot cloud*

##### 4.4.1 Enregistrer esp8266

Avant d'utiliser Arduino IoT Cloud, nous devons enregistrer nos appareils Arduino. Dans ce chapitre, nous utilisons esp8266. Nous avons quelques étapes pour enregistrer nos dispositifs Arduino. Vous pouvez effectuer les tâches suivantes : - installer l'Arduino Create Agent - ajouter un nouveau périphérique Arduino Ensuite, nous pouvons installer l'Arduino Create Agent. Installer l'Arduino Create Agent L'Arduino Create Agent est un programme d'arrière-plan qui écoute nos périphériques Arduino locaux. Ce programme d'agent agit comme un pont entre les périphériques Arduino locaux et Arduino IoT Cloud. Le programme Arduino Create Agent est disponible pour Windows, Linux et la plateforme macOS. Vous pouvez télécharger ce programme à ce lien, <https://github.com/arduino/arduino-create-agent>. Une fois installé, vous devez permettre à ce programme de s'exécuter en arrière-plan. Sur la plateforme Windows, vous pouvez voir une icône de la barre des tâches pour l'Arduino Create Agent, comme indiqué dans *la Figure 4.10*

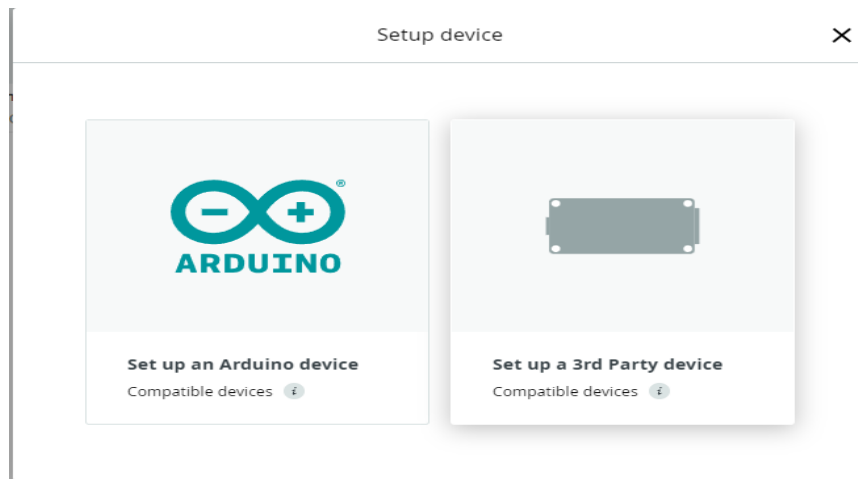


*Fig 4.10 : arduino create agent*



#### 4.4.2 Ajouter un nouveau périphérique Arduino

Une fois que nous avons configuré le programme Arduino Create Agent sur un ordinateur local, nous pouvons ajouter un nouveau périphérique Arduino. Vous pouvez ouvrir le site Web Arduino IoT Cloud. Ensuite, cliquez sur le menu DEVICES. Vous pouvez voir une liste de périphériques Arduino. Maintenant vous pouvez ajouter un nouvel esp8266 IoT. Vous pouvez brancher esp8266 . Vous devriez voir apparaître une boîte de dialogue, comme illustré à la figure 4.10 . Cliquez sur Set up dans le menu 3rd party device.



*Fig4.11 : Ajout a 3rd party device*

Après avoir cliqué sur cette option, vous devriez voir esp8266, comme illustré à la Figure 4.12. Si vous ne voyez pas votre ep8266, assurez-vous que votre esp8266 est attaché et que l'Arduino Create Agent est en cours d'exécution.



*Fig4.12 Arduino IoT Cloud détecte esp8266*

Dans l'onglet Devices le périphérique est créé.



Fig4.13: onglet devices dans interface iot cloud arduino

### 4.4.3 Création du Things :

Nous avons créé dans un things le nommée <<ADXL345>> et configurer les 3 variables x,y,z, selon les paramètres du accéléromètre ADXL345 et l'extraction du mesure d'accélération de CPU FAN selon l'étude qu'on veut appliquer, axiale verticale horizontale .

Name ↓	Device	Variables	Creation Date
<input type="checkbox"/> ADXL345	Supernova NodeMCU 1.0 (ESP-12E Mod...)	X Y Z	16 Sep 2022 12:09:26

Fig4.14 : création du things et 3 variables

### 4.4.4 Création du Dashboard :

Pour voir les changements de nos 3 variables x,y,z nous avons créé 3 graphes ( m/s<sup>2</sup>) en fonction du temps (t) pour le monitoring du variation d'accélération en temps réel ou en date ultérieure.

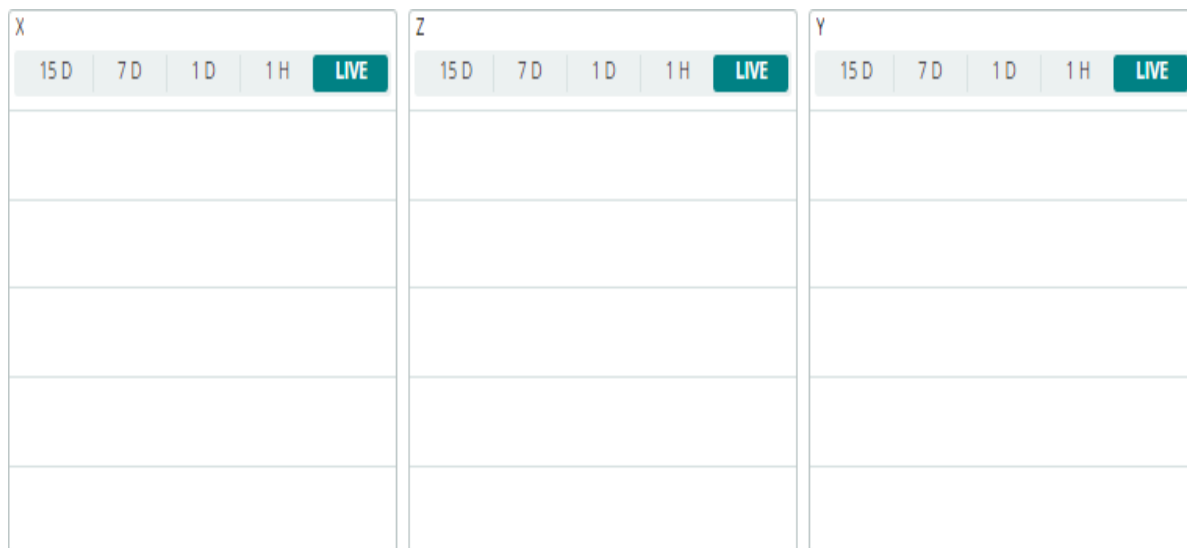


Fig4.15: Création du Dashboard et 3 graphes pour les 3 variables.



#### 4.5 Création du croquis :

- Bibliothèque et variable :

```
#include <Wire.h>
#include "thingProperties.h"
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);
```

- Setup function :

```
void setup() {
  // Initialize serial and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);

  if (!accel.begin())
  {
    /* There was a problem detecting the ADXL345 ... check your connections */
    Serial.println("Ooops, no ADXL345 detected ... Check your wiring!");
    while (1);
  }
  accel.setRange(ADXL345_RANGE_16_G);
  // This delay gives the chance to wait for a Serial Monitor without blocking if none is found
  delay(1500);

  // Defined in thingProperties.h
  initProperties();

  // Connect to Arduino IoT Cloud
  ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);

  /*
  The following function allows you to obtain more information
  related to the state of network and IoT Cloud connection and errors
  the higher number the more granular information you'll get.
  The default is 0 (only errors).
  Maximum is 4
  */
  setDebugMessageLevel(2);
  ArduinoCloud.printDebugInfo();
}
```

- Loop function

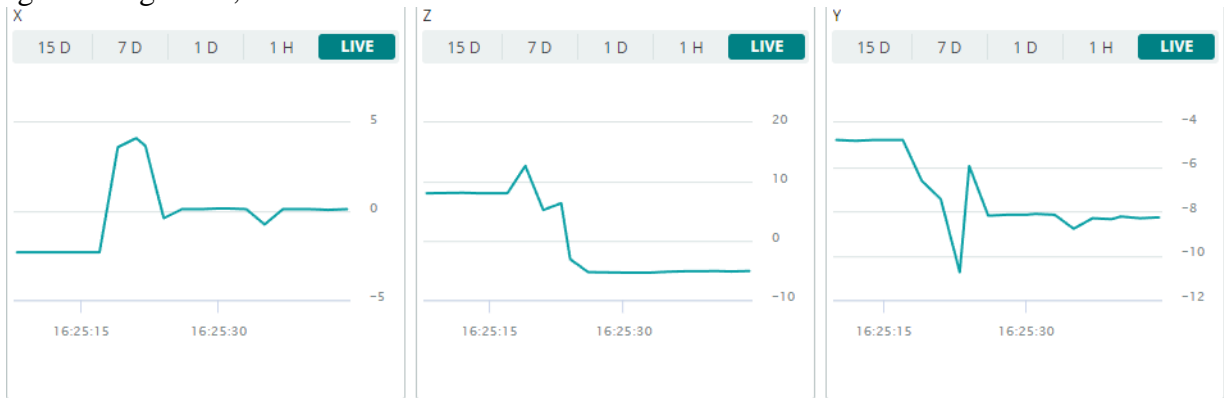
```
void loop() {
  ArduinoCloud.update();
  // Your code here

  sensors_event_t event;
  accel.getEvent(&event);

  Serial.print("X: "); Serial.print(event.acceleration.x); Serial.print(" ");
  Serial.print("Y: "); Serial.print(event.acceleration.y); Serial.print(" ");
  Serial.print("Z: "); Serial.print(event.acceleration.z); Serial.print(" "); Serial.println("m/s^2 ");
  delay(500);
  x = event.acceleration.x;
  y = event.acceleration.y;
  z = event.acceleration.z;
}
```

**4.6 Résultats et discussion :**

Nous voyons que notre système est exécutable, cela nous permet de télécharger les mesures et créer un graphe d'accélération en fonction de fréquence pour les 3 variables à l'aide de logiciel Origin Pro,



*Fig4.16 : Monitoring de mesures vibratoires en temps réel*

Après le téléchargement du mesures, nous convertissons ces derniers en graphes en fonction du fréquences, aussi créer un historique de données de longues durée pour l'utiliser dans l'analyses spectrales et la classification des mesures dans le tableau des seuils définis de surveillance par AFNOR.

Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		unacceptable	
	1.10	45.0			

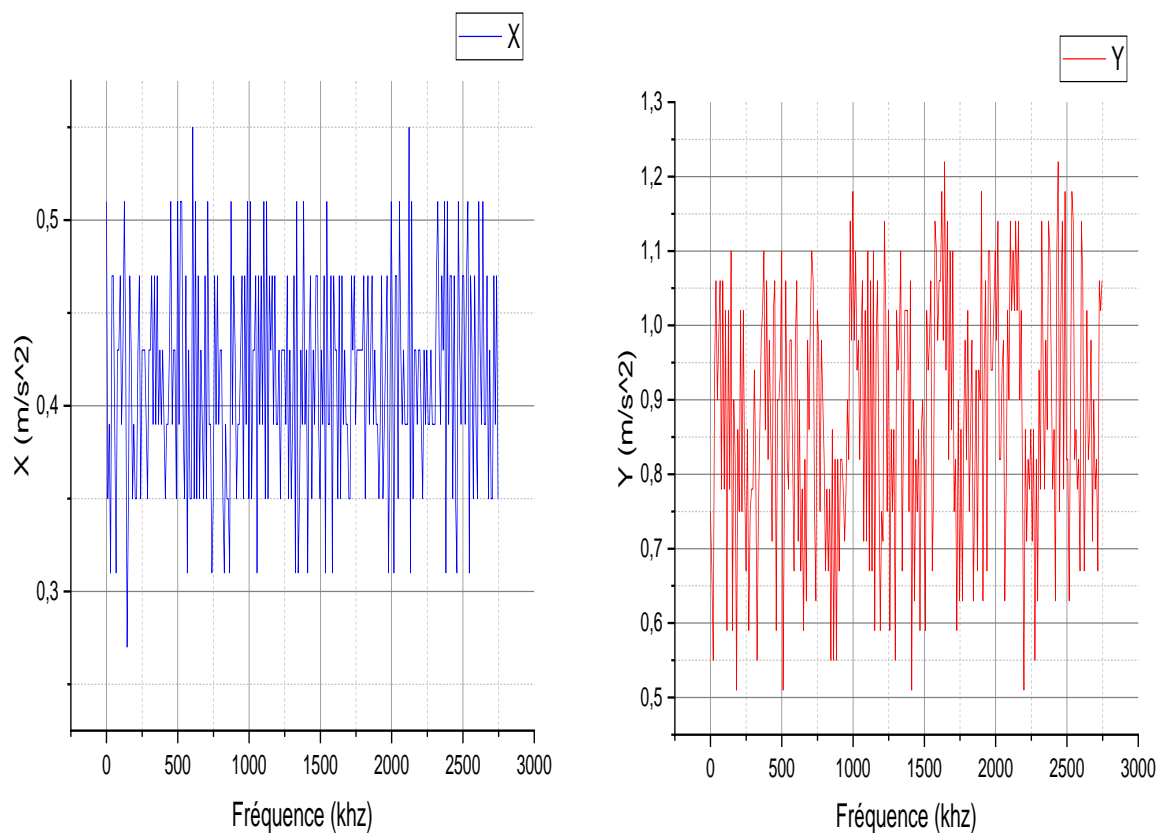
*Fig4.17 : Les seuils définis pour les machines à respecter*

L'expression comporte les mesures des caractéristiques, si elles sont inférieures à 2, la machine est dans un état « Acceptable ». Si les mesures de la machine sont entre 2 et 4, la machine sera dans un état « tolérable ». Si les valeurs sont supérieures à la valeur 4, la machine sera dans un état « non admissible ».

Le CPU-FAN qu'on utilise dans notre réalisation est classé parmi les petites machines de consommation de 0.15 kwh.

#### Les spectres d'accélération avec et sans balourd et déséquilibre :

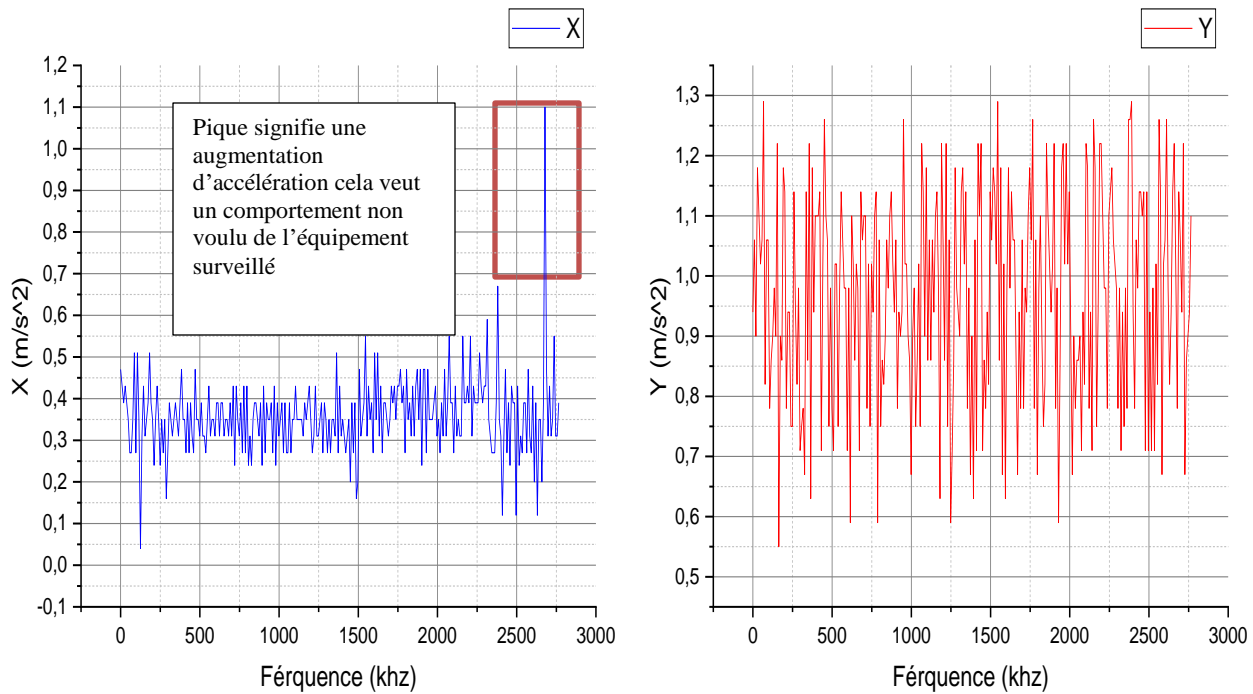
##### Sans balourd en axe X et Y :



**Fig4.18 :** spectre d'accélération a l'axe X et Y sans balourd.

En comparant les seuils définis par les mesures qu'on a, nous concluons que les mesures sont inférieures a 2 ce qui veut dire sont acceptable.

## Avec balourd en X et Y :



**Fig 4.19 :** Spectre d'accélération des X et Y avec balourd.

Nous simulons un balourd avec le doigt ou un déséquilibre sur le CPU FAN, au but de simuler un défaut ou un comportement non voulu de l'équipement, nous générons un spectre pour l'analyser et anticiper la panne. On analyse le spectre des axes X on voit un pique qui signifie une augmentation d'accélération générée par l'équipement qui dépasse les seuils acceptables de valeurs 2. Donc ce comportement non voulu peut générer un défaut qui mène à l'arrêt de l'équipement et pourquoi pas la chaîne de production en général. Il faut intervenir vite sur le site au but d'anticiper la panne et éviter l'arrêt d'équipement.

**4.7 Conclusion:**

Le système de monitoring de mesure en temps réel est créé donc, on a l'utilisé pour surveiller un type de machines tournantes, en basant sur les principales technologies de l'industrie 4.0.

Ce chapitre c'est l'image explicite de notre contribution modeste de ce sujet de digitalisation de maintenance, ce système qu'on a réalisé est de perspective de l'utiliser pour prédiction de panne et l'intervenir avant n'importe incident indésirable qui cède à arrêter les chaînes de production industrielle.

## **Conclusion générale :**

Une entreprise doit maintenir sa chaîne de production en marche en évitant les arrêts non planifiés des chaînes de production. En effet, les arrêts non planifiés sont une source de perte financière et perte de temps pour l'entreprise affectant sa compétitivité avec d'autres entreprises. Pour éviter cela, notre travail s'est porté sur la conception d'un outil de surveillance de l'état d'une machine. Dans le but de prédire l'état de fonctionnement d'une machine et éviter qu'elle ne tombe en panne.

Le projet de recherche présenté dans cette étude propose, une solution permettant d'exploiter le potentiel des réseaux bayésiens pour l'amélioration du processus de maintenance dans l'industrie par la reconnaissance des défauts des machines. Dans ce projet, pour commencer nous avons discuté des généralités de la maintenance en évoquant ses opérations, sa politique et ses niveaux. Nous avons également parlé des différentes formes de la maintenance en général.

Nous avons ensuite défini les technologies liées à l'industrie 4.0 pour ensuite évoquer les notions fondamentales de machine-learning , tels que IIOT, la digital Twin, intelligence artificielle . Nous avons également défini les algorithmes les plus populaires utilisés dans l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond, pour ensuite évoquer les réseaux bayésiens où notre étude s'est porté.

Nous avons aussi fait démonstration totale du maintenance prédictive et en particulier l'un de ces outils très répandue "analyse vibratoire", ce qu'il nous a aidé a notre implémentation du système réalisé au dernier chapitre .

Nous avons choisi la collection de donnée comme pilier d'architecture de maintenance prédictive pour notre application du projet. En effet, le chapitre 4 présente l'environnement de travail de notre réalisation. La partie théorique de ce projet est consacrée à description du modules utilisé et les logiciels utilisé mettre en œuvre la réalisation. Une interface de monitoring a été créé nous a permis de déterminer l'état de fonctionnement de la machine à travers l'historique des données fournis au cloud iot et les résultats traduis en spectre. Il permettra également à l'avenir de déterminer si la machine est en bon état ou non pour fonctionner.

Cette expérience nous a donné l'envie de nous développer dans le domaine de la recherche en contribuant aux avancées scientifiques dans le monde. Vu que les acquis qu'on a eu à travers cette recherche.

## Références :

- [1] MON François MONCHEY, Maintenance, méthode et organisation 2<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris 2003.
- [3] Danjou C, Rivest L, Pellerin R Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité. 27
- [4] Qu'est-ce que l'Industrie 4.0. (s. d.). IP SYSTEMES..
- [5] Qu'est-ce que l'Internet des Objets (IoT) ? | MerciYanis, s. d.
- [6] (Lebigdata.fr, 2022)
- [7] Alcácer V, Cruz-Machado V (2019) Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. Eng Sci Technol Int J 22:899–919
- [8] L, B. (2022, août 2). Machine Learning et Big Data : définition et explications.
- [9] AlAfandy, K. A., Omara, H., Lazaar, M. & Al Achhab, M. (2022, 8 avril). Machine Learning. Advances in Medical Technologies and Clinical Practice, 83113.
- [10] Lefebvre, A. (2022, 20 juin). Le diagramme d'Ishikawa : définition, principe et exemple. Le Blog du Dirigeant.
- [11] Qu'est-ce que l'Industrie 4.0. (s. d.-b). IP SYSTEMES.
- [12] Neugebauer R, Hippmann S, Leis M, Landherr M (2016) Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. Procedia CIRP 57:2–7
- [13] Danjou C, Rivest L, Pellerin R Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité. 27
- [14] Danjou C, Rivest L, Pellerin R Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité. 27
- [15] Mitchell, T., Buchanan, B., DeJong, G., Dietterich, T., Rosenbloom, P., & Waibel, A. (1990). Machine learning. Annual review of computer science, 4(1), 417-433.
- [16] Pélissier, D. (2020). La coconstruction ambiguë de l'intelligence artificielle (IA), analyse de la conception de l'intervention d'ouverture de chatbots de recrutement. Communication management, 17(2), 67-82



- [17] Berbain, S. (2016). Impacts de la fabrication additive sur la supplychain: Quels changements attendus dans le cadre de la production de pièces fonctionnelles en série?. *Logistique & Management*, 24(2), 110-120
- [18] Verma, P. K., Verma, R., Prakash, A., Agrawal, A., Naik, K., Tripathi, R., ... & Abogharaf, A. (2016). Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 66, 83-10
- [19] Industry 4.0 and the digital twin technology | Deloitte Insights. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
- [20] Khazraei K, Deuse J (2011) A strategic standpoint on maintenance taxonomy. *J Facil Manag* 9:96–113
- [21] Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihm W (2018) Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-Pap* 51:1016–1022
- [22] Kremer, S., Mé, L., Rémy, D., & Roca, V. (2019). *Cybersécurité*.
- [23] Sagnier, C. (2021, 10 décembre). *Maintenance prédictive : comment la mettre en place ?* MobilityWork./
- [24] Wolff, P. (1996). *Maintenance prédictive: une approche stochastique* (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- [25] Cachada, A., Barbosa, J., Leitño, P., Geraldcs, C. A., Deusdado, L., Costa, J., ... & Romero, L. (2018, September). Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture. In *2018 IEEE 23rd international conference on emerging technologies and factory automation (ETFa)* (Vol. 1, pp. 139-146). IEEE.
- [26] YACINE, B., ELIAS, H. A., & DALILA, K. PROJECTION DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE CONDITIONNELLE DES ROULEMENTS PAR ANALYSE VIBRATOIRE.
- [27]
- [28] Affagard, B., Gériidan, J. M., & Lafargue, J. N. (2014). *Projets créatifs avec Arduino*. Pearson Education France.

