



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 D'hygiène Et Sécurité Industrielle

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème :

# A predictive tool to reduce risk machine with Machine Learning

Elaboré Par :

YAHIAOUAHMED Abdelmadjid ET ZIANE CHERIF Younes

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
<u>Aissani nassima</u>	<u>MCA</u>	<u>IMSI</u>	<u>Président</u>
<u>Zouairi Saim</u>	<u>MAA</u>	<u>IMSI</u>	<u>Encadreur</u>
<u>Titah mawloud</u>	<u>MCB</u>	<u>IMSI</u>	<u>Examineur</u>

Année 2021/2022

## **REMERCIEMENT :**

Nous adressons nos infinis et sincères remerciements

A l'éternel Dieu tout puissant, à qui nous devons la vie et sans qui nous ne serons parvenus à la réalisation de ce travail.

A notre encadrant **M.Zouairi Saim**, qui a bien voulu diriger nos recherches, son orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

A l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de l'Université Virtuelle de l'institut de maintenance et sécurité (IMSI) industrielle pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme de Master II. Ils ont largement contribué à l'édification de notre profil pour la carrière que nous espérons bâtir. Nous ouvrons ici notre cœur à tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, et nous adressons à tous nos sincères remerciements spécialement à nos chers parents et à toute la famille pour leur soutien tout au long de nos parcours universitaires.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux.

## **DEDICACE :**

Tout d'abord ; Je dédie ce mémoire à mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi afin que je puisse arriver là ; veuillez trouver dans cet ouvrage l'expression de ma gratitude et de mon amour

Ce travail est également dédié :

A mes sœurs et leurs enfants (Sirine Nada ; Mohamed Ilyes ; Alaa Mayane)

A la mémoire de ma grand-mère que dieu la miséricordieux ; vous accueille dans son éternel paradis

A mes proches ; mes collègues et amis pour leurs soutiens et pour tous les agréables moments qu'on a passé ensemble.

A toute personne qui a su être présente lorsque j'en avais besoin

Merci à vous tous.

**Abdelmadjid**

## **DEDICACE :**

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études avec leurs patiences ; leurs encouragements et surtout leurs amours.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

A toute la famille qui n'ont cessé d'être pour moi un exemple de persévérance et de générosité.

**Younes**

## Résume :

Les machines sont indispensables à l'activité de nombreuses entreprises, peuvent également provoquer des accidents du travail, des maladies professionnelles et des différents risques tout au long de leur vie.

Alors l'objectif principal de notre étude est de prévoir les risques liés aux machines en utilisant le Machine Learning, on a utilisé plus précisément la méthode de la Forêt aléatoire classifier pour faire une prédiction si la machine marche d'une façon normale ou il y a une anomalie sur le système.

## Abstract:

Machines are essential to the activities of many companies, and can also cause accidents at work, occupational diseases and various risks throughout their lives.

So the main objective of our study is to predict the risks related to machines using Machine Learning, The Random Forest classifier method was used more precisely to make a prediction whether the machine is running normally or there is an anomaly on the system.

## المخلص

تعد الآلات ضرورية لنشاط العديد من الشركات كما يمكن أن تسبب حوادث في العمل وأمراض مهنية ومخاطر مختلفة طوال مدة استخدامها. لذا فإن الهدف الرئيسي لدراستنا هو التنبؤ بالمخاطر المرتبطة بالآلات التي تستخدم التعلم الآلي. وقد استخدمنا بشكل أدق طريقة مصنفة الغابة العشوائية للتوقع إذا كانت الآلة تعمل بطريقة طبيعية أو كان هناك خلل في النظام

## **Abréviations :**

GMAO : Gestion de maintenance assistée par ordinateur.

IPC: Une intervention préventive conditionnelle

CND : Contrôles non-destructifs

MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement

TPF : Total Productive Maintenance

OT : un ordre de travail

TBF : temps de bon fonctionnement

TA : temps d'arrêt

TAF : temps d'arrêt de la fabrication

TAM : temps d'arrêt de la maintenance

ML : machine Learning

IA : Intelligence artificielle

GIGO : « garbage in, garbage out » est une notion commune à l'informatique et aux mathématiques: la qualité de l'Output est définie par la qualité de l'input

SSL: semi Supervised Learning

SSC: Semi-Supervised Learning

## Liste des figures :

<b>Figure (1.1):</b> Equipements de protections individuels(EPI) .....	09
<b>Figure (1.2) :</b> Triangle de feu .....	13
<b>Figure (2.1) :</b> Types de la maintenance .....	26
<b>Figure (2.2):</b> Coût de la maintenance systématique .....	30
<b>Figure (2.3) :</b> Intervention de la maintenance conditionnelle.....	31
<b>Figure (2.4):</b> Courbe en baignoire taux de défaillance .....	34
<b>Figure (2.5):</b> Exemple d'une tâche de maintenance.....	38
<b>Figure (2.6) :</b> Exemple de graphe d'évolution .....	40
<b>Figure (2.7) :</b> Exemple de graphe de répartition.....	41
<b>Figure (3.1) :</b> Schéma de la machine Learning .....	47
<b>Figure (3.2) :</b> Apprentissage supervisé .....	50
<b>Figure (3.3) :</b> Apprentissage non supervisé.....	53
<b>Figure (3.4):</b> Clustering model .....	55
<b>Figure (3.5):</b> données semi- étiquetées.....	56
<b>Figure (3.6) :</b> Schéma d'apprentissage par renforcement .....	58
<b>Figure (3.7) :</b> Fonctionnement de Foret aléatoire.....	62
<b>Figure (3.8) :</b> La structure générale d'un arbre de décision .....	63
<b>Figure (4.1) :</b> Les Taux de buts .....	68

## Liste des tableaux :

<b>Tableau (1.1) : Les tensions nominales .....</b>	<b>12</b>
<b>Tableau (1.2) : Le rapport entre la valeur et le niveau d'exposition.....</b>	<b>14</b>
<b>Tableau (2.1) Les niveaux de maintenance AFNOR .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau (3.1): Modèles Linéaire .....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau (3.2): modèles arborescents .....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau (3.3):Clustering modèles .....</b>	<b>54</b>
<b>Tableau (3.4) : Algorithmes d'Association .....</b>	<b>56</b>

# Sommaire

Remerciement .....	I
Dédicace .....	II
Sommaire .....	IV
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux .....	VI
Abréviations .....	VII
Introduction générale.....	1

## **Chapitre 1 : Risques et machines**

<b>1.</b> Introduction .....	3
<b>2.</b> Définition d'un risque industriel .....	3
<b>3.</b> Les facteurs de risque industriel.....	3
<b>3.1.</b> Danger .....	3
<b>3.2.</b> Risque .....	4
<b>3.3.</b> Exposition .....	4
<b>3.4.</b> Facteurs des risques .....	4
<b>4.</b> Les machines .....	4
<b>4.1.</b> Définition de la machine au domaine industriel .....	4
<b>4.2.</b> Eléments de machine .....	4
<b>4.3.</b> Les types des machines : .....	5
<b>4.4.</b> Limites de la machine .....	5
<b>4.4.1.</b> Limites techniques et spécifications .....	5
<b>4.4.2.</b> Limites d'utilisation .....	6
<b>5.</b> Typologie des risques liés aux machines .....	6
<b>5.1.</b> Les risques mécaniques.....	6
<b>5.1.1.</b> Définition du risque mécanique .....	6
<b>5.1.2.</b> Différents risques mécaniques .....	6
<b>5.1.3.</b> Mesures de prévention contre les risques mécaniques .....	7
<b>5.1.4.</b> Les points clés d'une démarche de prévention .....	8
<b>5.2.</b> Les risques physiques.....	9
<b>5.2.1.</b> Effet de vibration .....	10
<b>5.2.2.</b> Les risques électriques .....	11
<b>5.2.3.</b> Incendie .....	12
<b>5.2.3.1.</b> Triangle de feu .....	13
<b>5.2.4.</b> Explosion .....	13

5.2.4.1.Modalités d'exposition .....	13
5.2.4.2.Mesures de prévention contre les feux et les explosions .....	14
5.2.5. Le risque de surdité .....	14
5.2.5.1.Qu'est-ce qu'un bruit .....	15
5.2.5.2.La surdité professionnelle .....	15
5.2.5.3.Mesures de prévention contre la surdité .....	15
5.2.6. Les Risques des rayonnements .....	16
5.2.6.1.Les risques des rayonnements ionisants .....	16
5.2.6.2.Les risques dus aux rayonnements non ionisants.....	17
5.2.6.3.Les mesures de prévention contre les rayonnements .....	19
5.2.7. Les manutentions manuelles.....	19
5.2.7.1.Les mesures de prévention contre les manutentions manuelles .....	20
5.2.8. Les manutentions mécaniques .....	20
5.2.8.1.Les mesures de prévention contre les manutentions mécaniques.....	20
5.2.9. Les risques de circulation et de transport .....	20
5.2.9.1.Les mesures de prévention contre la circulation et le transport.....	21

## Chapitre 2 : La Maintenance

1. Introduction .....	23
2. Maintenance .....	23
2.1.Définition de la maintenance .....	23
2.2.But de la maintenance .....	23
2.2.1. Objectifs opérationnels .....	23
2.2.2. Objectifs financiers .....	24
2.3.Différents niveaux de maintenance .....	24
2.3.1. Maintenance du premier niveau .....	24
2.3.2. Maintenance de deuxième niveau .....	25
2.3.3. Maintenance de troisième niveau.....	25
2.3.4. Maintenance du quatrième niveau .....	25
2.3.5. Maintenance du cinquième niveau.....	25
2.4.Types de maintenance .....	26
2.4.1. Maintenance corrective.....	26
2.4.1.1. Avantages de la maintenance corrective .....	27
2.4.1.2. L'inconvénient de la maintenance corrective .....	27
2.4.2. Maintenance préventive .....	28
2.4.2.1. Les objectifs de la maintenance préventive .....	28
2.4.2.2. Les différents types de la maintenance préventive .....	29

<b>2.5.</b> Activités de la maintenance.....	32
<b>2.6.</b> Fiabilité et maintenance préventive .....	33
<b>2.6.1.</b> Taux de défaillance .....	33
<b>2.6.2.</b> Moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) .....	35
<b>2.6.3.</b> Lois de fiabilité .....	35
<b>2.6.4.</b> Périodicité de la maintenance préventive .....	36
<b>2.7.</b> TPM et maintenance préventive.....	36
<b>2.8.</b> Mise en place de la maintenance préventive .....	39
<b>2.8.1.</b> Démarche participative .....	39
<b>2.8.2.</b> Tableau de bord .....	39
<b>2.8.2.1.</b> Graphes d'évolution .....	40
<b>2.8.2.2.</b> Graphe de répartition .....	40

## **Chapitre 3 : Machine Learning (Apprentissage automatique)**

<b>1.</b> Introduction .....	44
<b>2.</b> Intelligence artificielle .....	44
<b>3.</b> Machine Learning (Apprentissage automatique).....	46
<b>3.1.</b> Définition .....	46
<b>3.2.</b> Fonctionnement de M L .....	46
<b>3.3.</b> Ingrédients de la Machine Learning .....	47
<b>3.4.</b> Les modèles de la machine Learning .....	49
<b>3.4.1.</b> Apprentissage supervisé .....	49
<b>3.4.1.1.</b> Modèles Linéaire .....	50
<b>3.4.1.2.</b> Modèles Arborescents .....	50
<b>3.4.1.</b> Apprentissage non supervisé .....	53
<b>3.4.1.1.</b> Clustering modèles .....	53
<b>3.4.1.2.</b> Association modèles .....	55
<b>3.4.2.</b> Apprentissage semi-supervisé .....	55
<b>3.4.2.1.</b> Clustring semi-supervisé.. .....	57
<b>3.4.3.</b> Apprentissage par renforcement 57	
<b>4.</b> Machine Learning et la Maintenance Prédictive .....	59
<b>4.1.</b> L'adaptation de Machine Learning en maintenance prédictive .....	59
<b>4.2.</b> Les principaux avantages d'adapter ML en PDM .....	59
<b>4.3.</b> Techniques du Machine Learning pour la maintenance prédictive .....	60
<b>4.4.</b> Foret Aléatoire .....	61
<b>4.4.1.</b> Arbre de décision .....	63

4.4.2. Avantages de la Foret Aléatoire.....	64
4.4.3. Les inconvénients de la Foret aléatoire.....	64

## **Chapitre 4 : l'application d'un algorithme d'apprentissage automatique (Random Forest classification)**

1. Introduction .....	66
2. L'ensemble de données .....	66
3. Forets aléatoires.....	68
3.1. Préparation des données pour la formation .....	68
3.2. Formation de l'algorithme.....	69
3.3. Evaluation de l'algorithme .....	71
3.4. Prédiction de l'algorithme .....	71
4. Conclusion.....	72
Conclusion Générale .....	73
Références bibliographiques .....	74

## **Introduction générale**

Au début du développement industriel, on croyait que, tout simplement, les machines serviraient les gens et faciliteraient leur travail. Depuis lors, il est devenu clair que le problème est bien plus complexe : d'une part, les accidents du travail se sont multipliés. Par contre, les travailleurs n'ont pas réussi à suivre la cadence.

Les risques professionnels sont parmi les dangers les plus importants pour les hommes de notre époque. La diversification des activités s'est traduite par une augmentation de la fréquence et de la gravité des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Avec l'augmentation des accidents du travail liés aux machines, les entreprises ont besoin d'outils leur permettant d'avoir une démarche continue et structurée. Qui permet de réduire le nombre et la fréquence des pannes des machines et le plus important, limiter le risque de dysfonctionnement et les accidents de différentes gravités.

Cette démarche se présente sous forme de maintenance préventive en utilisant le Machine Learning qui permet de garantir la sécurité et l'efficacité des procédures, réduire au minimum les coûts d'entretien.

### **Ce mémoire est organisé comme suit :**

- Dans le premier chapitre, nous présentons les facteurs de risque industriels, et les différents types de risques liés aux machines
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la maintenance en général ces notions de base, les objectifs, ces types.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le machine Learning et ses différents types, après on a discuté l'application de machine Learning sur la maintenance préventive.
- Dans le quatrième chapitre, on a appliqué la machine Learning pour prédire les risques machine, en utilisant la méthode du forêt aléatoire.

# **Chapitre 1 :**

# **Risques et machines**

## **1. Introduction**

Le risque est un concept difficile à définir, mais généralement, il peut être considéré comme une éventualité indésirable, appréhendée, relativement inoffensive et improbable. L'appréhension est définie comme la connaissance du risque à l'avance. L'exposition au risque est donc souvent le résultat d'une approche consciente, appelée prise de risque.

Dans ce sens, le risque est distingué, par exemple, du danger ou de l'incident, qui se produit habituellement de manière inattendue ; Le risque est généralement anodin, mais tout de même suffisamment nuisible pour être indésirable. [1]

Elle diffère notamment du danger, qui suppose la possibilité de dommages graves (en particulier de décès). On dira par exemple de quelqu'un qui sort tête nue par temps froid qu'il court le risque d'attraper un rhume, tandis qu'on dira qu'il se met en danger s'il traverse une rue sans regarder. Un risque est une éventualité improbable, ce qui est différent du danger. On parle en effet de danger lorsque la probabilité d'occurrence et les conséquences sont importantes, tandis que le risque existe dès lors que sa probabilité d'occurrence n'est pas nulle. L'appréciation de ces différents critères est hautement subjective, ce qui peut justifier que dans les domaines scientifiques et techniques une définition quantifiable et plus rigoureuse du risque a été recherchée. [1]

Au début de ce chapitre, nous nous sommes penchés sur les facteurs de risque industriels (risque, danger et exposition) et leur élaboration. Certaines définitions des notions de base relatives au mécanisme industriel ont également été soulignées dans le présent chapitre. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les différents types de risques liés aux machines.

## **2. Définition d'un risque industriel**

Le risque industriel est défini comme un événement accidentel survenant sur un site industriel impliquant des produits ou des procédés dangereux qui entraînent des conséquences immédiates sérieuses pour le personnel, les résidents, les biens et l'environnement. [1]

## **3. Les facteurs de risque industriel**

### **3.1. Danger**

Un danger désigne toute source potentielle de dommages, de blessures ou d'effets nocifs sur une chose ou une personne. [2]

### **3.2. Risque**

Un risque est la probabilité qu'une personne subisse un préjudice ou des effets nocifs pour sa santé en cas d'exposition à un danger. [2]

Le risque est caractérisé par la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté (accident) et de la gravité de ses conséquences. [1]

### **3.3. Exposition**

Dans le contexte actuel, lorsqu'on parle d'exposition, on parle du contact entre le danger et une personne, ce qui risque donc de causer des dommages. En l'absence d'exposition, il n'y a aucune possibilité de dommage. Le risque est donc la probabilité que quelqu'un soit touché par un danger. [2]

### **3.4. Facteurs des risques**

Les facteurs de risque sont des éléments susceptibles d'accroître ou de réduire la probabilité qu'un accident se produise ou la gravité d'un événement.

Les facteurs des risques complètent l'équation :

$$\text{RISQUE} = \text{DANGER} \times \text{EXPOSITION. [1]}$$

## **4. Les machines**

### **4.1. Définition de la machine au domaine industriel**

D'après la littérature, une machine est un « ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement autre que la force humaine ou animale appliquée directement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie. » [Selon le code de travail d'après (Droit Org, 2014). [8].

Ces appareils ont en commun la conversion de l'énergie qu'ils utilisent pour agir sur la matière ou l'acheminer.

### **4.2. Eléments de machine**

Les composants d'une application technique, qui jouent un rôle spécifique dans la construction, sont appelés éléments de machine. Les éléments de machine peuvent être à la fois des composants individuels et des modules :

- Pièces individuelles : vis, boulons, roues dentées
- Modules composés de plusieurs éléments de machine tels que: accouplements, roulements à billes, engrenages, soupapes

Bien qu'ils soient employés dans des constructions très différentes, les différents éléments de la machine remplissent toujours la même fonction.

Les éléments de machine simples tels que vis, goupilles cylindriques, clavettes ou joints, sont définis par des normes et peuvent être remplacés sans problème. Les éléments de machine plus complexes tels que paliers, accouplements, engrenages et arbres, sont normés uniquement pour certaines de leurs propriétés essentielles, telles que leurs dimensions principales ou leurs brides, et ne sont pas systématiquement interchangeables. [9]

### **4.3. Les types des machines :**

- Machines portatives tenues ou guidées à la main (telles que tronçonneuses à chaîne, taille haies, outils à charge explosive, meuleuses, etc.).
- Appareils portatifs de fixation à chocs (activés par cartouche pneumatique et explosive).
- Machines à bois et matériaux ayant des caractéristiques physiques similaires (telles que scies circulaires, scies à ruban, planeuses et raboteuses)
- Machines présentant des dangers en raison de leur mobilité (telles que véhicules, engins de terrassement, excavateurs, moissonneuses et tracteurs) [12]

### **4.4. Limites de la machine**

La détermination des limites de la machine consiste à déterminer les conditions limites dans lesquelles la machine peut être utilisée. D'une part, il s'agit de définir l'utilisation normale de la machine du point de vue de son utilisation et de son fonctionnement approprié et des conséquences d'un mauvais usage ou d'un mauvais fonctionnement raisonnable prévisible. D'autre part, on envisage l'évolution de la machine dans le temps (durée de vie de la machine, de ses composants, des pièces d'usure) ainsi que le niveau de formation, d'expérience ou d'aptitude de l'utilisateur prévisible. [10]

#### **4.4.1. Limites techniques et spécifications**

- Pression d'utilisation
- Force de fermeture
- Température maximale
- Amplitude maximale du mouvement de la machine
- Défaillances prévisibles
- Fréquences d'entretien [11]

#### **4.4.2. Limites d'utilisation**

- Usages normalement prévisibles
- Mauvais usages raisonnablement prévisibles
- Caractérisation des intervenants (formation, expériences, aptitudes)
- Caractérisation des produits utilisés. [11]

### **5. Typologie des risques liés aux machines**

Il existe plusieurs types ou familles de risques professionnels qui diffèrent les un des autres par leur nature, leur origine, leurs caractéristique et leurs conséquences ainsi que par les mesures de prévention qu'ils nécessitent

#### **5.1. Les risques mécaniques**

Nombreux et variés, ils sont présents partout, dans toutes les activités humaines. Ils ont pour origine les déplacements des corps qui par la suite de leurs mouvements, possèdent une énergie susceptible d'agresser les hommes. [3]

##### **5.1.1. Définition du risque mécanique**

Tous les facteurs physiques qui peuvent être la cause de blessures dues à l'action mécanique de pièces de machines, d'outils, de pièces solides ou de matériaux ou de fluides projetés.

##### **5.1.2. Différents risques mécaniques**

Les risques mécaniques sont groupés dans plusieurs familles, selon la nature des dommages au corps humain.

- **Les risques d'entraînement**

Sont basés sur les frottements existents chaque fois qu'un objet en mouvement rencontre le corps humain qui se déforme et s'écrase. Les déformations sont plus importantes et les dommages subis plus graves.

- **Les risques d'écrasement**

Qui existent chaque fois qu'un objet en mouvement rencontre le corps humain qui se déforme et s'écrase. Les déformations sont plus importantes et les dommages subis plus graves.

- **Les risques de coupure, piqure, sectionnement**

Les coupures et les piqures supposent des surfaces de contact beaucoup plus petites et à énergie égale, les pressions exercées d'où un enfoncement plus important et des blessures plus profondes, allant jusqu'aux sectionnements. Plus un couteau est aiguisé, plus une aiguille est pointue, plus la surface de contact est petite et la pression plus grande, d'où des blessures plus profondes.

- **Les risques de choc**

Qui s'expliquent par la rencontre d'un objet en mouvement généralement rapide avec le corps humain ou un objet immobile et le corps en mouvement ou encore les deux en mouvement. Dans ce type de risque, c'est surtout la différence de vitesse entre l'objet et le corps humain qui est le facteur déterminant de la gravité de l'atteinte.

- **Les risques de projection de solides et liquide**

Les projections de solides à grandes vitesses ou celles des liquides sous haute pression présentent des risques de choc et perforation non négligeables.

Les conséquences des risques mécaniques sont essentiellement des accidents du travail plus ou moins graves, allant de la simple blessure bénigne aux blessures invalidantes, voir même mortelles. Certains phénomènes mécaniques sont à l'origine de maladies professionnelles comme les manutentions manuelles, les vibrations et le bruit.

### **5.1.3. Mesures de prévention contre les risques mécaniques**

- **Eviter** les risques.
- **Evaluer** les risques qui ne peuvent pas être évités.
- **Combattre** les risques à la source.
- **Adapter** le travail à l'homme.
- Tenir compte de l'**état d'évolution de la technique**.
- **Remplacer** ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux.
- **Planifier** la prévention.
- Prendre des mesures de **protection collective**.
- **Donner les instructions** appropriées aux travailleurs.

#### 5.1.4. Les points clés d'une démarche de prévention

- **Adopter des mesures de protection collectives**

Le principe fondamental d'une démarche de prévention est d'**adopter des mesures collectives** qui visent à **supprimer ou réduire le risque à la source**. Une analyse des risques encourus par les travailleurs doit mener à la définition de mesures de prévention précises pour instaurer une démarche progressive.

Lors de la conception de l'espace de travail, il convient de prendre en compte non seulement les **conditions normales d'utilisation des machines** mais aussi les **situations anormales prévisibles**. Les fabricants de machines doivent également respecter des exigences définies par la **directive 2006/42/CE dite « Machines »**.

- **Donner l'information nécessaire aux opérateurs**

Un point essentiel de la démarche de prévention est l'**information donnée aux opérateurs** pour que l'équipement soit utilisé correctement, mais aussi installé, réglé, entretenu et démonté conformément à son mode correct de fonctionnement.

- **Mettre en place des dispositifs de protection**

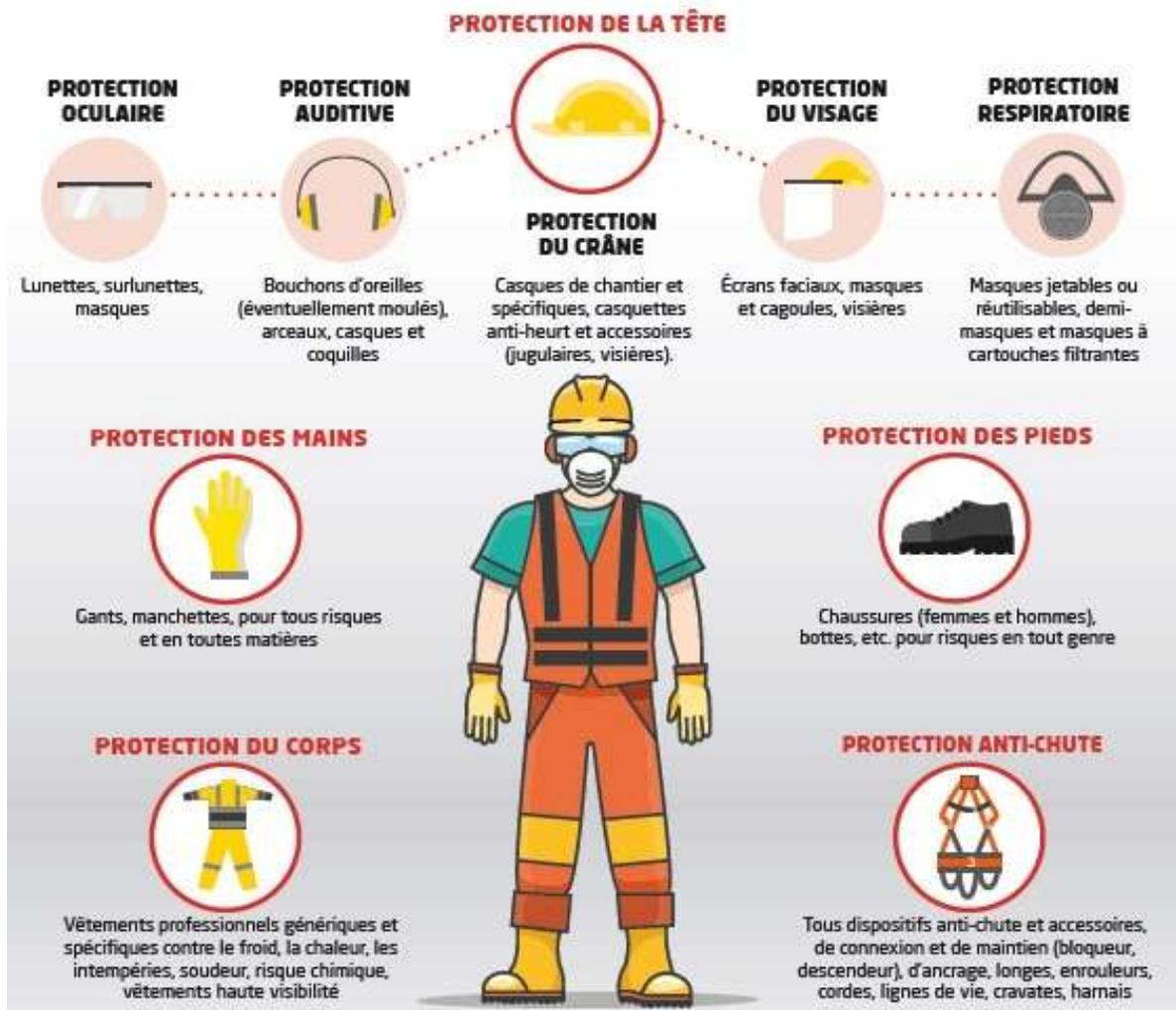
Les risques d'accidents doivent donc être pris en compte dès la conception, par exemple en mettant en place des dispositifs de protection fixes ou mobiles ou des barrières empêchant d'accéder à des zones dangereuses ou encore des dispositifs d'arrêt d'urgence.

- **Signaler les dangers liés aux machines**

Une signalisation appropriée est également essentielle pour prévenir vos employés des dangers qu'ils encourent en utilisant les machines qui sont à leur disposition. Notre gamme de panneaux de signalisation de danger lié aux machines permet d'informer vos employés des risques qu'ils encourent et de leur rappeler leurs obligations en matière de sécurité. Nos pictogrammes sont conformes à la norme ISO 7010, obligatoire depuis le 1er janvier 2014. Cette norme harmonise la signalétique de sécurité pour la rendre compréhensible au niveau international. Toute nouvelle installation de panneaux doit être conforme à cette norme.

- **Imposer le port d'équipements de protection individuelle**

Le port d'équipements de protection individuelle ou EPI voir la figure (1.1), tels que des gants de protection, des lunettes ou visières de protection ou encore des casques de protection peut également protéger vos employés des dangers liés aux machines.



**Figure (1.1): Equipements de protections individuels (EPI)**

## 5.2. Les risques physiques

Les risques physiques englobent tous les risques liés au bruit, aux vibrations, aux rayonnements, à la chaleur, au froid, aux feux et à la radioactivité.

### **5.2.1. Les risques dus aux vibrations**

Les vibrations sont un phénomène mécanique que l'on rencontre couramment sur le lieu de travail. Elles présentent deux risques qui mènent à des maladies professionnelles. Ce phénomène agresse le corps humain et cause des dommages, notamment aux articulations. Elle est également dangereuse pour les équipements de travail et les matériaux en général. [3]

#### **5.2.1.1. Les effets de la vibration**

- **Les effets des vibrations sur les matériaux**

Les matériaux sont ainsi fragilisés, se fissurent et peuvent même s'effriter. Cette fragilisation se traduit par rupture des matériaux en mouvement, avec souvent des projections de particules et morceaux, d'autant plus violemment que les mouvements sont plus rapides. C'est notamment le cas des pièces métalliques et des lames de scie.

- **Les effets des vibrations sur le corps humain**

Les vibrations dont les fréquences sont inférieures à quelques hertz conduisent à des nausées et des vomissements ; au-delà des fréquences de 10-15Hz, les véritables pathologies apparaissent.

- Les atteintes des membres supérieurs : Lorsque c'est la main qui reçoit les vibrations comme c'est le cas de ceux qui utilisent des marteaux piqueurs, on distingue :
  - Les troubles **angioneurotiques** de la main tels que les troubles de la sensibilité.
  - Les troubles de circulation sanguine comme les gonflements et les œdèmes du poignet.
  - Les troubles musculaires comme les crampes, les tremblements et les atrophies des muscles de la main.
- les atteintes de l'ensemble du corps : Lorsque c'est le corps entier qui reçoit les vibrations comme c'est le cas des conducteurs d'engins de chantiers, les atteintes sont :
  - Les troubles de la colonne vertébrale comme les lombalgies et les hernies discales.
  - Les troubles digestifs comme les douleurs abdominales, la constipation et éventuellement les ulcères d'estomac

#### **5.2.1.2. Mesures de prévention contre la vibration**

- Modifier le mode opératoire
- Atténuer les vibrations :
  - outils antivibratoires

- sièges et/ou cabines suspendues

- Informer les salariés des risques
- Réduire la durée d'exposition au risque (réorganisation, pauses...)

### **5.2.2. Les risques électriques**

Il s'agit de risques d'accident (brûlures, électrisation, électrocution) à la suite d'un contact avec un conducteur électrique ou une pièce en métal sous tension, ou avec deux pilotes à potentiels différents. Ces risques existent dans toutes les entreprises. [3]

Le paramètre qui intervient au niveau du risque électrique pour l'homme est l'intensité du courant qui traverse le corps. Suivant l'intensité, on peut distinguer les situations de risque suivantes :

- 1 à 8 mA = Sensation de choc
- 8 à 15 mA = Choc douloureux
- 15 à 20 mA = Perte du contrôle des muscles
- 20 à 50 mA = Difficulté de respiration
- 50 à 100 mA = Fibrillation Ventriculaire Environ
- 200 mA = muscle du cœur comprimé. [1]

Les tensions nominales sont classées en domaines de tensions comme indiqué dans le tableau  
(1.1)

#### **5.2.2.1. Les dangers de l'électricité**

- Brûlure électrique.
- Electrification ou électrocution.
- Incendie et explosion. [1]

**Tableau (1.1) : Les tensions nominales**

DOMAINE DE TENTION	VALEUR DE TENTION NOMINALE
Très basse tension (TBT)	$U \leq 50V_{ca}$ $U \leq 20V_{cc}$
basse tension (BT)	$50V < U \leq 1000V_{ca}$ $120V < U \leq 1500V_{cc}$
Haute tension A (HTA)	$1000V < U \leq 50000V_{ca}$ $1500V < U \leq 75000V_{cc}$
Haute tension B (HTB)	$U > 50000V_{ca}$ $U > 75000V_{cc}$

Ca ; courant alternatif – cc ; courant continu

#### **5.2.2.2. Les 5 règles de sécurité**

- Mise hors tension,
- Protection contre la remise sous tension,
- Contrôle de l'absence de tension,
- Mise à la terre et court-circuit,
- Séparation, isolation, protection des parties voisines sous tension [1]

#### **5.2.2.3. Mesures de prévention contre l'électricité**

- Vérifier annuellement les installations électriques par un personnel qualifié (entreprise ou organisme de contrôle)
- Réaliser les travaux portés sur le registre de vérification
- Utiliser des détecteurs de lignes l'extérieur électriques pour travaux
- Habilitier le personnel intervenant sur les installations électriques

#### **5.2.3. Incendie**

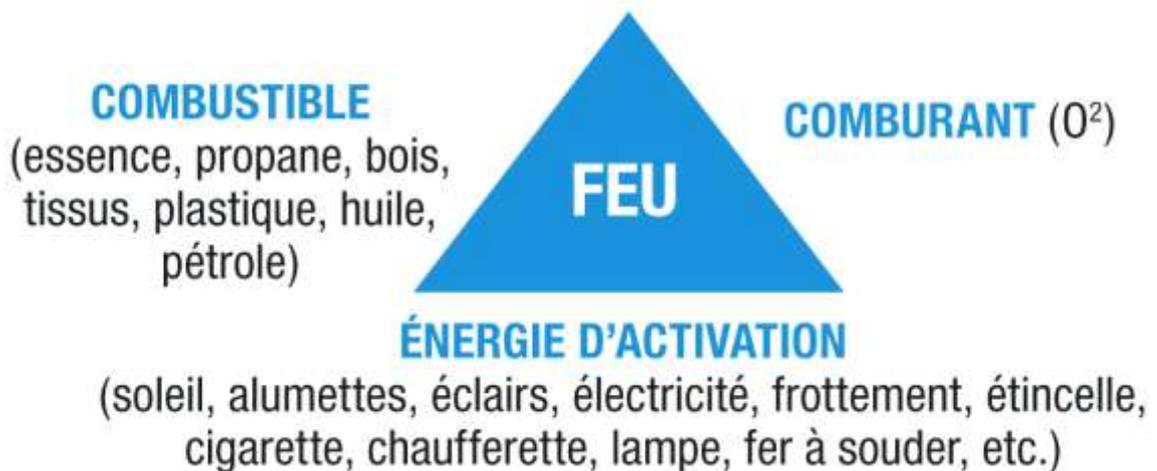
Un incendie est un feu non maîtrisé, ni dans le temps, ni dans l'espace. La caractéristique d'un incendie est de pouvoir s'étendre rapidement et d'occasionner des dégâts généralement importants. [5]

### 5.2.3.1. Triangle de feu :

Incendie est la résultante de l'interaction de ces 3 éléments figure (1.2), également appelé triangle du feu. Le combustible peut être du bois, de l'essence, du diesel, de l'éthanol, du plastique, du tissu, du papier...

Le comburant est généralement l'oxygène contenu dans l'air. Il peut également s'agir de chlore, d'eau oxygénée, d'acide nitrique, de chlorates, de perchlorates.

La chaleur produite par une source d'énergie : un frottement d'origine mécanique, de l'électricité (foudre ou électricité statique), une réaction chimique, de l'énergie solaire... [6]



**Figure (1.2) : Triangle de feu**

### 5.2.4. Explosion :

L'explosion est une combustion quasi-instantanée. Elle provoque un effet de souffle accompagné de flammes et de chaleur. Elle ne survient qu'après formation d'une atmosphère explosive... [7]

#### 5.2.4.1. Modalités d'exposition :

- Toute situation de travail où se trouvent simultanément des Produits/matériaux combustibles, une source de chaleur et un comburant (par exemple : air)
- Utilisation de substances facilement inflammables
- Création d'une atmosphère explosive (gaz, vapeurs, poussières, etc.)
- Mélange de produits incompatibles. [4]

#### 5.2.4.2. Mesures de prévention contre les feux et les explosions

- Remplacer un produit dangereux par un autre moins dangereux
- Stocker les produits dangereux à l'extérieur de la zone de production et en tenant compte de la compatibilité des produits
- Éloigner les sources d'énergie (soudure...)
- Rappeler l'interdiction de fumer
- Éliminer l'électricité statique (mise à la terre)
- Installer du matériel électrique antidéflagrant dans les zones à risques
- Installer des protections (porte coupe-feu...)
- Éviter la propagation du feu (conception des systèmes de ventilation, ...)
- Vérifier les moyens de détection, d'alarme, d'extinction (sprinklers, extincteurs...)
- Établir des plans d'intervention/évacuation
- Former le personnel et l'entraîner à la gestion des situations d'urgence

#### 5.2.5. Le risque de surdité

La surdité a pour origine les bruits qui sont la perception par les oreilles des vibrations transmises par l'air. Il en résulte une certaine analogie entre le risque de surdité et ceux dus aux vibrations. [3]

**Tableau (1.2) : Le rapport entre la valeur et le niveau d'exposition**

Valeur d'exposition	Niveau d'exposition
Valeur d'exposition inférieure ; VAI Déclenchant l'action de prévention	80dB(A) sur 8 heures
	Niveau de pression acoustique décrite ; 135dB (c)
Valeur d'exposition supérieure ; VAS Déclenchant l'action de prévention	85dB(A) sur 8 heures
	Niveau de pression acoustique de crête ; 137dB (c)
Valeur limite d'exposition ; VLM (prenant en compte de l'atténuation Liée au port des protecteurs individuels Contre le bruit).	87dB(A) sur 8 heures
	Niveau de pression acoustique de crête ; 140dB (c)

### **5.2.5.1. Qu'est-ce qu'un bruit ?**

- Sur le plan psycho-sensoriel : « c'est un son dépourvu de caractère musical, plus précisément comme un son gênant, indésirable ».

(ISO, 1996) : « un phénomène acoustique produisant une sensation auditive considérée comme gênante et désagréable ».

AFNOR NF S31-190 : « toute sensation auditive désagréable et gênante, tout phénomène acoustique produisant cette sensation ».

- Sur le plan physique : « il s'agit d'un ensemble de vibrations sonores, complexes, désordonnées, ayant un caractère aléatoire et n'ayant pas de composantes bien définies ».

### **5.2.5.2. La surdité professionnelle**

La surdité s'explique par la destruction des cellules auditives qui se trouvent dans la cochlée ainsi que par d'autres lésions de l'oreille interne lorsque les niveaux sonores sont élevés.

Globalement, les bruits ayant des niveaux inférieurs à 50 dB ; ne sont pas gênants, au-delà et jusqu'à 80 dB, les bruits sont gênants mais supportables ; au-delà de 85 dB, la douleur s'installe et c'est le début des lésions auditives si de tels niveaux sont supportés pendant 8 heures par jour. Le seuil d'apparition de la surdité professionnelle est fixé à 90 dB.

La surdité professionnelle est évolutive dans le temps. Elle commence par une fatigue auditive au cours de laquelle les troubles peuvent être réversibles. Après une certaine période d'exposition, il y a baisse de l'audition pour certaines plages de fréquences. [3]

### **5.2.5.3. Mesures de prévention contre la surdité**

- Supprimer les sources de bruit
- Installer des protecteurs (encoffrement, parois antibruit, traitement phonique des ateliers...)
- Informer les salariés des risques
- Veiller au port effectif des Équipements de Protection Individuelle (EPI)
- Organiser la surveillance médicale spéciale des travailleurs exposés

## 5.2.6. Les Risques des rayonnements

### 5.2.6.1. Les risques des rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants, sont définis comme un ensemble d'émissions rayonnantes qui ont la propriété d'ioniser les molécules qui constituent le corps humain et de causer des troubles et des dysfonctionnements. Le principal agent de contamination par irradiation est donc le rayonnement gamma et éventuellement les rayons X de fréquences élevées, proches des rayons gamma. La plupart des atteintes sont graves et peuvent conduire, à plus ou moins longue échéance, à la mort. La gravité des effets produits sur l'organisme dépend des quantités de radiations reçues, autrement dit de la durée d'exposition, de la nature et des caractéristiques des radioéléments et de la distance séparant le salarié de la source. [3]

Les rayonnements ionisants sont composés de deux catégories d'émissions :

- **Une émission de particules solides**, composées de parties d'atomes comme les noyaux d'Hélium ; On distingue :
  - **Rayonnement alpha**, surtout utilisé en radiothérapie, pour mesurer des épaisseurs et pour détecter des fumées et des gaz, ayant un pouvoir de pénétration très faible (faible énergie), de quelques centimètres dans l'air et de quelques micromètres dans les tissus vivants.
  - **Rayonnement beta**, utilisé pour la production des rayons X en radioscopie et de pouvoir de pénétration variable dans l'air (de quelques mètres) et de quelques millimètres dans le corps humain.
  - **Les neutrons**, rencontrés dans la plupart des émissions radioactives, de pouvoir de pénétration de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres dans l'air et de quelques millimètres seulement dans le corps humain.
- **Une émission de rayonnements électromagnétiques**, possédant des énergies très élevées ; il s'agit des rayons X, des rayons gamma et des rayons cosmiques.
  - **Les rayons X**, utilisés pour la stérilisation des instruments chirurgicaux, principalement pour la radiologie médicale et comme traceurs industriels. Ils peuvent traverser plusieurs dizaines de centimètres de tissus vivants et ne sont partiellement arrêtés que par les matières minérales comme les os et les métaux, d'où leurs applications en médecine et dans l'industrie (radioscopie, radiographie).
  - **Les rayons gamma**, de fréquences et d'énergies beaucoup plus élevés et par conséquent plus pénétrants, donc plus dangereux et responsables d'atteintes humaines graves.

## - **La contamination du aux rayonnements ionisants**

La contamination des salariés se fait suivant deux voies :

- Par irradiation externe, où la source radioactive se trouve à l'extérieur de l'organisme et les radiations atteignent le premier organe qui est donc la peau.
- Par irradiation interne, où la source radioactive se trouve à l'intérieur de l'organisme, soit au niveau de la peau par dépôt cutané de radioéléments soit au niveau des différents organes après absorption de substances radioactives par voies respiratoires (gaz, poussière), par voie orale (solides et liquides) ou par voie cutanée suivie de passage dans le sang. Dans les cas, les atteintes peuvent être graves.

## - **Rassemblements des radioéléments**

Les radioéléments sont rassemblés en quatre groupes :

- Groupe 1 : les radioéléments à très forte toxicité : plutonium, radium.
- Groupe 2 : les radioéléments à forte toxicité : césium, cobalt, iode, strontium, thallium.
- Groupe 3 : les radioéléments à toxicité moyenne : carbone, chrome, potassium, sodium, soufre.
- Groupe 4 : les radioéléments à faible toxicité : uranium, tritium, krypton.

Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme humain sont :

- Des lésions cellulaires : inhibition de la mitose et des enzymes, prolifération de cellules malignes, altération des chromosomes ;
- Des lésions cutanées : brûlures, kératoses, verrues, ulcérations, radiodermites ;
- Des atteintes oculaires : cataractes et conjonctivites ;
- Une altération du sang : diminution des globules rouges et blancs, leucémies possibles pour les fortes doses d'irradiation.

### **5.2.6.2 Les risques dus aux rayonnements non ionisants**

Les rayonnements non ionisants sont des émissions électromagnétiques variées, des ondes radio aux rayonnements gamma et cosmiques, dont la lumière visible. Ils peuvent présenter des risques professionnels aux salariés qui y sont exposés.

Le rayonnement électromagnétique est une onde obtenue par la réunion de deux champs, électrique et magnétiques, placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre et se propageant en ligne droite formant un rayon, suivant un mouvement rectiligne sinusoïdal. [3]

- **La lumière visible**, elle s'étend du violet au rouge, encadré par les ultraviolets et les infrarouges. Elle fait partie de la vie et permet la vision de tout ce qui nous entoure. Normalement, elle ne porte pas atteinte à l'organisme humain. Cependant, la lumière intense due à des amplitudes très élevées des ondes électromagnétiques peut présenter quelques risques tant pour la peau (photosensibilisation cancer) que pour les yeux (conjonctivites suivies cataractes et éventuellement des lésions rétiniennes).
- **Les rayonnements ultraviolets**, sont émis naturellement par le soleil et artificiellement dans les lampes à incandescence et les lampes fluorescentes. Ils agissent sur les cellules vivantes de l'organisme pour y déclencher des réactions chimiques complexes avec formation de radicaux libres particulièrement dangereux, qui peuvent donner naissance à des détériorations et des mutations cellulaires.
- **Les rayonnements infrarouges**, Toute surface chaude émet un rayonnement IR, qu'elle soit naturelle (volcans, soleil, êtres vivants) ou artificielle (fours, étuves, métaux et verres fondus, etc.). Plus la surface est chaude, plus l'émission des infrarouges est grande. [3]

Le principal effet biologique des rayons IR est donc les brûlures thermiques par échauffement des parties du corps exposées, Les atteintes majeures sont celles de la peau (des brûlures thermiques destructrices des cellules de l'épiderme et du derme non prises comme maladies professionnelles) et des yeux (lésions de la cornée, de la rétine et du cristallin) qui sont prises en charge comme maladies professionnelles.

- **Les rayons lasers**, sont des rayonnements électromagnétiques, visibles ou non, et enrichis artificiellement en photons. Il en résulte qu'une lumière laser est beaucoup plus énergétique que le rayonnement électromagnétique de même fréquence. Les lasers ne conduisent pas à des maladies professionnelles, On distingue quatre classes de rayons lasers.

-**Les lasers de classes 1 et 2** ne représentent pas de risques graves ; ils éblouissent les yeux tout au plus ;

-**Les lasers de classe 3** et surtout les lasers de classe 4 très puissants sont très dangereux, même pour des expositions de très courtes durées, responsables de lésions oculaires et des brûlures de la peau.

- **Les ondes électromagnétiques**, sont des rayonnements électromagnétiques de faible énergie tels que les rayonnements radio électromagnétiques, couramment utilisés pour la télétransmission de son et d'images (radio, télé), dans la recherche scientifique et médicale et pour les fours à microondes.

### **5.2.6.3 Les mesures de prévention contre les rayonnements**

- Contrôler les sources (éviter les fuites)
- Utiliser des écrans de protection
- Organiser le travail (zone à accès contrôlé)
- Veiller au port effectif des EPI
- Informer les salariés des risques
- Former les salariés à l'utilisation du matériel et aux risques
- Organiser la surveillance médicale spéciale pour les salariés exposés aux rayonnements ionisants
- Effectuer des contrôles par dosimétrie

### **5.2.7. Les manutentions manuelles**

La manutention manuelle est définie comme « toute opération de transport ou de soutien de charge, dont le levage, la pose, la traction, le port ou le déplacement, qui exige l'effort d'un ou plusieurs travailleurs. Donc, c'est l'énergie humaine qui, seule, initie les mouvements de l'objet.

Les manutentions font appel au travail de muscles, des os et des articulations des différents organes comme les membres supérieurs et inférieurs. A la longue, il y a la fatigue et l'usure du système musculaire et du squelette, avec l'apparition de troubles musculosquelettiques [3]

Comme maladies professionnelles (les plus souvent déclarées et reconnues par la sécurité sociale), Il s'agit essentiellement des atteintes :

- Des muscles (crampes).
- Des tendons (tendinites).
- Des nerfs au niveau des articulations (hygromas) ;
- Des vertèbres lombaires (sciatique par hernie discale) ;
- Du ménisque du genou (lésion avec fissuration et rupture) ;
- Du canal carpien (syndrome carpien) ;
- Des lombagos du dos, douleurs au niveau des muscles sacro-lombaires accompagnées des sciatiques qui durent quelques jours puis disparaissent

#### **5.2.7.1. Les mesures de prévention contre les manutentions manuelles**

- Utiliser des engins et accessoires conformes à la réglementation Vérifier régulièrement leur état et procéder aux contrôles réglementaires
- Utiliser des moyens adaptés à la tâche, dans les conditions prévues par le règlement intérieur et selon les prescriptions du fabricant
- Limiter l'usage aux seules personnes formées et habilitées
- Veiller aux conditions de visibilité et au bon état des sols
- Organiser la circulation des personnes et des véhicules
- Signaler et entretenir les voies de circulation et aires de manœuvre

#### **5.2.8. Les manutentions mécaniques**

Il s'agit de manutentions faisant appel à des équipements de travail et des appareils à moteur électrique ou thermique, mobile ou non, autre que portatif.

**Exemple :** les charriots de manutentions élévatrices à moteur, les charriots de manutentions automotrices à conducteur porté ou non.

#### **5.2.8.1. Les mesures de prévention contre les manutentions mécaniques**

- Utiliser des engins et accessoires conformes à la réglementation Vérifier régulièrement leur état et procéder aux contrôles réglementaires
- Utiliser des moyens adaptés à la tâche, dans les conditions prévues par le règlement intérieur et selon les prescriptions du fabricant
- Limiter l'usage aux seules personnes formées et habilitées
- Veiller aux conditions de visibilité et au bon état des sols
- Organiser la circulation des personnes et des véhicules
- Signaler et entretenir les voies de circulation et aires de manœuvre

#### **5.2.9. Les risques de circulation et de transport**

Les employés se rendent fréquemment à leur atelier, à leur entreprise ou sur les voies publiques. Ces mouvements entraînent des chutes à pied plein, des glissades, des bosses, des chutes de plus de 3 mètres ou d'autres blessures liées au travail. Ces différents risques sont à l'origine de blessures et de traumatismes de gravités variables, d'intoxications et différentes autres atteintes corporelles, allant jusqu'à la mort. Ainsi, on distingue :

- Les risques dus aux déplacements (circulation et transport) dans l'entreprise ;
- Les risques dus aux déplacements à l'extérieur de l'entreprise (accidents de voitures).

#### **5.2.9.1. Les mesures de prévention contre la circulation et le transport**

- Mettre à disposition des véhicules adaptés aux situations (climatisation, airbag passager...)
- Entretenir périodiquement les véhicules
- Réactualiser la formation du personnel sur la manière de conduire en sécurité (respect du Code de la route)
- Signaler, éclairer et entretenir les voies de circulation et les zones de manœuvre
- Établir des règles de priorité entre piétons et véhicules
- Organiser les déplacements (horaires, temps de trajet, itinéraires, état de la météo...)
- Ne pas téléphoner en conduisant (répondeurs, régulation des appels téléphoniques...)
- Interdire l'alcool au volant
- Vérifier périodiquement l'aptitude médicale

# **Chapitre2:**

# **La Maintenance**

## **1. Introduction**

Les méthodes de maintenance s'appuient souvent sur des renseignements fondés sur des preuves pour prédire le rendement futur. Elles sont formalisées dans une discipline systématique qui repose sur une évaluation technique complète des événements qui se produisent durant les phases expérimentales ou opérationnelles. Les méthodes d'entretien fournissent des méthodes et des renseignements pour la conception des produits qui nous permettent de faire mieux qu'auparavant et, plus important encore, de prédire le comportement futur de l'équipement.

Dans ce chapitre, nous allons discuter de la maintenance en général ces notions de base telles que sa définition, ses objectifs opérationnels et financiers, ses cinq niveaux. Nous définirons ensuite les différents types d'entretien, leurs avantages et leurs désavantages. Alors nous allons introduire l'entretien préventif et ses trois types. Nous passerons ensuite aux activités de maintenance. Alors on va incorporer quelques lois (fiabilité, Weibull...etc.). Enfin, nous indiquerons la mise en place de la maintenance préventive.

## **2. Maintenance**

### **2.1. Définition de la maintenance**

La maintenance industrielle peut être définie comme l'entretien ou la remise en état du matériel de production dans un état défini en amont afin qu'il soit capable de fournir le service prévu. Lorsqu'une société installe un système pour entretenir son matériel de production, elle peut éviter de nombreux problèmes et réduire les pertes de productivité.

La maintenance est définie selon la norme NF-X60-010 [13] « la maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise ». [14]

### **2.2. But de la maintenance**

La maintenance industrielle vise principalement à assurer le bon fonctionnement de l'équipement de production d'une entreprise industrielle. Mais précisément les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types : [15]

#### **2.2.1. Objectifs opérationnels**

- Garantir la sécurité et l'efficacité des opérations en tout temps.
- Conserver le matériel dans le meilleur état possible.

- Veiller à la disponibilité maximale de l'équipement à un coût minimal.
- Prolonger la durée de vie de l'équipement.
- Maintenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.

### 2.2.2. Objectifs financiers

- Fournir un service d'entretien en respectant un budget.
- Réduire au minimum les coûts d'entretien.

### 2.3. Différents niveaux de maintenance

La norme X60-010 une répartition en cinq niveaux de la maintenance, d'une part, pour classer les différentes opérations de maintenance en fonction de leur importance, d'un autre côté, déterminer la famille des intervenants qui mèneront les opérations en toute sécurité. [16]

Le tableau suivant (tableau 2.1) montre la différence entre les cinq niveaux selon AFNOR (Association française de normalisation créée en 1929)

**Tableau (2.1) : les niveaux de maintenance**

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
- Réglages simples - Sur place - personne non qualifiée ne peut réaliser l'opération  <i>Exemple : Changement d'un consommable</i>	- Actions peu complexes - Sur place - Nécessite un technicien habilité pour réaliser l'opération  <i>Exemple : Changement d'un relais</i>	- Actions complexes - Sur place ou en atelier - Nécessite un technicien spécialisé  <i>Exemple : Changement d'une pompe</i>	- Action de grande importance - En atelier spécialisé - Nécessite une équipe avec un responsable spécialisé  <i>Exemple : Réparation spéciale</i>	- Actions complexes - Chez le constructeur - Nécessite l'équipe de construction  <i>Exemple : Reconstruction d'un appareil</i>

#### 2.3.1. Maintenance du premier niveau

Il s'agit de réglages simples fournis par le constructeur ou le service d'entretien, à l'aide de composants accessibles sans démontage ni ouverture de l'équipement. Par exemple l'échange d'éléments consommables, facilement accessible (fusible, voyants...etc.).

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'opérateur du bien, sans outils particuliers basés sur les instructions de fonctionnement, et tout ça et faites sur place.

### **2.3.2. Maintenance de deuxième niveau**

Il s'agit du dépannage d'échange standard des éléments fournis à cet effet et des opérations mineures de maintenance préventive. Par exemple :

- Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements thermiques.
- Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.
- Graissage des composants.

Ces interventions de second niveau sont accomplies sur place, et peuvent être réalisées par un technicien ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçu une formation pour les exécuter en toute sécurité.

### **2.3.3. Maintenance de troisième niveau**

Les interventions de troisième niveau s'agissent de :

- Identification des pannes.
- Réparation au niveau des composants ou par échange d'éléments fonctionnels.
- Réparations mécaniques mineures.
- Réglage général et réaligement des appareils.
- Organisation de la maintenance préventive conformément aux instructions reçues.

Ces interventions peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans un atelier de maintenance.

### **2.3.4. Maintenance du quatrième niveau**

Il s'agit de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception éventuellement des mises à neuf (démontage, réparation, remontage, réglage).

Ces interventions de quatrième niveau doivent être réalisées dans des ateliers particuliers, par des organismes hautement spécialisés et des moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention.

### **2.3.5. Maintenance du cinquième niveau**

Ce niveau couvre tous les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation majeure, d'achèvement des remises à neuf. Confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services, par un personnel de maintenance en charge de ces travaux doit posséder des compétences technologiques multiples (électricité, mécanique, pneumatique, automatique, ...), ce personnel sait les règles de gestion d'un projet technique.

## 2.4. Types de maintenance

La maintenance des équipements constitue une contrainte réglementaire pour les Entreprises possédant des matériels sur lesquels travaillent des salariés.

L'entreprise a le choix quant à la mise en œuvre de cette maintenance (interne ou Externe, planifiée ou non). Ce choix est à la fois technique, organisationnel et économique. Il doit répondre aux besoins des utilisateurs des équipements (de production en général). Des types différents peuvent être appliqués à des équipements différents.

La figure suivante (Figure 2.1) [17] montre les différents types de maintenance accessibles à une entreprise.

### 2.4.1. Maintenance corrective

La maintenance corrective est une maintenance qui regroupe l'ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

La Maintenance effectuée après défaillance qui vise à intervenir à la suite de pannes, cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles, ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité, il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs. [18]

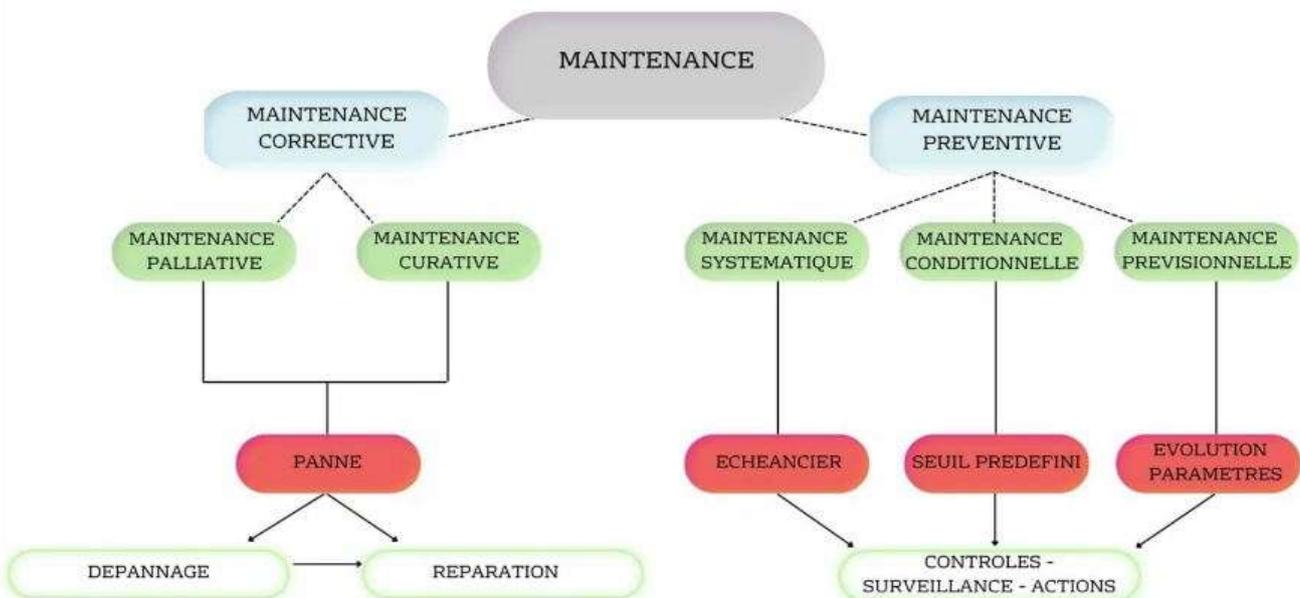


Figure (2.1) : Types de la maintenance

#### **2.4.1.1. Avantages de la maintenance corrective**

La maintenance corrective donne de bons avantages pour une machine défectueuse. Elle élimine les avaries et les altérations qui empêchent le bon fonctionnement de quelques éléments matériels grâce à la réparation, la restauration de son état antérieur, et le remplacement des éléments défectueux. Réduction des coûts d'investissement en matière de commande des machines. Il n'est pas nécessaire de planifier une maintenance corrective en cas d'équipement défectueux.

#### **2.4.1.2. L'inconvénient de la maintenance corrective**

Bien qu'il y ait des avantages, il y a aussi certains désavantages de la maintenance corrective, dont certains sont donnés ci-dessous :

- **Imprévisibilité accrue** : puisqu'il n'y a aucune planification impliquée pour empêcher l'occurrence d'échec, ses conséquences peuvent être plus grandes. Il faut savoir que lorsqu'un problème va survenir, quelles seront ses conséquences, quels seront les outils nécessaires pour le réparer ou le remplacer, qui va le corriger. Mais dans maintenance corrective, l'équipement n'est pas bien traité après l'achat et, par conséquent, les risques de défaillance ne sont pas prévisibles et peuvent endommager de manière inattendue l'ensemble du système.
- **Opérations en pause** : Une panne d'équipement peut être amenée à suspendre les opérations d'autres équipements. Une défaillance inattendue peut endommager davantage le système. Lorsque de telles pannes surviennent de manière inattendue, tous les techniciens doivent arrêter leur travail et se concentrer sur l'identification des moyens de résoudre les pannes. Cela entraîne généralement un retard dans le calendrier de production.
- **Coût de maintenance accru** : Il existe certaines machines pour lesquels la maintenance corrective peut être plus coûteuse. Les ressources et les outils nécessaires pour réparer la défaillance de ces dernières peuvent être plus chère que l'utilisation d'outils pour l'empêcher de tomber en panne. Cela augmente également les coûts de main-d'œuvre.
- **Problèmes de sécurité** : la défaillance de certains actifs cause des dommages plus importants au système. Certains d'entre eux peuvent être dangereux et peuvent affecter la santé des employés. Cela affecte également l'environnement de travail. Une telle défaillance d'actifs doit être maintenue immédiatement. La maintenance peut être

précipitée, ce qui peut entraîner un risque plus élevé de travail dangereux et d'environnement dangereux.

#### **2.4.2. Maintenance préventive**

Définition AFNOR de la maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. ».

La maintenance préventive est donc, comme son nom l'indique, de la prévention par l'entretien régulier d'une machine ou d'un bien. Elle consiste à faire des contrôles selon des normes établies et/ou conformément aux instructions du fabricant, mais également en fonction de l'expérience humaine et des historiques d'interventions réalisés sur le bien.

Généralement, la maintenance préventive s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, changement de la courroie de synchronisation ...) [17]

##### **2.4.2.1. Les objectifs de la maintenance préventive**

Le but principal de la maintenance préventive est de limiter le risque de dysfonctionnement et de réduire le nombre et la fréquence des pannes des machines. A travers cet objectif, on distingue :

- Réduire la fréquence des arrêts de production ;
- Diminuer les temps d'arrêts des machines pour réparation ;
- Augmenter la durée de vie des machines et équipements ;
- Prévoir les interventions de maintenance corrective pour les réaliser les meilleures conditions ;
- Mieux gérer les stocks de pièces de rechange ;
- Eviter toute consommation superflue d'énergie, de lubrifiant ou de consommables ;
- Réduire le budget de maintenance ;
- Améliorer les conditions de travail des personnels ;
- Limiter voire supprimer les causes d'accidents graves.

#### **2.4.2.2. Les différents types de la maintenance préventive**

On distingue trois types de maintenance préventive :

- La maintenance systématique.
- La maintenance conditionnelle.
- La maintenance prévisionnelle.

##### **-Maintenance préventive systématique**

La maintenance préventive systématique est importante d'un point de vue criticité concernant les premières étapes de dégradation sur une pièce d'un équipement. Avec une GMAO efficace, elle peut être réalisée à intervalles prédéfinis, ou suivant un critère d'utilisation, sans prendre en compte les conditions d'utilisation de la machine.

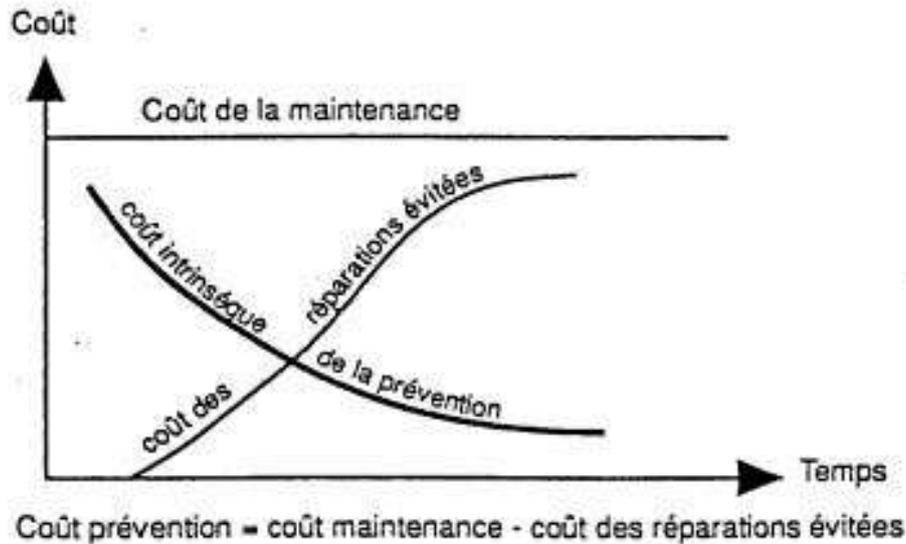
Par exemple : le changement d'une courroie de distribution d'une voiture tous les 150 000 kilomètres, ou le changement d'un néon toutes les 7 000 heures d'utilisation.

La maintenance systématique nécessite une solide connaissance des règles de dégradation, comme la courbe de vie d'un roulement à billes. Elle doit être réalisée de façon fiable, de manière à éliminer tout autre besoin de vérification supplémentaire entre deux interventions ou d'éviter une surveillance supplémentaire en dehors des périodes d'inspection.

Ce type de maintenance est réalisé sur des équipements ne nécessitant pas de coûts de changement de pièces élevés (voir la figure 2.2). Cela comprend :

- Le changement d'huile, de roulements, de joints, de ressorts, de contacts, de résistances, de lampes, etc.
- Le réglage de tension de courroie, de la pression, des potentiomètres, etc.
- Le contrôle de niveaux, de couple de serrage, etc.

L'inconvénient de la maintenance planifiée systématique réside dans la nécessité de déterminer la fréquence de maintenance idéale des pièces.



**Figure (2.2) : Coût de la maintenance systématique**

### **-La maintenance préventive conditionnelle**

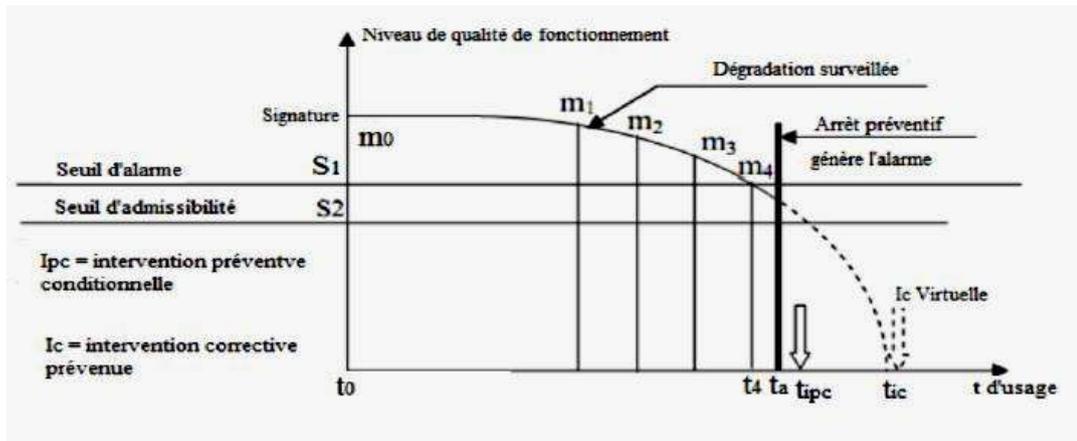
La maintenance préventive conditionnelle requiert la surveillance du fonctionnement d'une machine, selon certains paramètres (pression, niveau, débit, etc.). Des résultats de ces contrôles sont planifiés des opérations de maintenance industrielle.

Ce type de maintenance permet de pallier les inconvénients d'une maintenance systématique. Elle ne requiert pas de connaissances supplémentaires, si ce n'est la comparaison des contrôles avec les seuils prédéfinis.

La maintenance conditionnelle peut être continue avec un enregistrement permanent des paramètres relevés, ou discontinue avec une mesure périodique de ces paramètres.

#### **▪ Principe de la maintenance conditionnelle**

La figure (2.3) montre le principe de la maintenance conditionnelle (les interventions de la maintenance préventive conditionnelle). Une intervention préventive conditionnelle (IPC) programmée, s'il y a une mesure périodique d'une dégradation touchant le seuil d'alarme (un arrêt préventif).



**Figure (2.3) : Intervention de la maintenance conditionnelle.**

La signature est définie par une prise de référence de l'état de bonne marche à l'origine. Les mesures sont de simples observations visuelles, des images (spectre...). Probablement, elles sont changées par des alertes présélectionnées, ou des visites espacées de  $\Delta t$  de telle façon que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

La connaissance de la loi de dégradation, nous permet de prendre des mesures qui ne peuvent pas débiter à  $t_0$  (sauf signature). Les mesures peuvent être collectées par rondes au niveau du centre de surveillance.

- L'arrêt sera demandé automatiquement par l'alarme, ou différé par une décision volontaire jusqu'à l'IPC programmée et organisée.
- L'intervention préventive conditionnelle sera préparée à partir de l'alarme, selon un temps de réflexe du service de maintenance prédéterminé. [20]

### **-La maintenance prévisionnelle**

La maintenance prévisionnelle, aussi appelée maintenance prédictive, est réalisée à l'aide d'estimations suite à des analyses et évaluations des paramètres de la machine.

C'est une maintenance coûteuse, qui nécessite des outils sophistiqués, et s'applique seulement à des éléments ayant une criticité importante d'un point de vue sécurité et coût. Par exemple :

- La thermographie infrarouge ;

- Les analyses vibratoires (global et spectral) ;
- L'analyse d'huiles ;
- Contrôles non-destructifs (CND) : ultrasons, ressuage, émission acoustique, courant de Foucault.

## 2.5. Activités de la maintenance

- **Inspection :**

C'est un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance.

- **Surveillance :**

C'est l'activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objet d'observer l'état réel d'un bien. La surveillance se distingue de l'inspection en ce qu'elle est utilisée pour évaluer l'évolution des paramètres du bien avec le temps.

- **Réparation :**

C'est les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.

- **Dépannage :**

Ce sont les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

- **Amélioration :**

Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise.

- **Modification :**

Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à changer la fonction d'un bien.

- **Révision :**

Ensemble complet d'examen et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau requis de disponibilité et de sécurité.

- **Reconstruction :**

Action suivant le démontage d'un bien et la réparation ou le remplacement des composants qui approchent de la fin de leur durée de vie utile et/ou devraient être systématiquement remplacés. La reconstruction diffère de la révision en ce qu'elle peut

inclura des modifications et/ou améliorations. L'objectif de la reconduction est normalement de donner à un bien une vie utile qui peut être plus longue que celle du bien d'origine. [19]

## 2.6. Fiabilité et maintenance préventive

En termes de statistique, la fiabilité est une fonction du temps  $R(t)$  qui représente la probabilité de bon fonctionnement d'un matériel. En termes de qualité, on définit la fiabilité d'un matériel comme l'aptitude à maintenir la conformité à sa spécification d'origine.

On distingue :

- La fiabilité intrinsèque, qui est propre à un matériel, selon un environnement donné, et ne dépend que de la qualité de ce matériel ;
- La fiabilité extrinsèque, qui résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de la maintenance. Elle est relative à l'intervention humaine. [17]

### 2.6.1. Taux de défaillance

Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  est un estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure). Il est présenté par le rapport :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{Durée d'usage}}$$

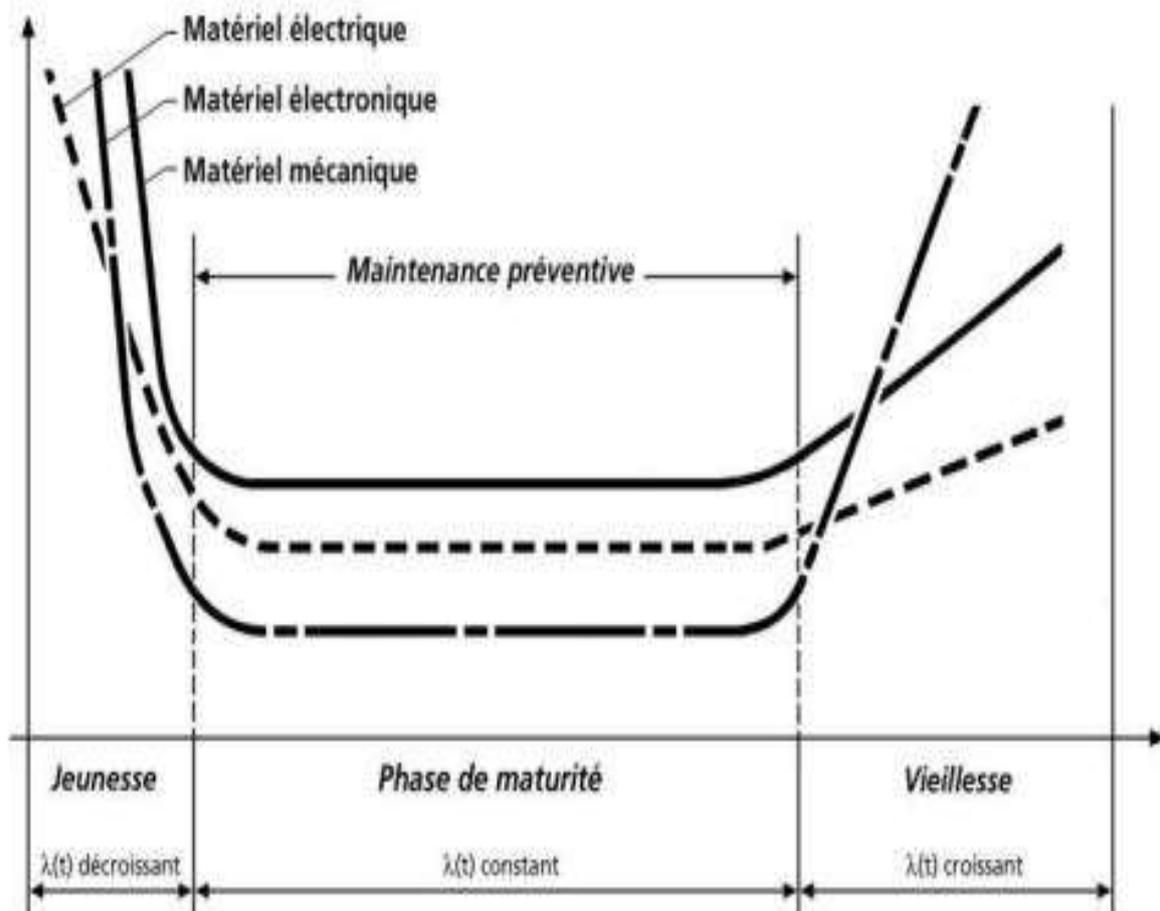
Liée au problème de défaillance, la vie des équipements se présente en trois phases :

- Phase de jeunesse :  $\lambda(t)$  décroît rapidement. C'est la période de mise en service et de rodage de l'installation. Les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfections de montage.
- Phase de maturité :  $\lambda(t)$  est pratiquement constant. C'est la période de vie utile où la défaillance est aléatoire. Le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimal de l'équipement.
- Phase de vieillesse :  $\lambda(t)$  croît rapidement. C'est la période d'obsolescence, à dégradation accélérée. Souvent, on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion. À un certain point de  $\lambda(t)$ , le matériel est mort.

La détermination de seuil de réforme est obtenue à partir de critères technico-économiques. Une étude de déclassement sera à envisager.

Dans la première phase, on ne pratique que de la maintenance corrective. C'est seulement dans la seconde phase que la maintenance préventive est justifiée.

Le graphe représentant la variation de taux de défaillance, appelé « courbe en baignoire », possède trois allures différentes selon le matériel mécanique, matériel électrique ou matériel électronique (Figure 2.4). [17]



**Figure (2.4) : Courbe en baignoire taux de défaillance**

### 2.6.2. Moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF)

La MTBF, ou moyenne des temps de bon fonctionnement, est la valeur moyenne des temps entre deux défaillances consécutives. Pour une période donnée de la vie d'un matériel :

$$MTBF = \frac{\sum_{i=0}^n TBF_i}{n}$$

Ces valeurs sont calculées à partir des observations, d'une exploitation statistique de l'historique, des essais de durée de vie. [17]

### 2.6.3. Lois de fiabilité

- **Distribution exponentielle** : Cette loi est applicable pour la période où le taux de défaillance est constant. Tous les matériels sont concernés durant leur vie utile. La fiabilité ou la possibilité de survivre entre l'instant 0 et t est :

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t).dt} = e^{-\lambda(t)}$$

On démontre que l'espérance mathématique, qui représente le temps moyen entre deux défaillances, est égale à:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

- **Loi de Weibull** : Contrairement au modèle exponentiel, la loi de Weibull couvre le cas où le taux de défaillance est variable et permet de s'ajuster aux périodes de jeunesse et de vieillesse.

L'expression de la fiabilité devient :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta}$$

Avec ses trois paramètres  $\beta$ , paramètre de forme ( $\beta > 0$ ),  $\eta$ , paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ ) et  $\gamma$ , paramètre de position ( $-\infty < \gamma < +\infty$ ). L'espérance mathématique est : [17]

$$MTBF = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \cdot \eta + \gamma$$

#### 2.6.4. Périodicité de la maintenance préventive

Par principe, la visite systématique est déclenchée juste avant l'apparition de la défaillance. La périodicité de visite est alors :

$$T = k \cdot MTBF$$

Avec  $k$  le coefficient d'optimisation ou paramètre économique. Plus on choisit  $k$  petit, moins il y a de maintenance corrective résiduelle. Mais si on intervient plus souvent, on augmente les coûts directs et le gaspillage. On devra définir une politique de maintenance et fixer le seuil de correctif résiduel entre 5 et 10 %. [5]

#### 2.7. TPM et maintenance préventive

La TPM (Total Productive Maintenance) est une philosophie de maintenance industrielle caractérisée particulièrement par l'auto-maintenance effectuée par les opérateurs de fabrication. Le niveau technique de l'atelier et la technicité des opérateurs doivent progresser ensemble pour pouvoir améliorer le rendement du couple homme-machine.

La TPM est basée sur la compréhension mutuelle et le partage des tâches de maintenance. Cela implique que les opérateurs soient intéressés à leur outil de travail. Il est évident que l'opérateur de machine est le mieux placé pour constater les conditions de l'apparition des pannes. Un conducteur attentionné détecte les anomalies, les bruits anormaux pendant la conduite. Il réalise la maintenance de base sur sa voiture, par exemple le contrôle de niveau et le remplacement de l'huile, la surveillance de l'usure des plaquettes de frein. Suivant le principe de la TPM, le plan de maintenance préventive tiendra compte aussi des opérations effectuées par les opérateurs. [5]

Pour qu'il soit possible de confier les tâches de maintenance préventive aux agents de production, il faut que ceux-ci soient capables de les réaliser :

- en termes de charge,
  
- en termes de compétence.

Pour pouvoir intégrer certaines opérations dans leur charge de travail, il faut que le temps de réalisation soit le plus court possible. Le travail proposé doit être simple, bien visible et bien accessible. Pour cela, il faut étudier la possibilité de simplifier l'exécution ou de rendre le travail exécutable avec la machine en marche, par une modification mineure de l'installation (figure 1.6).

Il existe d'autres moyens de simplifier le travail. Les procédures écrites, les instructions techniques, les affichages permettent à la fois de simplifier le travail et de l'exécuter correctement. Les instructions techniques sont élaborées non seulement pour les applications de la TPM, mais aussi pour servir le besoin des intervenants de maintenance.

Toutes ces applications devront être complétées par la formation des agents. [17]

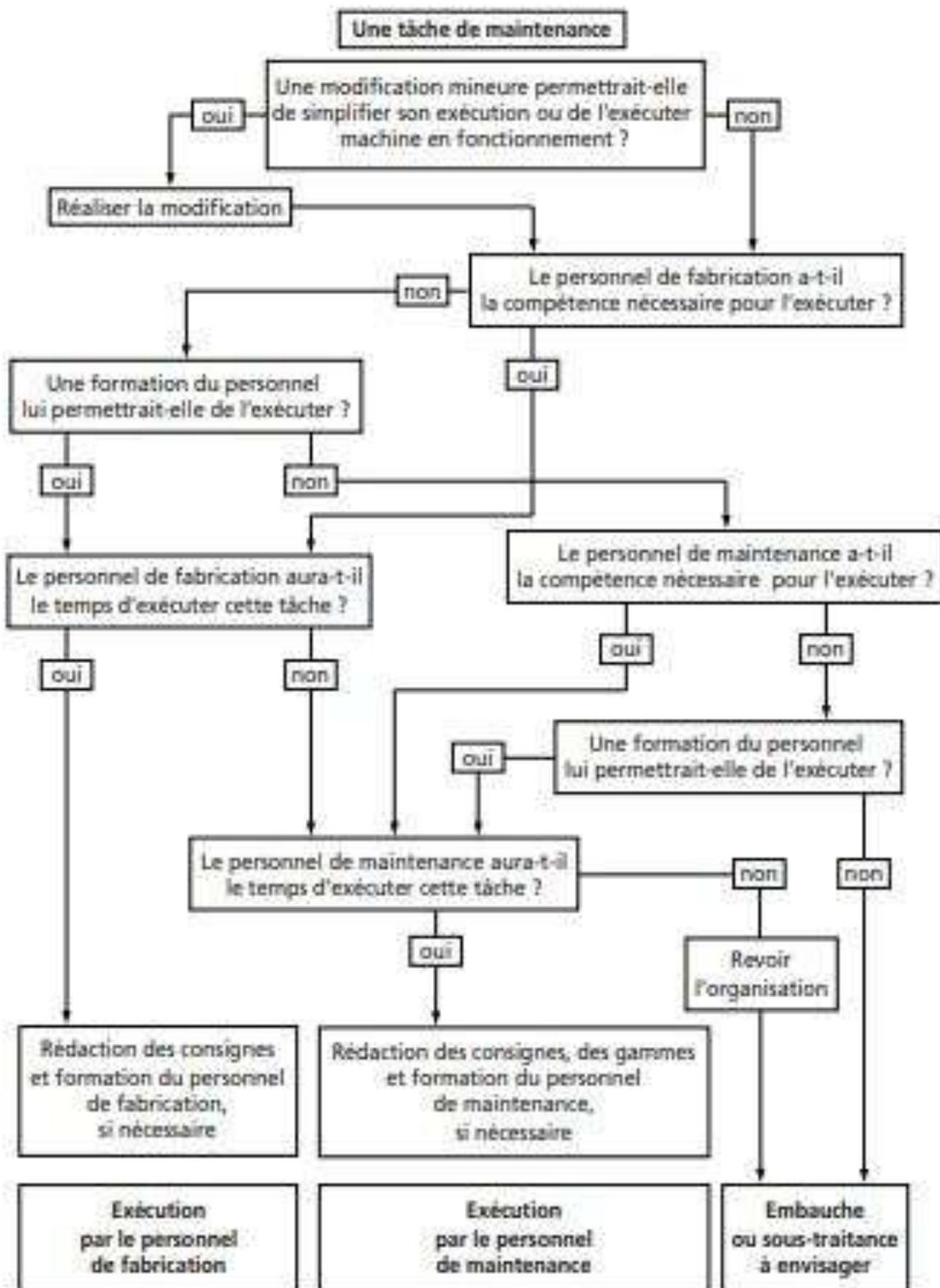


Figure (2.5): Exemple d'une tâche de maintenance

## **2.8. Mise en place de la maintenance préventive**

### **2.8.1. Démarche participative**

La démarche de mise en place de la maintenance préventive est tout d'abord de faire participer les différents services aux travaux préliminaires pour pouvoir élaborer le plan de maintenance. C'est la constitution d'une structure de nomenclature du matériel de l'entreprise. Pour cette étape, les méthodes ont besoin de la participation de la production, l'étude, la qualité, la comptabilité et la réalisation maintenance. Cette démarche participative a comme objectif d'adopter les vocabulaires et la forme de la structure qui sont convenables pour tous. Dans la plupart des cas, il est difficile de faire participer tout le monde. Les méthodes peuvent commencer seules pour faire avancer les travaux et présenteront ce projet au cours d'une réunion de validation. Après validation de la structure, les méthodes peuvent finir les niveaux techniques de la nomenclature, de préférence avec la participation des intervenants de maintenance. Il sera souhaitable d'avoir la collaboration de la production et de la réalisation maintenance pour les trois dernières étapes :

- Le choix des machines à mettre sous préventif,
- L'élaboration du plan de maintenance,
- La planification des arrêts.

À chaque étape d'avancement, une réunion d'information sera nécessaire. Il faut que les intervenants de maintenance soient convaincus par la démarche et les objectifs.

### **2.8.2. Tableau de bord**

Le tableau de bord caractérise l'état et l'évolution des matériels et du service maintenance. Il doit pouvoir mesurer l'efficacité de la politique de maintenance et justifier ainsi la mise en place de la maintenance préventive. Cet outil de synthèse est composé des éléments suivants :

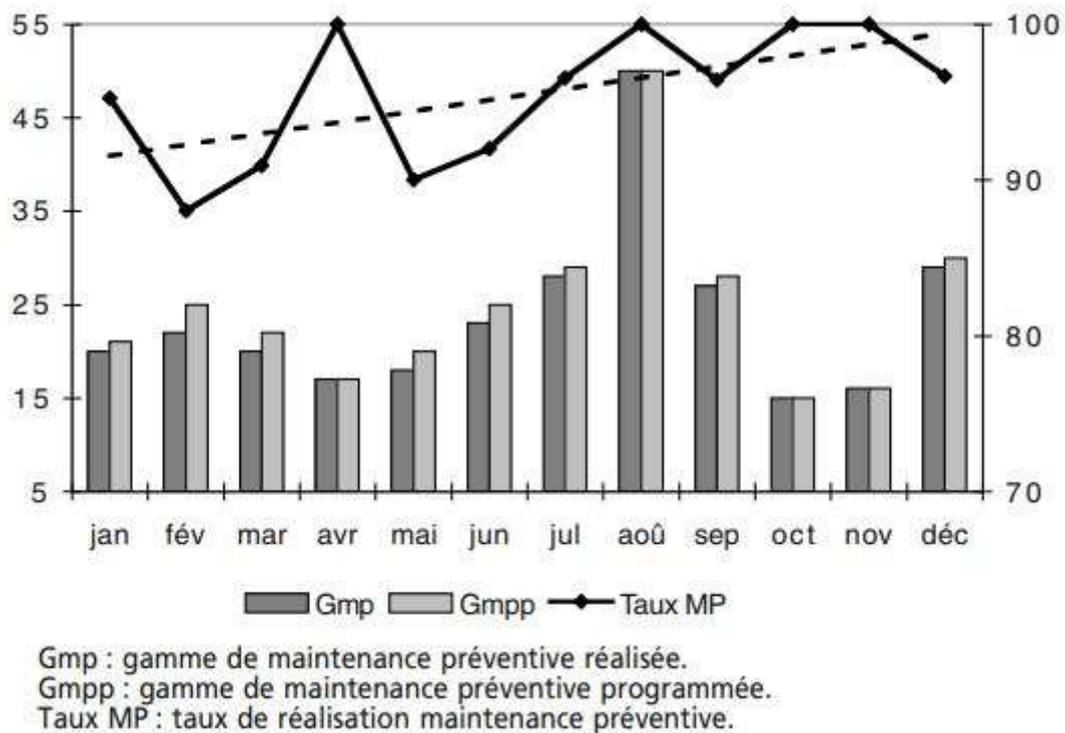
- Indicateur : valeur quantifiant une situation, un résultat ou un état ;
- Ratio : indicateur relatif ou rapport d'une valeur réelle et d'une valeur de référence.

Il est exprimé en pourcentage. Le tableau de bord se présente sous plusieurs formes.

### 2.8.2.1. Graphes d'évolution

En fonction des intervalles de temps, les graphes peuvent être représentés par les histogrammes des valeurs réelles et des valeurs de référence, les courbes de ratio, de tendance et d'objectif (figure 2.6).

Ces graphes permettent de visualiser les situations, observer les tendances, détecter les dérives afin d'entreprendre des actions correctives pour atteindre l'objectif fixé.



**Figure (2.6) : Exemple de graphe d'évolution.**

### 2.8.2.2. Graphe de répartition

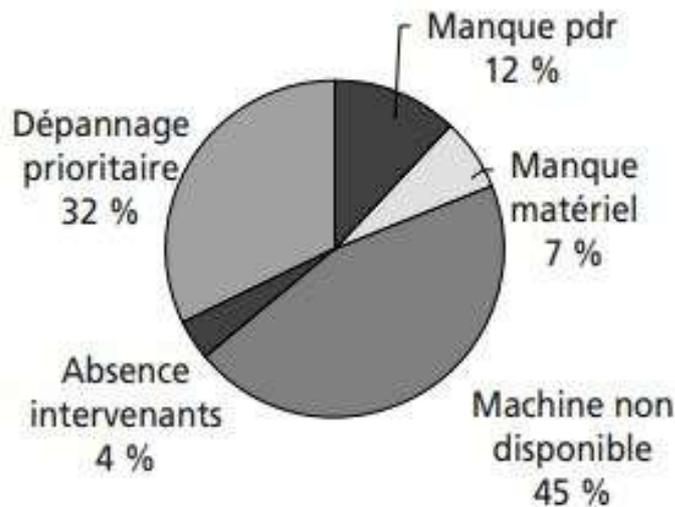
Ce graphe est souvent utilisé pour les analyses (figure 2.7). Il peut être présenté par secteurs, par exemple, répartition des dépenses, répartition des temps, visualisations des causes...

Toute intervention ou toute activité d'un intervenant de maintenance fait l'objet d'un ordre de travail (OT). La valorisation de chaque OT et les analyses de gestion vont permettre :

- La répartition des activités en temps,

- La répartition des dépenses.

L'intérêt commun entre la production et la maintenance est la productivité : moins de panne et plus de quantités produites. Une machine de production engendre alternativement des temps de bon fonctionnement (TBF) et des temps d'arrêt (TA) qui sont imputés soit à la fabrication (TAF), soit à la maintenance (TAM).



Pdr : pièce de rechange

**Figure (2.7): Exemple de graphe de répartition**

### 2.8.2.3. Ratios économiques

$$R1 = \frac{\text{Coûts de maintenance} + \text{Coûts d'indisponibilité}}{\text{Valeur ajoutée}}$$

Les coûts d'indisponibilité ou coûts de perte de production sont en général supérieurs aux coûts de maintenance. En premier lieu, il est préférable de chercher à les optimiser.

$$R2 = \frac{\text{Coût total de maintenance}}{\text{Valeur des actifs immobilisés à maintenir}}$$

Le ratio R2 demande une actualisation des valeurs actives immobilisées.

$$R3 = \frac{\text{Coût cumulé de maintenance depuis sa mise en service}}{\text{Nombre d'heures de fonctionnement depuis sa mise en service}}$$

L'évolution du ratio R3 dans le temps permet de suivre la rentabilité du matériel.

#### 2.8.2.4. Ratios techniques

$$R4 = \frac{\text{Temps de réalisation de maintenance préventive}}{\text{Temps programmé pour maintenance préventive}}$$

Le ratio R4 ou taux de réalisation de maintenance préventive permet de connaître l'implication des services maintenance et production dans la politique de préventif, suivre la réalisation de la maintenance préventive et analyser les causes de non-respect du planning. Les causes de non-respect du programme prévisionnel sont en général : manque des pièces de rechange, manque de matériel, machine non disponible, absence des intervenants, priorité au dépannage...

$$R5 = \frac{\text{Temps de maintenance préventive}}{\text{Temps total de maintenance}}$$

Le ratio R5 permet de mesurer la maîtrise de la politique de maintenance.

$$R6 = \frac{\text{Temps de maintenance corrective}}{\text{Temps total de maintenance}}$$

Le ratio R6 ou taux de maintenance corrective permet de suivre l'efficacité du plan de maintenance préventive. La maintenance préventive doit réduire la maintenance corrective et le nombre de défaillances et optimiser le temps de maintenance.

$$R7 = \frac{\text{Temps total de maintenance}}{\text{Temps total de fonctionnement}}$$

Le ratio R7 permet de mesurer l'efficacité du service maintenance s'il est calculé d'une manière globale. Il permet de vérifier l'évolution de comportement du bien matériel s'il est calculé pour une installation. Pour une machine donnée, l'évolution des ratios R3 et R7 permet de décider d'une étude de rentabilité qui peut emmener à des actions d'amélioration ou de déclassement. [17]

# **Chapitre 3 :**

# **Machine Learning**

**(Apprentissage automatique)**

## 1. Introduction

Notre imagination a longtemps été captivée par les visions d'une machinerie capable d'apprendre et transmettre l'intelligence humaine, des logiciels capables d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences par l'expérience.

Cette technique est appelée *machine Learning* une sous-catégorie de l'intelligence artificielle et au cœur de la science des données, un domaine très excitant, issu de nombreuses disciplines comme les statistiques, l'optimisation, l'algorithmique ou le traitement du signal. Il s'agit d'un domaine d'étude en constante évolution et qui s'est maintenant implanté dans notre société. [21]

Nous utilisons de tels programmes de *Machine Learning* pour découvrir de nouvelles musiques que nous pourrions apprécier, et pour trouver exactement les chaussures que nous voulons acheter en ligne. Ces programmes nous permettent de dicter des ordres à nos Smartphone, et permettent à nos thermostats de régler leurs propres températures, déchiffrer les adresses de courrier mal rédigées mieux que les gens, et peut protéger les cartes de crédit contre la fraude plus vigilante, de l'étude des nouveaux médicaments à l'estimation des pages visualisées pour les versions d'un titre, les logiciels d'apprentissage automatique deviennent essentiels à plusieurs secteurs d'activité. *Machine Learning* a même empiété sur l'amélioration de la sécurité routière (y compris grâce aux véhicules autonomes), la réponse d'urgence aux catastrophes naturelles et l'efficacité énergétique de nos bâtiments et industries. [22]

Dans le présent chapitre, nous avons d'abord défini l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique en tous sens. Puis nous avons abordé aux machines Learning (apprentissage automatique) de son fonctionnement, ces ingrédients et nous nous sommes penchés à ses différents types des problèmes et les modèles de leurs solutions.

## 2. Intelligence artificielle

Définir l'intelligence artificielle (IA) n'est pas chose facile. Le champ est si vaste qu'il est impossible de la restreindre à un domaine de recherche spécifique :

Au sens littéral l'IAC'est« l'ensemble des théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine ». [23]

C'est plutôt un programme multidisciplinaire. S'il avait l'ambition originelle de reproduire les processus cognitifs de l'être humains objectifs actuels consistent plutôt à développer des automates qui résolvent certains problèmes beaucoup mieux que les humains, de toutes les façons disponibles. Ainsi l'IA est à la croisée de nombreuses disciplines : informatique, mathématique (logique, optimisation, analyse, probabilités, algèbre linéaire), sciences cognitives... sans oublier les connaissances spécialisées des domaines auxquelles on souhaite l'appliquer. Et les algorithmes qui la sous-tendent reposent sur des approches tout aussi variées : analyse sémantique, représentation symbolique, apprentissage statistique ou exploratoire, réseaux de neurones, etc. [24]

Pour mieux comprendre la théorie de l'intelligence artificielle, il est nécessaire de se replonger dans les origines de cette dernière. Les premiers éléments remontent à Socrate, qui a ouvert le domaine de la logique amenant la tradition logiciste (mathématiques = extension de la logique) pour mettre en place des systèmes intelligents où il y instaura une qualité importante : l'intelligence artificielle est subordonnée aux lois de la pensée, c'est à dire que la validité des inférences est importante, mais que la capacité de prendre des décisions quand bien même on ne peut déterminer avec certitude laquelle est la meilleure l'est tout autant. Parfois, certaines décisions prises à la hâte sont plus efficaces que celles reposant sur un temps de réflexion : il s'agirait dans un cas pratique d'une intelligence artificielle capable d'exécuter les mêmes tâches qu'un être humain tout en conservant un comportement "rationnel". Par rationnel, on entend qu'il serait capable de prendre des décisions lui permettant d'obtenir le plus de succès possible dans la réalisation des tâches que les hommes lui auraient assignées et qu'il tendrait donc vers la meilleure solution prévisible. [25]

L'économie a participé d'une certaine façon au développement de l'intelligence artificielle grâce à la théorie de la décision qui couple celle des probabilités et de l'utilité. Elle fournit un cadre formel complet pour les décisions en environnement incertain où les probabilités ont la possibilité d'influencer le preneur de décisions. Cela a mené à la création de modèles de prises de décision fondés sur le choix le plus satisfaisant, en somme celui qui se rapproche le plus du comportement humain : la maximisation du gain. Cela pousse l'étude de la balance vitale de l'intelligence artificielle : celle du lien entre la connaissance et l'action. Il n'est a priori pas possible de prendre, le plus souvent, les meilleures décisions sans avoir vécu ou mémorisé les actions entreprises et leurs conséquences. Toute cette partie de l'apprentissage constitue un sous-ensemble pour

l'intelligence artificielle qui est le "Machine Learning", ou "apprentissage automatique". Ce champ d'études a pour but d'améliorer les performances des machines à résoudre des tâches de façon généralisée : on ne cherche pas à faire du par cœur, mais à permettre à une machine de pouvoir donner une réponse à un problème grâce à ce qu'elle a appris auparavant par des exemples qu'elle applique sur le cas qu'on lui donne.[25]

### **3. Machine Learning (Apprentissage automatique)**

#### **2.1. Définition**

L'apprentissage automatique (ou artificiel) (Machine-Learning en anglais) est l'un des domaines de recherche de l'intelligence artificielle. Ce domaine désigne l'aptitude d'un système à acquérir et à intégrer des connaissances de manière autonome. [26]

Comme la façon dont le cerveau humain acquiert la connaissance et la compréhension, l'apprentissage automatique repose sur des Inputs telles que des données de formation ou des graphiques de connaissances, pour mieux connaître les entités, les domaines et les liens qui les unissent. [26]

ML a prouvé utile parce qu'il peut résoudre des problèmes à une vitesse et une échelle qui ne peut pas être dupliqué par l'esprit humain seul. Avec une capacité de calcul massive derrière une seule tâche ou plusieurs tâches spécifiques, les machines peuvent être formées pour identifier les modèles et les relations entre les données d'entrée et automatiser les processus de routine.

Ce concept inclut toute méthode de construction d'un modèle de réalité à partir de données, soit par l'amélioration d'un modèle partiellement ou moins général, soit par la création complète du modèle. [26]

#### **2.2. Fonctionnement de ML**

Le processus de la Machine Learning commence par des observations ou des données, telles que des exemples, une expérience directe ou une instruction. Il cherche des tendances dans les données afin de pouvoir ensuite faire des inférences à partir des exemples fournis. L'objectif principal de la ML est de permettre aux ordinateurs d'apprendre de manière autonome sans intervention ou assistance humaine et d'ajuster les actions en conséquence.

Exemple : ML, Il s'agit de l'écriture d'un programme qui, au début, ne peut rien faire, mais va apprendre à faire quelque chose avec le temps et l'expérience. Comme un être humain apprendrait à faire du vélo : au début on n'y arrive pas du tout, Mais en le faisant et en le faisant bien, on s'améliore de plus en plus, jusqu'à ce qu'on le fasse vraiment bien.

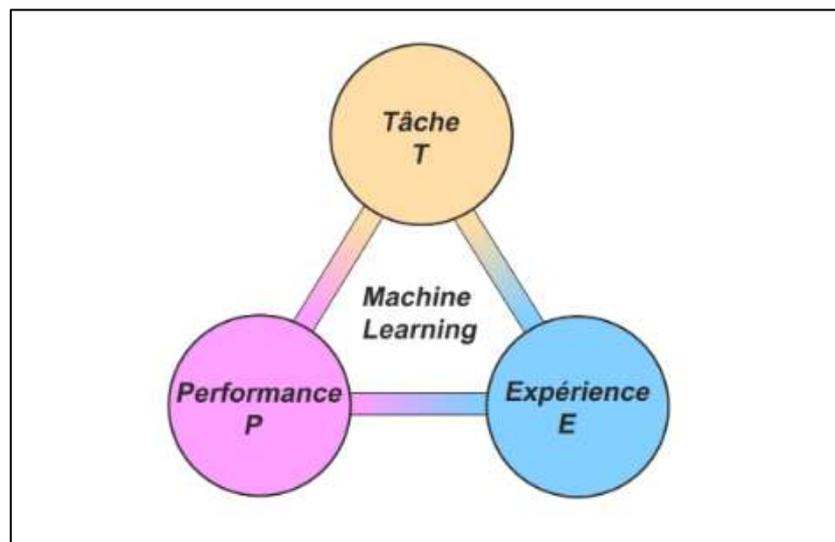
Cet exemple correspond parfaitement à la définition du Machine Learning donnée par l'américain Tom Mitchell en 1998. Selon lui, une machine apprend, lorsque sa Performance **P** à faire une Tâche **T** s'améliore grâce à une nouvelle Expérience **E**. voir la Figure (3.1)

Tâche **T** : Faire du vélo

Performance **P** : Rouler droit, ne pas tomber

Expérience **E** : chaque fois que l'on fait du vélo, y compris les fois où l'on tombe.

L'objectif est appris à faire T (tache)= Améliorer P (Performance) grâce à **E**(Expérience).



**Figure (3.1) : Schéma de la machine Learning**

### 2.3. Ingrédients de la Machine Learning [1]

L'apprentissage automatique s'articule autour de deux piliers fondamentaux :

- D'une part, les données, qui sont les exemples d'après lesquels l'algorithme va apprendre :

- D'autre part, l'algorithme d'apprentissage, qui est la procédure que l'on exécute sur ces données pour produire un modèle. L'entraînement est la pratique d'exécuter un algorithme d'apprentissage sur un jeu de données.

Ces deux piliers sont aussi importants l'un que l'autre.

D'un côté, aucun algorithme n'est capable de créer un bon modèle à partir de données non pertinentes, c'est le concept « GIGO » qui affirme qu'un algorithme d'apprentissage qui fournit des données de mauvaise qualité ne fera rien d'autre que de faire des prévisions de mauvaise qualité.

Cependant, il ne devrait pas être négligé qu'une partie significative du travail de Machine Learning ou de Data science est une tâche d'ingénierie visant à préparer les données pour éliminer les valeurs aberrantes, gérer les données manquantes, choisir une représentation appropriée, etc.

Bien que l'on ait souvent l'habitude d'appeler les deux avec le même nom, l'algorithme d'apprentissage automatique doit être distingué du modèle appris : la première utilise les données pour produire la deuxième, que l'on peut ensuite appliquer comme programme classique. Un algorithme d'apprentissage permet de modéliser un phénomène à partir d'exemples. On estime alors qu'il est nécessaire de définir et d'optimiser un objectif. Il peut par exemple s'agir de minimiser le nombre d'erreurs faites par le modèle sur les exemples d'apprentissage.

Quelques exemples de reformulation de problèmes de Machine Learning sous la forme d'un problème d'optimisation.

- Un vendeur en ligne peut chercher à modéliser des types représentatifs de clientèle, à partir des transactions passées, en maximisant la proximité entre clients et clientes affectés à un même type.
- Une compagnie automobile peut chercher à modéliser la trajectoire d'un véhicule dans son environnement, à partir d'enregistrements vidéo de voitures, en minimisant le nombre d'accidents.

## 2.4. Les modèles de la machine Learning

L'apprentissage automatique est un domaine assez large, et dans cette section nous énumérons les types les plus importants et les problèmes qu'ils abordent.

### 2.4.1. Apprentissage supervisé

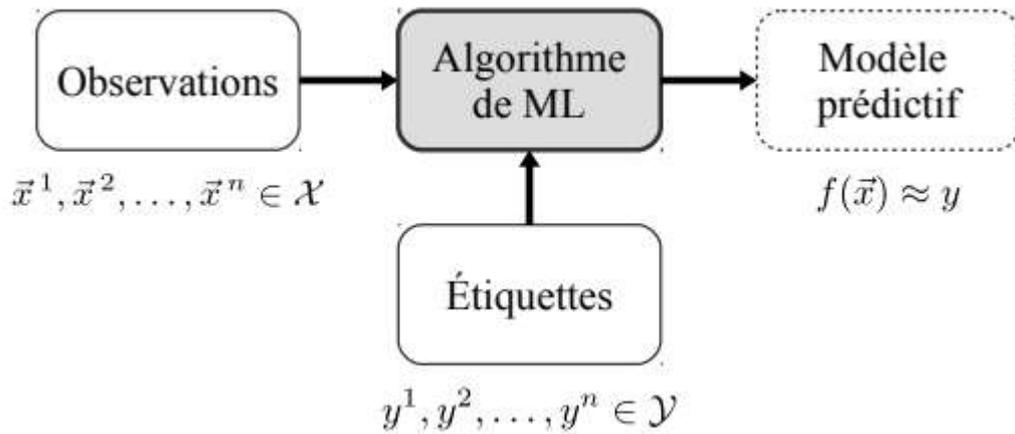
L'apprentissage supervisé est peut-être le type de problèmes de Machine Learning le plus facile à appréhender : son but est d'apprendre à faire des prédictions, à partir d'une liste d'exemples étiquetés, c'est-à-dire accompagnés de la valeur à prédire (voir figure 3.1). Les étiquettes servent de « professeur » et supervisent l'apprentissage de l'algorithme.

On appelle apprentissage supervisé la branche du Machine Learning qui s'intéresse aux problèmes pouvant être formalisés de la façon suivante : Étant données  $n$  observations  $\{\vec{x}^i\}_{i=1, \dots, n}$  décrites dans un espace  $X$ , et leurs étiquettes  $\{y^i\}_{i=1, \dots, n}$  décrites dans un espace  $Y$ , on suppose que les étiquettes peuvent être obtenues à partir des observations grâce à une fonction  $\varphi : X \rightarrow Y$  fixe et inconnue :  $y^i = \varphi(\vec{x}^i) + \epsilon_i$ , où  $\epsilon_i$  est un bruit aléatoire. Il s'agit alors d'utiliser les données pour déterminer une fonction  $f : X \rightarrow Y$  telle que, pour tout couple  $(\vec{x}, \varphi(\vec{x})) \in X \times Y$ ,  $f(\vec{x}) \approx \varphi(\vec{x})$ .

Les modèles d'apprentissage supervisé sont des modèles qui mettent en correspondance les inputs et les outputs et essaient de déduire les tendances apprises dans les données antérieures sur les données invisibles.

Ces modèles peuvent être des modèles de régression, où nous essayons de prévoir une variable continue comme les cours boursiers — ou les modèles de classification, dans lesquels nous essayons de prévoir une variable binaire ou multi-classes, comme s'il y aura un roulement des clients ou non.

Dans l'apprentissage supervisé il y a deux types importants : **Modèles Linéaire**, et **modèles arborescents**.



**Figure (3.2) : Apprentissage supervisé**

#### 2.4.1.1. Modèles Linéaire

Les modèles linéaires créent la ligne la plus adaptée pour prédire des données invisibles, ces modèles impliquent que les outputs sont une combinaison linéaire de caractéristiques.

Le tableau (3.1) précisera les modèles linéaires couramment utilisés dans l'apprentissage automatique, leurs avantages et leurs inconvénients.

#### 2.4.1.2. Modèles arborescents

Modèles arborescents sont des modèles qui utilisent un ensemble de règles "Si-Alors" pour prédire des arbres de décision.

Le tableau (3.2) précisera les Modèles arborescents couramment utilisés dans l'apprentissage automatique, leurs avantages et leurs inconvénients.

**Tableau (3.1): Modèles Linéaire**

Modèle	Description	Application	Avantages	Inconvénients
<b>Régression Linéaire</b>	Un algorithme simple qui modélise une relation linéaire entre les entrées et une variable de sortie numérique permanente.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prédire des cours boursiers</li> <li>2. Prédire les prix des logements</li> <li>3. Prédire la valeur vitale de client</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Méthode explicable</li> <li>2. Résultats interprétables par son coefficient d'output</li> <li>3. rapide à former que les autres modèles d'apprentissage automatique</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suppose une linéarité entre l'input et l'output</li> <li>2. Sensible à l'outliers (aberrante)</li> <li>3. Peut s'adapter à de petites données de grande taille.</li> </ol>
<b>Régression Logistic</b>	Un algorithme simple qui modélise une relation linéaire entre les inputs et un output catégoriel (1 ou 0)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prédiction du risque de crédit.</li> <li>2. prédiction de désabonnements clients</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interprétable et explicable</li> <li>2. Moins sujet au surajustement lors de l'utilisation de la régularisation</li> <li>3. Applicable aux prédictions multi-classes</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suppose une linéarité entre l'input et l'output</li> <li>2. Peut sur-adapter avec de petites données de grande dimension</li> </ol>
<b>Régression Ridge</b>	Fait partie de la famille de régression : elle pénalise les caractéristiques dont les résultats prédictifs sont faibles en réduisant leurs coefficients plus près de zéro. Peut être utilisé pour la classification ou la régression.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maintenance prédictive des voitures</li> <li>2. prévision du chiffre d'affaires</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Moins sujet à déborder</li> <li>2. Mieux adapté où les données souffrent de multicollinearité</li> <li>3. Explicable et interprétable</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toutes les variables prédictives sont présentes dans le modèle final</li> <li>2. N'effectue pas la sélection de la fonctionnalité.</li> </ol>

**Tableau (3.2): modèles arborescents**

<b>Modèle</b>	<b>Description</b>	<b>Application</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Arbre de décision</b>	Les modèles de l'arbre de décision établissent les règles de décision relatives aux caractéristiques pour produire des prédictions. Ils peuvent être utilisés pour la classification ou la régression.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. prédiction de désabonnements client</li> <li>2. prédiction des maladies</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Explicable et interprétable</li> <li>2. Peut gérer les valeurs manquantes</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sujet au surajustement</li> <li>2. Sensible aux valeurs aberrantes</li> </ol>
<b>Forets aléatoires</b>	Une méthode d'apprentissage d'ensemble qui combine les outputs de plusieurs arbres de décision.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modélisation du pointage de crédit</li> <li>2. Prédire les prix des logements</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Réduit le surajustement</li> <li>2. Précision supérieure par rapport aux autres modèles</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La complexité de la formation peut être élevée</li> <li>2. Pas très interprétable</li> </ol>
<b>Régression de Le Boosting de gradient</b>	Gradient Boosting Regression utilise Boosting pour réaliser des modèles prédictifs à partir d'un ensemble d'apprenants faiblement prédictifs.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prédire les émissions des voitures</li> <li>2. Prédire le montant du tarif de covoiturage</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Meilleure précision par rapport aux autres modèles</li> <li>2. Il peut gérer la multicollinéarité</li> <li>3. Il peut gérer des relations non linéaires</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sensible aux valeurs aberrantes et peut donc provoquer un surajustement</li> <li>2. Calcul coûteux et grande complexité</li> </ol>

### 3.3.2. Apprentissage non supervisé

Dans le cadre de l'apprentissage non supervisé, les données ne sont pas étiquetées. Il s'agit alors de modéliser les observations pour mieux les comprendre (voir figure 3.3). On appelle apprentissage non supervisé la branche du Machine Learning qui s'intéresse aux problèmes pouvant être formalisés de la façon suivante : étant données  $n$  observations  $\{\vec{x}^i\}_{i=1, \dots, n}$  décrites dans un espace  $X$ , il s'agit d'apprendre une fonction sur  $X$  qui vérifie certaines propriétés.



**Figure (3.3) : Apprentissage non supervisé**

L'apprentissage non supervisé consiste à découvrir des tendances générales en matière de données. L'exemple le plus populaire est le Clustering ou la segmentation. Ce type de segmentation est généralisable et peut être utilisé à grande échelle, notamment pour les documents, les entreprises et les gènes.

L'apprentissage non supervisé consiste en des modèles de Clustering, qui apprennent à regrouper des points de données similaires, ou des algorithmes d'association, qui regroupent différents points de données basés sur des règles prédéfinies.

#### 3.4.2.1. Clustering modèles

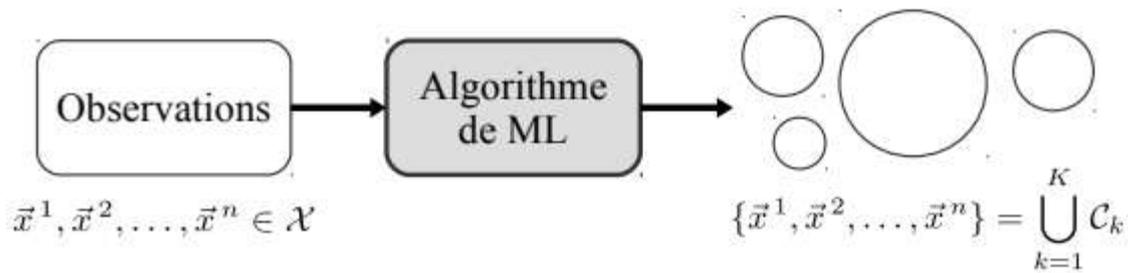
Clustering modèles permet de comprendre leurs caractéristiques générales, et éventuellement d'inférer les propriétés d'une observation en fonction du groupe auquel elle appartient. Voir (figure 3.4)

On appelle partitionnement ou Clustering un problème d'apprentissage non supervisé pouvant être formalisé comme la recherche d'une partition  $U_{K=1}^K C_K$  des  $n$  observations  $\{\vec{x}^i\}_{i=1, \dots, n}$ . Cette partition doit être pertinente au vu d'un ou plusieurs critères à préciser.

Le tableau (3.3) précisera les modèles de Clustering couramment utilisés dans l'apprentissage automatique, leurs avantages et leurs inconvénients.

**Tableau (3.3) : Clustering modèles**

Modèle	Description	Application	Avantages	Inconvénients
<b>K-Means</b>	K-Means est l'approche de regroupement la plus utilisée : elle définit les groupes K en fonction des distances euclidiennes.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Segmentation de la clientèle</li> <li>2. Systèmes de recommandation</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. S'adapte à de grands ensembles de données</li> <li>2. Simple à mettre en œuvre et à interpréter</li> <li>3. Résultats en groupes serrés</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nécessite le nombre attendu de clusters depuis le début</li> <li>2. A des problèmes avec différentes tailles et densités de grappes</li> </ol>
<b>Hierarchical Clustering</b>	Une approche « ascendante » où chaque point de données est traité comme son propre cluster, puis les deux clusters les plus proches sont fusionnés de manière itérative.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Détection de fraude</li> <li>2. Regroupement de documents basé sur la similarité</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. il n'est pas nécessaire de spécifier le nombre de clusters</li> <li>2. Le dendrogramme obtenu est informatif</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ne donne pas toujours le meilleur regroupement</li> <li>2. Ne convient pas aux grands ensembles de données en raison de la grande complexité</li> </ol>
<b>Gaussian Mixture Models</b>	Un modèle probabiliste pour la modélisation de clusters normalement distribués dans un ensemble de données.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Segmentation de la clientèle</li> <li>2. Systèmes de recommandation</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calcule une probabilité pour une observation appartenant à un cluster</li> <li>2. Peut identifier les clusters qui se chevauchent</li> <li>3. Des résultats plus précis par rapport à K-Means</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nécessite un réglage complexe</li> <li>2. Nécessite de définir le nombre de composants ou de clusters de mélange attendus</li> </ol>



**Figure (3.4) : Clustering model**

### 3.4.2.2. Modèles d'association

L'apprentissage associatif est une technique d'apprentissage automatique et d'exploration de données fondée sur des règles qui établit des relations significatives entre les variables ou les caractéristiques d'un ensemble de données. Contrairement aux algorithmes d'association traditionnels mesurant les degrés de similarité, l'apprentissage des règles d'association détermine les corrélations cachées dans les bases de données en appliquant une certaine mesure d'intérêt pour générer une règle d'association pour les nouvelles recherches.

Les algorithmes de règles d'association comptent la fréquence des occurrences complémentaires, ou des associations, dans un large éventail d'éléments ou d'actions. Le but est de trouver des associations qui se déroulent ensemble beaucoup plus souvent que dans un échantillon aléatoire d'options. Cette approche fondée sur des règles est un outil rapide et puissant pour l'exploitation minière des bases de données non numériques catégorisées.

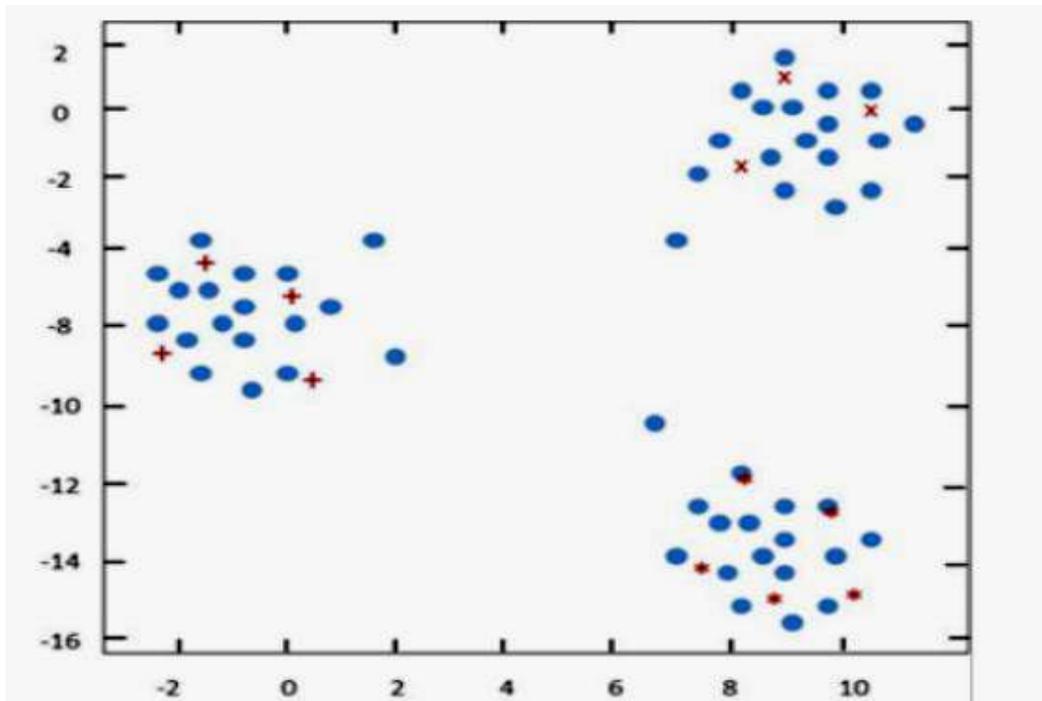
Parmi les algorithmes d'association en parle de l'Apriori algorithme voire le tableau (3.4)

### 3.4.3. Apprentissage Semi-Supervisé

Apprentissage Semi-Supervisées un type de Machine Learning technique. Il est à mi-chemin entre un apprentissage supervisé et non supervisé. Le Datas test partiellement étiqueté est présenté à la figure (3.5). L'objectif principal de SSL est de surmonter les inconvénients de l'apprentissage supervisé et non supervisé.

**Tableau (3.4) : algorithmes d'Association**

Modèle	Description	Application	Avantages	Inconvénients
<b>Apriori Algorithme</b>	Approche basée sur des règles qui identifie l'ensemble d'objets le plus fréquent dans un ensemble de données donné où la connaissance préalable des propriétés d'objets fréquents est utilisée	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Emplacements du produit</li> <li>2. Caractéristiques recommandées</li> <li>3. Optimisation des Promotions</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Les résultats sont intuitifs et faciles à interpréter</li> <li>2. Approche complète car elle trouve toutes les règles basées sur la confiance et le soutien</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Génère plusieurs éléments inintéressants</li> <li>2. Nécessite beaucoup de calcul et de mémoire. Entraîne plusieurs jeux d'éléments qui se chevauchent</li> </ol>



**Figure (3.5) : données semi- étiquetées**

L'apprentissage supervisé nécessite une quantité considérable de training data pour classifier le training data, ce qui est un processus rentable et long. D'autre part, l'apprentissage

non supervisé ne nécessite pas de données étiquetées, qui regroupent les données en fonction de la similarité des points de données en utilisant soit le groupement, soit l'approche du maximum de vraisemblance. Le principal échec de cette approche, il ne peut pas rassembler des données inconnues précisément. Pour résoudre ces problèmes, SSL a été proposé par la communauté de recherche, qui peut apprendre avec peu de training data.

SSL construit un modèle avec quelques modèles étiquetés comme de Training Dataset et traite le reste des modèles comme Test Data.

L'apprentissage semi-supervisé est ensuite plongé dans deux types ; Semi-Supervisé classification et Semi-Supervisé Clustering. [28]

#### **3.4.3.1. Clustering Semi-Supervisé**

Semi-Supervised Classification est similaire au approach supervisé, nécessite plus de données de formation pour classifier les données de test. Mais en SSC, utiliser moins de données de train pour classifier la grande quantité de test data. En utilisant ce classement semi-supervisé, nous réduisons l'entraînement de l'ensemble de données. Actuellement, il existe suffisamment de modèles de données non étiquetées dans la communauté des chercheurs, mais les données étiquetées ne sont pas disponibles. En effet, la conception des données de formation est rentable et prend du temps. [29]

#### **3.4.4. Apprentissage par renforcement**

En raison de sa généralité, l'apprentissage renforcé est étudié dans de nombreuses disciplines, telles que, **la théorie du contrôle,**

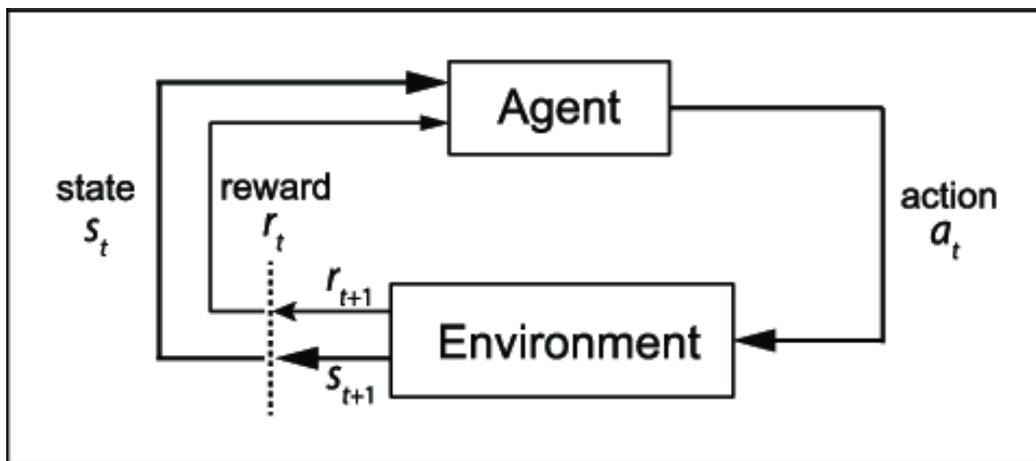
**La recherche opérationnelle, la théorie de l'information, l'optimisation par simulation, les systèmes multi-agents** et les statistiques.

Dans la documentation sur la recherche et le contrôle des opérations, le renforcement de l'apprentissage est appelé programmation dynamique approximative, ou programmation neuraux-dynamique. Les problèmes d'intérêt pour le renforcement de l'apprentissage ont également été étudiés dans la théorie du contrôle optimal, qui porte principalement sur l'existence et la caractérisation de solutions optimales, et des algorithmes pour leur calcul précis, et moins avec l'apprentissage ou l'approximation, surtout en l'absence d'un modèle mathématique de l'environnement. En économie et en théorie des jeux, l'apprentissage par

renforcement peut être utilisé pour expliquer comment l'équilibre peut apparaître sous une rationalité limitée (voir la figure 3.6). [26]

L'apprentissage en renforcement de base est modélisé comme un Markov Decision Process (MDP).

- Un ensemble d'états relatifs à l'environnement et agent.  $S$
- Un ensemble d'actions,  $A$ , de l'agent.
- $P_a(s, s') = \Pr(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$  est la probabilité de transition (au moment  $t$ ) d'un État  $s$  à un État  $s'$  en action  $a$ .
- $R_a(s, s')$  représente la récompense immédiate après la transition du  $s$  à  $s'$  avec l'action  $a$ .



**Figure (3.6) : Schéma d'apprentissage par renforcement**

Le but de RL est pour l'agent d'apprendre une politique optimale, ou quasi optimale, qui maximise la "fonction de récompense" ou d'autres signaux de renforcement fournis par l'utilisateur qui proviennent des récompenses immédiates. Cela ressemble aux processus qui apparaissent dans la psychologie animale. Par exemple, les bio-cerveaux sont programmés pour interpréter des signaux tels que la douleur et la faim comme des renforcements négatifs, et interpréter le plaisir et la consommation alimentaire comme des renforcements positifs. Dans certains cas, les animaux peuvent apprendre à adopter des comportements qui optimisent la récompense. On propose donc que les animaux soient capables de reinforced Learning. [10]

Dans le cadre de l'apprentissage par renforcement, le système d'apprentissage peut interagir avec son environnement et accomplir des actions. En retour de ces actions, il obtient une récompense, qui peut être positive si l'action était un bon choix, ou négative dans le cas

contraire. La récompense peut parfois venir après une longue suite d'actions ; c'est le cas par exemple pour un système apprenant à jouer aux jeux d'échecs. Ainsi, l'input apprentissage consiste dans ce cas à définir une politique, c'est-à-dire une stratégie permettant d'obtenir systématiquement la meilleure récompense possible.

## **4. Machine Learning et la Maintenance Prédictive**

### **4.1. L'adaptation de Machine Learning en Maintenance prédictive**

La Maintenance Prédictive est aujourd'hui largement considérée comme la prochaine étape dans tout secteur d'activité comportant des équipements coûteux qui représentent un investissement important tant d'un point de vue technique, budgétaire qu'organisationnel pour optimiser la productivité des entreprises mais aussi pour garantir la disponibilité au moindre coût de la chaîne des moyens de production et logistiques. En utilisant la machine Learning pour contrôler les coûts de maintenance croissants de ces équipements, et pour anticiper les défaillances potentielles des équipements, avant qu'elles ne surviennent.

L'objectif de la maintenance prédictive est de prédire les défaillances du système en observant continuellement leur état, afin de planifier les mesures de maintenance à l'avance. Ces modèles de prédiction sont développés via l'analyse de l'histoire de la machine.

Autrement dit, il s'agit de déduire d'un grand nombre de mesures passées une prédiction sur la nature, la location et la date probable de survenance de l'échec, afin d'adopter avant l'incident les mesures correctrices appropriées, puis d'automatiser ces mesures.

### **4.2. Les principaux avantages d'adapter ML en PDM**

L'adaptation des solutions ML en PDM peut procurer d'importants avantages aux secteurs industriels, en particulier aux sociétés pétrolières et gazières, qui comprennent les éléments suivants :

- **Amélioration de la fiabilité du matériel d'exploitation et réduction des coûts :**

Les solutions ML fournissent aux entreprises pétrolières et gazières des outils intelligents qui servent à estimer les pannes potentielles avant qu'elles ne se produisent. Cette fonction permet aux entreprises d'élaborer un plan efficace pour les travaux de maintenance et d'accorder la priorité à l'équipement essentiel, en fonction d'une forte possibilité de défaillance. Par conséquent, les entreprises peuvent réduire les dépenses d'entretien lorsqu'il est possible d'éliminer des travaux inutiles en accordant la priorité à l'entretien planifié en fonction d'une projection de défaillance.

- **Améliorer l'efficacité de l'équipement d'exploitation :**

Les solutions ML maximisent l'utilisation de l'équipement d'exploitation et améliorent la productivité de l'unité d'exploitation en offrant un fonctionnement plus fiable et plus souple. La modélisation des données fournit une indication approfondie pour plusieurs pièces de l'équipement de fonctionnement, qui aide les entreprises à maintenir la performance de production et établit un mécanisme pour améliorer la durée de vie du matériel d'exploitation.

- **Réduction de l'impact environnemental :**

Les solutions ML peuvent réduire l'impact environnemental associé aux fuites, y compris le pétrole et le gaz. L'adaptation de ces solutions permet aux sociétés de détecter les fuites potentielles dans les pipelines de produits chimiques avant qu'elles ne se produisent.

### **4.3. Techniques du Machine Learning pour la maintenance prédictive**

Même si la maintenance prédictive est particulièrement cruciale pour les machines, elle devient beaucoup plus efficace lorsqu'elle est associée à l'apprentissage automatique. La maintenance prédictive avec l'apprentissage automatique permet aux machines ou aux systèmes de prédire différents types de pannes de machines et de réduire leur débit grâce à diverses techniques spécifiques. Cela implique de collecter des données au fil du temps avec des capteurs pour contrôler les défaillances.

Premièrement, un capteur est ajouté aux systèmes de machines respectifs pour surveiller, puis sa série chronologique stocke les données pour les opérations respectives. Les données recueillies, récupérées par des capteurs à des fins de maintenance prédictive, montrent une série chronologique contenant des horodatages et des relevés de capteurs. De plus, ces

données horodatées permettent à l'application basée sur ML de prédire la panne avec précision avec un timing précis.

Il existe essentiellement deux approches de maintenance prédictive basées sur la machine Learning :

- **Approche de classification :** Cette approche prédictive prédit la faisabilité d'un échec au cours des n-étapes à venir.

L'approche de classification fournit les résultats sous forme booléenne (vrai/faux) et fournit des prévisions plus précises avec moins de données.

- **Approche de Regression :** Cette approche prédictive permet de prévoir la durée d'une défaillance imminente dans le système concerné. C'est aussi connu sous le nom de « Vie utile restante RUL ».

Contrairement à l'approche de classification, l'approche de régression consomme plus de données pour prévoir les résultats, et il fournit en outre des informations détaillées sur la défaillance imminente.

#### **4.4. Forêt aléatoire (Random Forest)**

Random Forest est un algorithme de machine Learning populaire qui appartient à la technique de Supervised Learning. On peut l'utiliser à la fois pour les problèmes de classification et de régression dans le ML. Il est fondé sur la notion d'ensemble apprentissage. Il s'agit d'un processus de combinaison de plusieurs classificateurs pour résoudre un problème complexe et améliorer la performance du modèle.

Random Forest est un classificateur qui inclut un certain nombre d'arbres décisionnels sur divers sous-ensembles de Dataset donné et qui utilise la moyenne pour améliorer l'exactitude prédictive de cet ensemble de données.

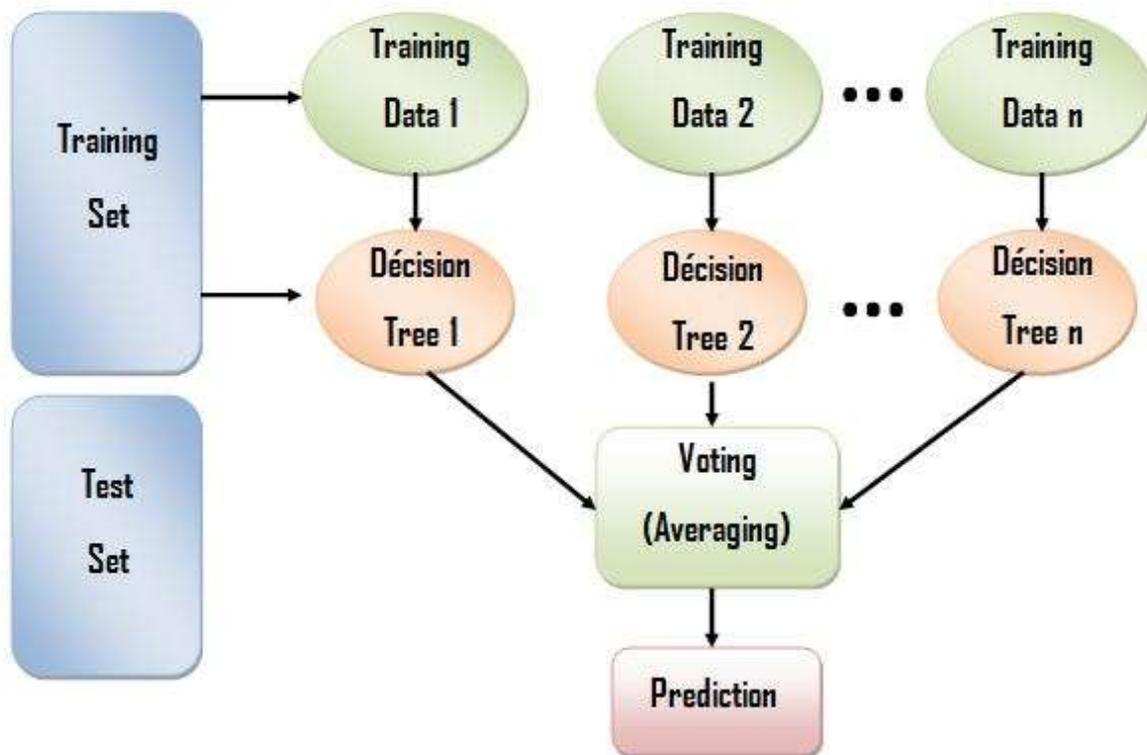
Plus grand nombre d'arbres de décision dans la forêt entraîne une plus grande précision et empêche le problème de débordement.

La Figure (3.7) suivant explique le fonctionnement de l'algorithme de forêt aléatoire :

Puisque la forêt aléatoire combine plusieurs arbres pour prédire la classe des données, il est possible que certains arbres de décision puissent prédire le bon rendement, alors que

d'autres ne le peuvent pas. Mais ensemble, tous les arbres prédisent la production correcte. Voici donc deux hypothèses pour un meilleur classificateur Random Forest :

- Il devrait y avoir des valeurs réelles dans la variable caractéristique des données afin que le classificateur puisse prévoir des résultats précis plutôt qu'un résultat hypothétique.
- Les prévisions de chaque arbre doivent avoir de très basses corrélations.



**Figure (3.7) : Fonctionnement de Forêt aléatoire**

Mais pour mieux comprendre les Forêts aléatoires faut comprendre la méthode d'Arbre de décision.

#### 4.4.1. Arbre de décision

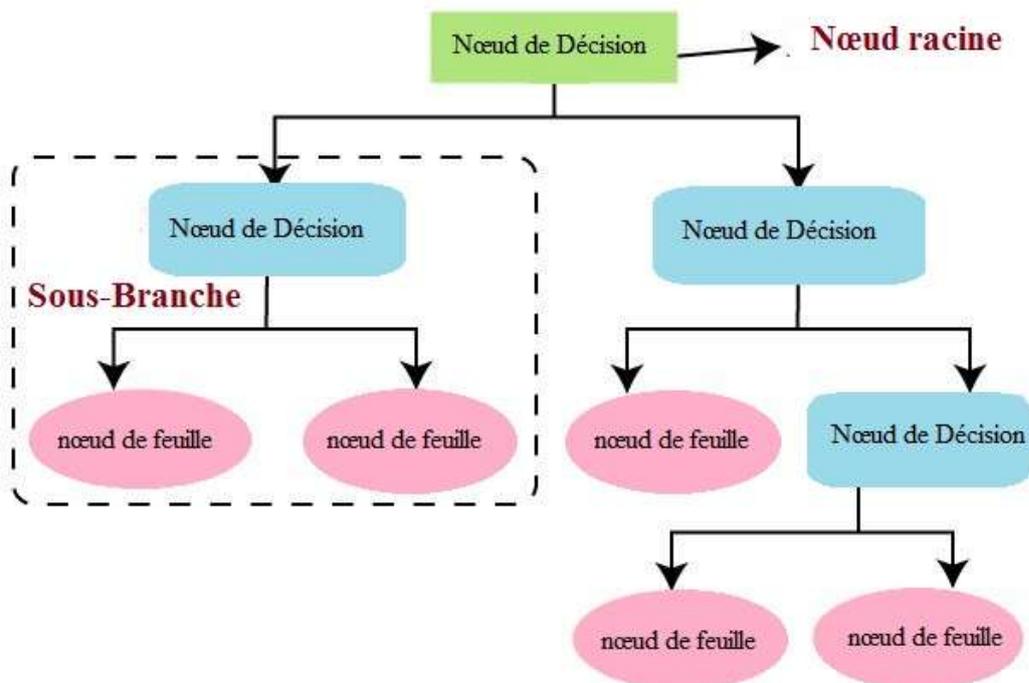
Puisque la forêt aléatoire combine plusieurs arbres pour prédire la classe des données, il est possible que certains arbres de décision puissent prédire le bon rendement, Il s'agit d'un classificateur arborescent, où les nœuds internes représentent les caractéristiques d'un ensemble de données, les branches représentent les règles de décision et chaque nœud de feuille représente l'Output

Dans un arbre de décision, il existe deux nœuds, qui sont le nœud de décision et le nœud de feuille. Les nœuds de décision sont utilisés pour prendre toutes les décisions et comportent plusieurs directions, tandis que les nœuds de feuilles sont l'Output de ces décisions et ne contiennent aucune autre branche.

On l'appelle arbre de décision car, comme un arbre, il commence par le nœud racine, qui se développe sur d'autres branches et construit une structure arborescente.

Pour construire un arbre, nous utilisons l'algorithme CART, qui signifie « Classification and RegressionTree algorithm ».Un arbre décisionnel demande simplement une question et, selon la réponse (Oui/Non), il divise l'arbre en soustractions.

La Figure (3.8) ci-après explique la structure générale d'un arbre de décision :



**Figure (3.8) : la structure générale d'un arbre de décision**

#### **4.4.2. Avantages de la Forêt aléatoire**

- L'algorithme Random Forest peut être utilisé pour résoudre les problèmes de classification et de régression.
- On considère qu'il s'agit d'un modèle très précis et robuste, car il utilise un grand nombre d'arbres décisionnels pour faire des prévisions.
- Les forêts aléatoires prennent la moyenne de toutes les prédictions effectuées par les arbres de décision, ce qui annule les biais. Si, il n'y a aucun problème de débordement.
- Le classificateur de forêt aléatoire peut traiter les valeurs manquantes. Il y a deux façons de traiter les valeurs manquantes. Premièrement, utiliser les valeurs médianes pour remplacer les variables continues et, deuxièmement, calculer la moyenne pondérée en fonction de la proximité des valeurs manquantes.
- Le classificateur de forêt aléatoire peut être utilisé pour la sélection de fonction. Il signifie sélectionner les fonctionnalités les plus significatives parmi les fonctionnalités disponibles à partir de l'ensemble de données de formation.

#### **4.4.3. Les inconvénients de la Forêt Aléatoire**

- Le plus grand désavantage des forêts aléatoires est leur complexité computationnelle.
- Les forêts aléatoires sont très lentes à faire des prévisions, parce qu'un grand nombre d'arbres de décision servent à établir des prévisions.
- Tous les arbres dans la forêt doivent faire une prévision pour les mêmes Inputs et ensuite procéder au vote. Donc, c'est un processus long.
- le modèle est difficile à interpréter par rapport à un arbre de décision, dans lequel on peut facilement faire une prédiction par rapport à un arbre de décision.

**Chapitre 4 :**  
**l'application d'un**  
**algorithme d'apprentissage**  
**automatique (Random**  
**Forest classification)**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre on va traiter la problématique de comment on peut exploiter l'apprentissage automatique pour réduire les risques liés au machine, Alors nous avons enseigné un algorithme d'apprentissage automatique pour prédire un dysfonctionnement d'un ensemble de machines dans un site industriel, a fin de faire des mesures de prévention contre ces défaillances et les dangers causé par ces derniers.

On a appliqué la méthode des forêts aléatoires pour faire ces prédictions à un ensemble de données synthétiques reflétant la maintenance prédictive réelle trouvée dans l'industrie, ces données sont présenté par Mr. SHIVAM BANSAL un chercheur en domaine de l'apprentissage automatique.

## 2. L'ensemble de données

Lien de l'ensemble de données : <https://www.kaggle.com/datasets/shivamb/machine-predictive-maintenance-classification>

Notre jeu de données se compose de 10000 points de données enregistrés en tant que lignes avec 10 colonnes qui contiennent 6 caractéristiques et 2 objectifs.

Les caractéristiques sont :

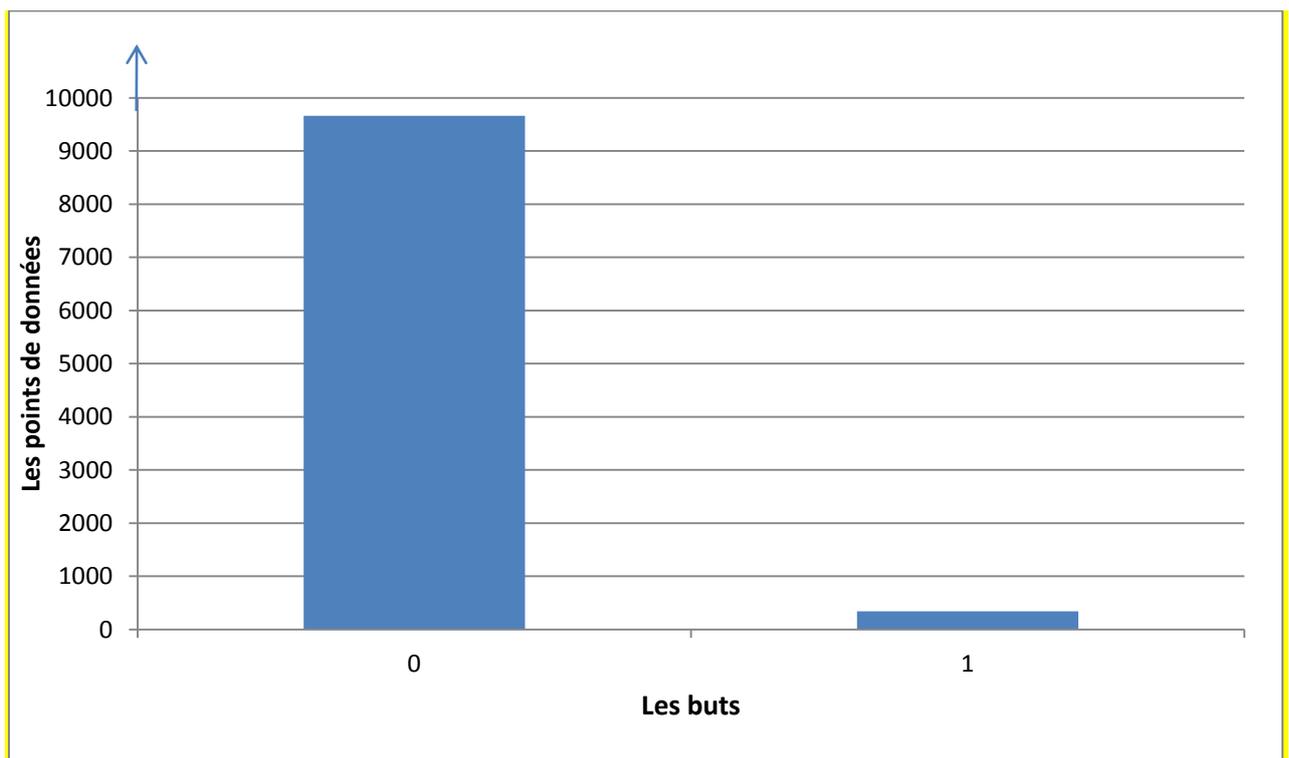
- Type de machine : consistant en une lettre L, M ou H selon les variations de qualité du produit. L pour les machines faibles (50% de toutes les machines), M pour les machines moyennes (30%), H pour les machines fortes (20%).
- Température de l'air [K] : de 295K à 305K.
- Température de processus [K] : de 306K à 314K.
- Vitesse rotationnelle [rpm] : de 1168rpm à 2886rpm.
- Moment de torsion [Nm] : de 3.38Nm à 76.6Nm.
- Usure des outils [min] : Les variations de qualité H/M/L ajoutent 5/3/2 minutes de l'usure de l'outil utilisé dans le processus, ca valeur de 0 a 253min.

Les 2 objectifs sont :

- But (Target) : si la machine à mal fonctionner ou pas, les valeurs sont 0 dans le cas où il n'y a pas d'échec et 1 si il existe un échec.
- Type d'échec : dans ce jeu de données existe 5 types d'échecs et le cas s'il n'y a pas d'échec la dissipation de la chaleur, panne électrique, échec de surmenage, défaut d'usure de l'outil et échecs aléatoires.

On a trouvé que cet ensemble de données n'est pas équilibré, le voir la figure (4.1).

Cette Figure (4.1) est un histogramme à deux colonnes qui correspond aux deux résultats différents obtenus par notre ensemble de données, la colonne 0 représente les cas où les échecs n'ont pas été trouvés et la colonne 1 représente les cas où les échecs ont été découverts, nous observons une nette différence dans cet histogramme la colonne 0 est supérieure à la colonne 1, c'est pourquoi nous disons que notre jeu de données n'est pas équilibré.



**Figure (4.1) : les Taux de buts**

### 3. Forêts aléatoires

Étant donné notre base de données déséquilibrée, le processus est un peu plus difficile, pour cela la méthode des forêts aléatoires a été privilégiée, cette méthode est la meilleure pour ce type de jeu de données, elle donne une précision de prédiction rigide, plus performants tout en exigeant moins de temps de calcul et plus résilients que les autres méthodes, même si l'ensemble n'est pas équilibré ou manque de données cette algorithmes est plus robuste que l'ensachage, car la sélection d'un échantillon de variables pour chaque nœud provoque la décoration des arbres.

#### 3.1. Préparation des données pour la formation

La tâche consiste à diviser les données en ensembles d'"attributs" et d'"étiquettes". Le script suivant divise les données en attributs et libellés :

**In**

```
[5] df['Target'].value_counts()
```

**Out**

```
0    9661
1     339
Name: Target, dtype: int64
```

**In**

```
[7] df['Failure Type'].value_counts()
```

## Out

```
↳ No Failure          9652
   Heat Dissipation Failure  112
   Power Failure       95
   Overstrain Failure  78
   Tool Wear Failure   45
   Random Failures     18
   Name: Failure Type, dtype: int64
```

### 3.2. Formation de l'algorithme

Dans cette étape on aformé nos forêts aléatoires pour résoudre ce problème de classification.

Pour ce faire :

- Validation croisée et recherche de grille

## In

```
model = RandomForestClassifier(random_state=42)

param_grid = {
    'n_estimators': [50, 100, 200, 500],
    'max_features': ['auto', 'log2'],
    'max_depth' : [ 8, 11, 13, 15, 17],
    'criterion' :['gini', 'entropy']
}

CV_model = GridSearchCV(estimator=model, param_grid=param_grid, cv= 5)
CV_model.fit(X_train, y_train)

GridSearchCV(cv=5, estimator=RandomForestClassifier(random_state=42),
             param_grid={'criterion': ['gini', 'entropy'],
                          'max_depth': [8, 11, 13, 15, 17],
                          'max_features': ['auto', 'log2'],
                          'n_estimators': [50, 100, 200, 500]})
```

- Obtenir les meilleurs paramètres :

**In**

```
param = CV_model.best_params_  
param
```

**Out**

```
{'criterion': 'entropy',  
 'max_depth': 13,  
 'max_features': 'log2',  
 'n_estimators': 200}
```

- Construire le modèle avec les meilleurs paramètres :

**In**

```
mdl = RandomForestClassifier(max_depth= param['max_depth'],  
                             max_features=param['max_features'],  
                             n_estimators=param['n_estimators'],  
                             criterion=param['criterion'],  
                             random_state=42)
```

**In**

```
mdl.fit(X_train, y_train)  
y_pred = mdl.predict(X_test)
```

### 3.3. Evaluation de l'algorithme

Pour l'évaluation de notre algorithme de classification, on a affiché une mesure de précision F1 :

**In**

```
print('F1 Score is :', "{:.3f}".format(f1_score(y_pred, y_test, average='micro')))
```

**Out**

```
F1 Score is : 0.704
```

Notre algorithme a donné un succès avec une précision de prédiction de 70,4%. Un résultat impressionnant pour ce type d'ensemble de données déséquilibré.

### 3.4. Prédiction de l'algorithme

Après l'évaluation de notre méthode de classification, l'algorithme est prêt à prédire les échecs en saisissant des données caractéristiques, ensuite, selon les données en sortie des commandes et des instructions sont appliquées pour réduire ou éviter les risques et les dangers possibles.

- **Une panne électrique**

Lorsque l'algorithme prévoit **une panne électrique**, une panne causée la plupart du temps par des défaillances du système d'alimentation, la surcharge électrique de ce système et l'absence de fonctionnalité de ce dernier.

Donc pour ce type d'interruption, nous lançons un contrôle d'urgence et une analyse complète du réseau électrique, En même temps, préparez-vous à éteindre le système électrique afin d'éviter une chaîne de défaillances.

- **Une dissipation thermique**

Dans le cas où **une dissipation thermique** a été annoncée par l'algorithme, un arrêt d'urgence est envisagé lorsqu'une dissipation, une analyse de tous les réseaux de transfert de chaleur doit être effectuée, une vérification précise des tuyauteries, des vannes d'arrêt, des

vannes... etc. Il est indispensable de mettre la touche finale à la réduction de l'humidité en ventilant l'emplacement.

Généralement cette panne est engendrée par la vibration excessive des pièces mobiles trouvées sur la machine, l'érosion des métaux et les coups de bélier.

- **Une défaillance de surmenage,**

Lorsque le résultat affiché est **une défaillance de surmenage**, la machine doit être arrêtée à des fins de maintenance périodique, une vérification de toutes les pièces, les échanger si possible, lubrifier les pièces en mouvement, refroidir les pièces chaudes, etc.

- **Une défaillance de l'usure de l'outil**

Donc, lorsque l'algorithme affirme **une défaillance de l'usure de l'outil**, une conséquence due au frottement entre deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre. Le remède est de réduire les heures de travail de ceux-ci, en vérifiant les outils affectés, faire un revêtement de l'outil avec le bon matériau.

#### **4. Conclusion**

On a constaté que cette méthode permet de mieux prévoir les risques et les dangers, mais pour améliorer cette technique, nécessite une base de données vaste et précise comportant de fréquentes explorations de données.

Afin de mieux résoudre ces défaillances, un conseil d'expert est nécessaire pour chaque domaine afin de préciser les mesures de prévention et les méthodes de résolution de ces dysfonctionnements.

## **Conclusion Générale :**

L'anticipation des dangers et des risques liés aux machines est un rôle important au domaine industriel, qui réduit les dégâts, les accidents et réduit les coûts de la maintenance des machines utilisées.

Notre étude est donc consacrée à la prédiction des risques relatifs aux machines avec apprentissage automatique. Nous avons présenté une méthode de classification des forêts aléatoires en raison de sa simplicité, de sa facilité d'interprétation et de son exactitude.

Il convient de noter que la méthode présentée ici répond à un besoin essentiel du secteur industriel, même avec un ensemble de données non équilibré.

Nous sommes parvenus à mettre en œuvre cette méthode avec des résultats satisfaisants en termes de temps d'exécution, de taux de classification et d'exactitude (70,4%).

Ces résultats nous permettent de constater que le Machine Learning est une technique importante dans l'industrie et la machine pour la réduction des risques en général. Il faut améliorer cela et promouvoir l'exploration de données pour les algorithmes de machine Learning.

## Références bibliographiques

[1] : Retrouvez ce dossier sur le site de l'INRS

<https://www.inrs.fr/demarche/risques-industriels/ce-qu-il-faut-retenir.html>

[2] : Retrouvez ce dossier sur le site de l'CCHST

[https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/hazard\\_risk.html](https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/hazard_risk.html)

[3] : Margossian. N; «Risques professionnels : caractéristiques ; Réglementation Prévention»2 édition DUNOD ; 2006, 448p.

[4] : Retrouvez ce dossier sur le site de bosha-Algérie :

<http://www.boshaalgerie.com>

[5] : Retrouvez ce dossier sur le site BUREAU VERITAS :

<https://www.bureauveritas.fr>

[6] : Retrouvez ce dossier sur le site de bioex :

<https://www.bio-ex.com/fr>

[7] : Retrouvez ce dossier sur le site de ACMS :

<https://www.acms.asso.fr>

[8]: Yacine BELMAZOUZI « Contribution à la gestion des risques-machines en industries algérienne», Mémoire soutenu publiquement le 12/03/2015, L'UNIVERSITÉ DE BATNA, Algérie

[9] : J.F. Debongnie ; « CONCEPTION ET CALCUL DES ÉLÉMENTS DE MACHINES » ; DEBONGNIE (Jean-François), Liège, Belgium, 2011

[10] : Fiches sécurité machines agricoles et forestières, « LE PRINCIPE GÉNÉRAL D'UNE APPRÉCIATION DES RISQUES » ; ministère de l'agriculture de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales ; cemagref édition collection étude sécurité 2002

[11] : YuvinChinniah, Mathieu Champoux ; « Sécurité des machines - Appréciation du risque » ; IRSST 2007

- [12] : La sécurité et la santé dans l'utilisation des machines : Bureau international du Travail (BIT), Genève, 2013
- [13] : AFNOR : terminologie de la maintenance NF-EN-13306-X-60-319, janvier 2018
- [14] : Monchy F., «la fonction maintenance », MASSON, ISBN 2-225-855518-8, Paris 1996
- [15] : M .T. Nabti, « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Setif (2011).
- [16] : CH. Abdelali, et A. Elamarty, « maintenance des machines tournantes par Analyse vibratoire ». PFE : Université sidi Mohamed Ben Abdallah de FFS. (Maroc), 2007
- [17] : Jean Héng, « Pratique de LA Maintenance Préventive –Mécanique » Pneumatique - Hydraulique- Electrique- Froide Édition Afnor (2002) Dunod.
- [18] : Documentation Sonatrach, « Analyse du panne ».
- [19] : PIERRE SALGAS, « Méthodes de maintenance». Lyon: INSA. Association française des ingénieurs, cours, 1998 ;
- [20] : François Monchy : « Maintenance méthodes et organisations » Edition Dunod, Paris 2000.
- [21] : Chloé-Agathe Azencott, Introduction au Machine Learning - 2e édition, édition dunod, février 2022
- [22]: Gavin Hackeling, Mastering Machine Learning with scikit-learn, packt publishing
- [23] : voir le document :
- [https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence\\_artificielle/187257](https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence_artificielle/187257)
- [24] : voir le document :
- [https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/MissionVillani\\_Vulgarisation\\_FR-VF.pdf](https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/MissionVillani_Vulgarisation_FR-VF.pdf)
- [25] : PETRICEVIC Adrian, TALLOIR Vincent ; « L'intelligence artificielle : une solution à la prise de décision quotidienne ? » ; ecole superieur de génie informatique 2018/2019
- [26] : A. Cornuéjols, L. Miclet, Y.Kodratoff, « Apprentissage Artificiel, Concepts et

Algorithms » ISBN 2-212-11020-0, 2002.

[27]: Hadley Wickham, « Tidy Data », Journal of Statistical Software, vol. 59, no 10, **p. ,2014**  
**(DOI 10.18637/jss.v059.i10) 23-1**

[28]: Y C A Padmanabha Reddy, P Viswanath, B Eswara Reddy, Semi-supervised learning: a brief review, International Journal of Engineering & Technology

[29]: O. Chapelle, B. Scholkopf, and A. Zien, “Semi-supervised learning (chapelle, o. et al., eds.; 2006)[book reviews],” IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 20, no. 3, pp. 542–542, 2009.

<https://doi.org/10.1109/TNN.2009.2015974>

[30]: Lee, Daeyeol; Seo, Hyojung; Jung, Min Whan (21 July 2012). "Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making". Annual Review of Neuroscience. 35 (1)

## **Annexes :**

- Le lien de l'exécution de l'algorithme Random Forest classification :

[https://colab.research.google.com/drive/1n9qEuh\\_68yToZGoSeo7xPvV3Ne07C6uq](https://colab.research.google.com/drive/1n9qEuh_68yToZGoSeo7xPvV3Ne07C6uq)

- Dataset :

<https://www.kaggle.com/datasets/shivamb/machine-predictive-maintenance-classification>