

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N°: ... // 2025



DOMAINE : SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE FILIERE :  
ÉLECTROMECHANIQUE  
OPTION : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme du Master Académique

Par : TOUALA SALIM  
TAIBI RAMI

Intitulé

**Application des techniques de maintenance  
conditionnelle pour l'amélioration de la fiabilité d'un  
système électromécanique**

Jury composé de :

Dr. Defdaf Mabrouk	Université de M'sila	Président
Pr. Ghemari Zine	Université de M'sila	Encadreur
Pr. Belkhiri Salah	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



# Remerciements

---

## Remerciements

*Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir permis d'achever ce travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur Zine GHEMARJ, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de ce projet.*

*Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives et enrichissantes.*

*Nos remerciements vont également à l'ensemble de nos enseignants, ainsi qu'au personnel administratif, pour leur soutien tout au long de notre parcours académique.*

*Nous tenons à adresser nos remerciements les plus chaleureux à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible. Nous remercions aussi nos amis et collègues pour leur présence, leur entraide et leurs encouragements.*

*Enfin, merci à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*

## Dédicace

---

*Nous dédions ce travail, fruit de plusieurs mois d'efforts, aux personnes qui nous ont toujours soutenus par leur amour, leur présence et leurs encouragements.*

*À nos chères mères, pour leur amour inconditionnel, leurs prières silencieuses et leur soutien sans faille.*

*À nos pères, pour leur sagesse, leur patience et leur confiance en nous.*

*À notre encadrant, Monsieur Dr. Zine GHEMARJ, pour sa précieuse orientation, sa bienveillance et ses conseils éclairés tout au long de ce travail.*

*Et enfin, au peuple palestinien, symbole de résistance, de dignité et d'espoir, vous êtes une source d'inspiration pour l'humanité entière.*

*Merci à vous tous.*

# Table des matières

---

<b>Table des matières</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des Figures</b> .....	<b>6i</b>
<b>Liste des Tableaux</b> .....	Error! Bookmark not defined.i
<b>Introduction générale</b> .....	
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
I.2. Définition de la maintenance.....	3
I.3. Objectifs de la maintenance.....	3
I.4. Les types de maintenance.....	4
I.4.1. Maintenance préventive.....	4
I.4.1.1. La maintenance préventive systématique.....	5
I.4.1.2. La maintenance préventive conditionnelle .....	5
I.4.1.3. Les opérations de maintenance préventive .....	6
I.4.2. La maintenance corrective.....	7
I.4.2.1. Palliative (dépannage).....	7
I.4.2.2. Curative (réparation).....	7
I.4.2.3. Les opérations de maintenance corrective.....	8
I.4.3. La maintenance prédictive ou prévisionnelle.....	8
I.5. Evolution de la maintenance.....	8
I.6. Importance de la maintenance.....	9
I.7. La mise en place de la maintenance.....	9
I.8. Environnement de la maintenance.....	9
I.9. Stratégie de maintenance :(-FD X 60-000 Mai2002).....	10
I.10. Les niveaux de maintenance.....	10
I.10.1. Premier niveau .....	11
I.10.2 Deuxième niveau .....	11
I.10.3 Troisième niveau .....	11
I.10.4 Quatrième niveau .....	12
I.10.5 Cinquième niveau .....	12
I.11. Conclusion.....	13
II.1. Introduction.....	16
II.2. Techniques d'analyse.....	16

II.2.1 L'analyse vibratoire.....	17
II.2.1.1 Objectifs d'analyse vibratoire.....	18
II.2.1.2 Les avantages.....	18
II.2.1.3 Les inconvénients.....	18
II.2.1.4 Champs d'application privilégiée.....	18
II.2.1.5 Définition d'une vibration.....	18
II.2.1.6 Caractéristiques d'une vibration.....	18
II.2.1.7 Les capteurs de vibration .....	20
II.2.2 L'analyse par thermographie infrarouge.....	20
II.2.2.1 Avantages et inconvénients de la thermographie par infrarouge.....	21
II.2.2.2 Domaines d'application industrielle.....	21
II.2.2.3 Principe de l'analyse thermographique.....	21
II.2.3 Analyse acoustique ultrasonore .....	22
II.2.3.1 Présentation de la détection des ultrasons .....	23
II.2.3.3 Mesure par réflexion.....	23
II.2.3.4 Mesure par transmission .....	23
II.2.3.5 Les appareils de contrôles ultrasonores.....	24
II.2.3.6 L'inspection ultrasonore intégrée dans un Programme de maintenance Conditionnelle.....	25
II.2.3.7 Monitoring de vibration acoustique.....	25
II.2.3.8 Contrôle des purgeurs de vapeur.....	26
II.2.3.9 Contrôle de graissage.....	26
II.2.3.10 Inspections électriques.....	27
II.2.3.11 La détection de fuites.....	27
II.2.3.12 Contrôle d'étanchéité.....	28
II.2.4 Analyse d'huile.....	29
II.2.4.1 Effets de la pollution de l'huile.....	29
II.2.4.2 Sources de pollution de l'huile.....	29
II.2.4.3 Pollution générée par l'usure Mécanique : Intégration en fonctionnement...	30
II.2.4.4 Influence de la pollution de l'huile sur le fonctionnement.....	31
II.2.4.5 Objectifs visés par l'analyse de l'huile.....	31
II.2.4.6 Impacts économiques.....	31
II.2.4.7 Les techniques d'analyse des huiles.....	32
II.3 Les lois de la FMD.....	32

II.3.1 Loi exponentielle $exp(\lambda)$ .....	32
II.3.2 Loi Gamma $G(\alpha, \beta)$ .....	33
II.3.3 Loi log-normale $Log\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ .....	33
II.3.4 Loi de Weibull $\mathcal{W}(\beta, \alpha)$ .....	34
II.4. Les tests d'ajustement.....	34
II.5. Tests Kolmogorov-Smirnov.....	35
II.6. Tests Khi-Deux.....	35
II.7. Conclusion.....	36
III.1 Une brève introduction de l'extrusion en aluminium.....	39
III.2 Les origines de l'aluminium.....	39
III.3. Développement d'aluminium extrudé.....	39
III.4 Vue d'ensemble de l'usine Algal Plus (+).....	40
III.4.1 Bref historique.....	40
III.3.2 Les chiffres relatifs à l'entreprise.....	41
III.3.3 Chaînes de production.....	41
III.3.4 Certains des concurrents.....	41
III.3.5 Structure organisationnelle de l'entreprise.....	41
III.3.6 Les unités d'entreprise.....	42
III.3.7 Département de maintenance.....	44
III.4. Bureau de études et méthodes.....	44
III.5 Atelier mécanique.....	45
III.6 Atelier électrique.....	45
IV. L'analyse statistique de la FMD .....	47
IV.1. Historique de pannes du FOUR A BILLETES 250 L.....	47
IV .2. L'analyse FMD .....	53
IV .2.1. La fiabilité.....	53
IV .2.1.1. Test KOMOGOROV – SMIRNOV.....	54
IV. 2.1.2. Calculs de la fiabilité, de la densité probabilité et du temps de défaillance... ..	57
IV.2.1.3. Calcul de R (MTBF) .....	60
IV .2.1.4. Calcul de F(MTBF) .....	60
IV.2.1.5. La densité de défaillance $f(\text{MTBF})$ .....	60
IV.2.1.6. Calcul de $\lambda(\text{MTBF})$ .....	61
IV.2.2. La maintenabilité.....	61
IV .2.3.2 Disponibilité instantané.....	63

IV.3. L'application des méthodes d'analyse .....	66
IV.3.1. La méthode de la courbe ABC .....	66
IV.4. Plan de Maintenance Préventive Systématique Additionne.....	73
IV.4.1 Objectifs.....	73
IV.4.2 Périmètre.....	74
IV.4.3 Fréquence d'intervention.....	74
IV.4.4. Documents de suivi.....	74
IV.4.5. Moyens nécessaires.....	74
IV.4.6. Plan d'amélioration continue.....	74
IV.5 .Conclusion.....	75
Conclusion Générale.....	76
Bibliographies.....	77

# Liste des figures

---

<b>Figure I.1.</b> Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement.....	<b>3</b>
<b>Figure I.2 .</b> Les types de maintenance.....	<b>4</b>
<b>Figure I.3.</b> Maintenance préventive.....	<b>4</b>
<b>Figure I.4.</b> La maintenance préventive systématique.....	<b>5</b>
<b>Figure I.5.</b> La maintenance conditionnelle.....	<b>6</b>
<b>Figure I.6.</b> Maintenance palliative ou dépannage.....	<b>7</b>
<b>Figure I.7</b> Maintenance curative ou réparation.....	<b>8</b>
<b>Figure I.8.</b> L'assurance produit.....	<b>9</b>
<b>Figure II.1</b> Différentes méthodes d'analyse.....	<b>17</b>
<b>Figure II.2</b> Nature d'une vibration.....	<b>20</b>
<b>Figure II.3.</b> Thermo gramme: usure de palier.....	<b>21</b>
<b>Figure II.4.</b> Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge.....	<b>22</b>
<b>Figure II.5.</b> Principe du contrôle par ultrasons.....	<b>22</b>
<b>Figure II.6.</b> Présentation du contrôle par ultrasons.....	<b>23</b>
<b>Figure II.7</b> Structure d'un palpeur pour ondes longitudinales.....	<b>24</b>
<b>Figure II.8</b> Structure d'un palpeur pour ondes transversales.....	<b>24</b>
<b>Figure II.9</b> schéma de Contrôle ultrasonique d'un moteur.....	<b>25</b>
<b>Figure II.10</b> Contrôle ultrasonique d'un moteur.....	<b>25</b>
<b>Figure II.11</b> Graissage d'un roulement Par US.....	<b>26</b>
<b>Figure II.12</b> Détérioration d'un isolateur de ligne.....	<b>27</b>
<b>Figure II.13</b> Détection des fuites par US.....	<b>28</b>
<b>Figure II.14</b> Contrôle d'étanchéité par US.....	<b>29</b>
<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document. <b>1</b> L'interface de l'Entreprise ALGAL+.....	<b>40</b>
<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document. <b>2</b> La structure organisationnelle de l'Entreprise.....	<b>42</b>

<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document.. <b>3</b> Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise.....	<b>42</b>
<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document.. <b>4</b> Unité d'extrusion.....	<b>43</b>
<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document.. <b>5</b> . L'opération de correction de filières.....	<b>43</b>
<b>Figure</b> Error! No text of specified style in document.. <b>6</b> . L'opération d'Anodisation.....	<b>44</b>
<b>Figure IV.1</b> : Papier fonctionnel de Wei bull .....	<b>54</b>
<b>Figure. IV.2</b> . Fonction de répartition $F(t)$ . .....	<b>57</b>
<b>Figure. IV.3</b> . La densité de probabilité $f(t)$ .....	<b>59</b>
<b>Figure.IV.4</b> . La fonction de fiabilité $R(t)$ .....	<b>59</b>
<b>Figure.IV.5</b> . Taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	<b>60</b>
<b>Figure IV.6</b> . Courbe de la fonction de maintenabilité .....	<b>63</b>
<b>Figure IV.7</b> . La Courbe de disponibilité instantanée .....	<b>65</b>
<b>Figure IV .8</b> . La Courbe d'ABC.....	<b>70</b>

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I.1.</b> Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.....	<b>13</b>
<b>Tableau II.1:</b> différentes épaisseurs de pollution d'huile.....	<b>30</b>
<b>Tableau IV - 1.</b> Historique de pannes de la FOUR A BILLETTES 250 L .....	<b>52</b>
<b>Tableau IV-2-</b> Estimation de la fonction de répartition.....	<b>53</b>
<b>Tableau IV-3-</b> Les paramètres de calcul de fiabilité.....	<b>54</b>
<b>Tableau IV.4.</b> La comparaison entre la fonction de répartition réelle et la fonction de répartition théorique.....	<b>56</b>
<b>Tableau IV.5:</b> Calculs de la fiabilité, du temps de défaillance et de la densité de probabilité.....	<b>58</b>
<b>Tableau IV.6.</b> calcul de La maintenabilité.....	<b>62</b>
<b>TableauIV 7.</b> Tableau de disponibilité instantané.....	<b>65</b>
<b>Tableau IV .8.</b> L'analyse ABC (Pareto) .....	<b>70</b>

## Résumé

Ce mémoire traite de l'optimisation de la maintenance industrielle à travers l'application conjointe de la maintenance conditionnelle et de l'analyse Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité (FMD). L'étude de cas, menée sur le four à billettes 250 L de l'entreprise Algal+, montre comment une surveillance ciblée des paramètres de fonctionnement permet d'anticiper les défaillances, de réduire les arrêts non planifiés et d'améliorer la disponibilité des équipements. Les résultats obtenus soulignent l'importance d'intégrer des outils d'analyse avancés dans les stratégies de maintenance, en particulier dans le contexte de l'Industrie 4.0.

## ملخص

يتناول هذا البحث تحسين الصيانة الصناعية من خلال التطبيق المشترك للصيانة القائمة على الحالة وتحليل الموثوقية وقابلية الصيانة والتوافر ، كيف يمكن من خلال المراقبة المستهدفة Algal+ تُظهر دراسة الحالة، التي أُجريت على فرن البليتات بسعة 250 لترًا في شركة (FMD). لمؤشرات التشغيل التنبؤ بالأعطال وتقليل التوقفات غير المخططة وزيادة جاهزية المعدات. وتؤكد النتائج على أهمية دمج أدوات التحليل المتقدمة ضمن استراتيجيات الصيانة، خاصةً في سياق التحول نحو الصناعة 4.0.

## Abstract

This thesis focuses on optimizing industrial maintenance through the combined application of condition based maintenance and Reliability – Maintainability – Availability (RMA) analysis. The case study, conducted on the 250 L billet furnace at **Algal+**, demonstrates how targeted monitoring of operational parameters enables early fault detection, reduces unplanned downtime, and improves equipment availability. The results highlight the importance of integrating advanced analytical tools into maintenance strategies, particularly within the framework of Industry 4.0.

# Introduction générale

Dans le contexte industriel contemporain, marqué par une concurrence accrue, des exigences de qualité de plus en plus strictes et une nécessité impérieuse d'assurer la continuité de la production, la maintenance des équipements joue un rôle central et stratégique. Elle n'est plus perçue comme une simple fonction de soutien, mais comme un levier essentiel de performance, de fiabilité et de rentabilité pour les entreprises.

L'évolution rapide des technologies, l'intégration croissante de systèmes complexes, automatisés et interconnectés, ainsi que les impératifs de productivité ont profondément transformé les pratiques de maintenance industrielle. Ainsi, on assiste à un passage progressif mais inévitable d'une maintenance corrective – réactive, coûteuse et souvent aléatoire – vers des approches plus avancées, préventives et intelligentes, centrées sur l'anticipation des défaillances et la maîtrise des risques.

Parmi ces approches modernes, la maintenance conditionnelle (ou maintenance basée sur l'état) s'impose comme une solution innovante et efficace. Elle repose sur la surveillance continue et en temps réel des paramètres de fonctionnement des équipements (température, vibration, pression, bruit, etc.) grâce à des capteurs intelligents et à des systèmes de traitement de données. Cette stratégie permet de détecter les premiers signes de dysfonctionnement avant qu'ils ne provoquent des pannes graves, et ainsi d'intervenir au moment le plus opportun. Elle contribue directement à la réduction des arrêts non planifiés, à l'augmentation de la durée de vie des équipements, à l'amélioration de la sécurité opérationnelle et à l'optimisation des coûts de maintenance.

Dans ce cadre, l'analyse Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité (FMD) représente un outil d'aide à la décision incontournable. Elle permet de quantifier les performances d'un système technique, d'identifier les composants critiques, d'évaluer la fréquence et l'impact des pannes, et d'orienter les décisions stratégiques en matière de gestion des actifs. L'intégration de l'analyse FMD dans les démarches de maintenance conditionnelle permet d'accroître la pertinence des actions entreprises, en se basant sur des indicateurs clairs et mesurables.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique d'innovation industrielle et s'articule autour de l'application concrète de ces concepts à un cas réel. Il se structure en quatre chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre présente les notions fondamentales liées à la maintenance industrielle, son évolution historique, ses différentes formes et ses enjeux actuels.

## Introduction générale

- Le deuxième chapitre est consacré à la maintenance conditionnelle, à ses principes de fonctionnement et à l'analyse FMD, avec une attention particulière portée aux méthodes de calcul et aux indicateurs utilisés.
- Le troisième chapitre propose une présentation détaillée de l'entreprise **Algal+**, de son activité, de ses équipements clés et de son environnement de production.
- Enfin, le quatrième chapitre développe une étude de cas appliquée au **four à billettes 250 L**, un équipement stratégique pour l'entreprise. Une stratégie de maintenance conditionnelle y est proposée, accompagnée d'une analyse FMD approfondie, fondée sur des données réelles.

L'objectif principal de ce travail est de démontrer, à travers une démarche rigoureuse et structurée, comment l'intégration d'outils d'analyse fiables et l'adoption de stratégies de maintenance intelligentes peuvent contribuer significativement à l'amélioration des performances industrielles. Ce mémoire ambitionne ainsi de participer à la réflexion sur la transformation des pratiques de maintenance dans l'optique d'une industrie plus performante, plus compétitive et tournée vers l'avenir.

# Chapitre I

Généralité sur la maintenance

**I.1. Introduction**

La maintenance industrielle, dont la mission première est de garantir le bon fonctionnement et la disponibilité des équipements de production, s'impose aujourd'hui comme une fonction stratégique au cœur de la performance globale des entreprises. Loin de se limiter à des interventions de réparation après panne, elle s'inscrit désormais dans une logique proactive, préventive et optimisée. Cette évolution s'explique par plusieurs facteurs convergents. Tout d'abord, le développement technologique rapide dans les domaines de l'automatisation, de l'électronique embarquée, de l'instrumentation et du numérique a profondément transformé les équipements industriels, les rendant à la fois plus performants, plus complexes, mais aussi plus vulnérables. Dans ce contexte, la simple correction des pannes n'est plus suffisante: elle doit être remplacée ou complétée par des approches permettant d'anticiper les défaillances, de minimiser les interruptions de service et d'optimiser la durée de vie des installations. Par ailleurs, la pression économique croissante oblige les entreprises à réduire au maximum les coûts liés aux arrêts de production non planifiés, aux réparations d'urgence et au remplacement prématuré des équipements. La maintenance devient alors un vecteur de compétitivité, capable d'apporter de la valeur ajoutée en contribuant à la qualité, à la sécurité, et à la continuité des opérations. En parallèle, l'émergence de nouvelles méthodes organisationnelles et la diffusion des principes de l'industrie 4.0 incluant les capteurs intelligents, l'internet des objets (IoT), le traitement de données en temps réel et l'intelligence artificielle – favorisent l'émergence de stratégies de maintenance avancées, telles que la maintenance prédictive ou conditionnelle. Ces approches permettent d'agir avant l'apparition d'une panne, sur la base d'indicateurs mesurés en continu, rendant les interventions plus ciblées, plus efficaces et moins coûteuses. Ainsi, la maintenance industrielle d'aujourd'hui ne se résume plus à une fonction de support technique ; elle est devenue un élément clé de la stratégie industrielle, au service de la fiabilité, de la performance opérationnelle, et de la durabilité des équipements. Son rôle est crucial pour accompagner les entreprises dans un environnement de plus en plus exigeant, concurrentiel et technologique.

**I.2. Définition de la maintenance**

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance est définie comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ". La maintenance est un ensemble des travaux destinés à soutenir l'aptitude au travail au la réparation d'un matériel pendant son utilisation, son stockage, ou son transport. Conserver l'état de la machine; Assurer la qualité de la production avec un coût global optimal [1].

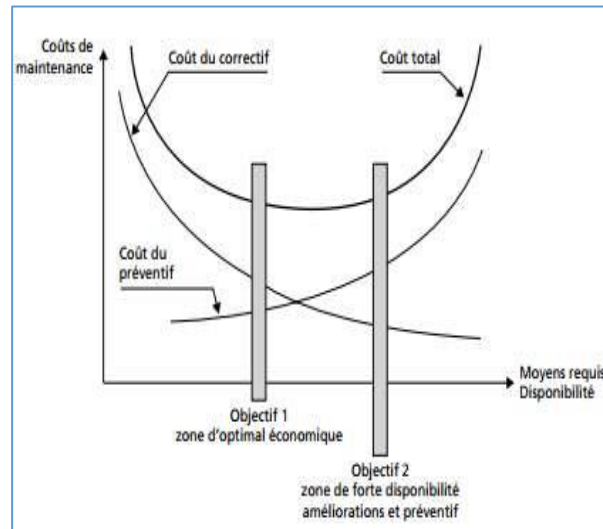
**I.3. Objectifs de la maintenance**

Les deux objectifs majeurs de maintien d'un site de production [2] :

**Premier objectif** : à dominante économique : réduire les dépenses et à travers elles, le budget du service ;

**Deuxième objectif** : à dominante opérationnelle : améliorer la disponibilité du système productif et à travers elle, la productivité.

Le graphe « économique » de la Figure I.1 illustre chacun des deux objectifs possibles, ainsi que leur incompatibilité de principe, sinon de fait [2].



**Figure I.1. Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement.**

#### I.4. Les types de maintenance

Il existe deux principales familles de maintenance que l'on peut repérer sur la figure 1 : la maintenance corrective et la maintenance préventive. La maintenance corrective est celle que le système subit lorsque la panne est déjà présente et qu'il faut réparer. La maintenance

préventive est celle qui permet d'anticiper et de prévenir les défaillances.[3]

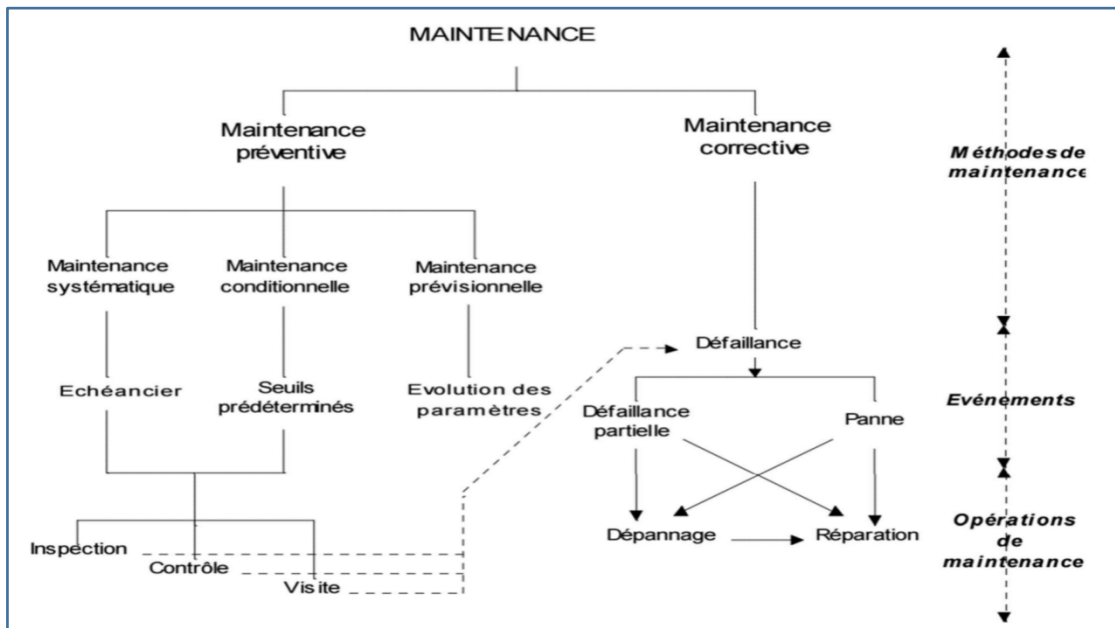


Figure I.2. Les types de maintenance.

**I.4.1. Maintenance préventive:**

Selon la norme AFNOR (X-60-010), la maintenance préventive peut être définie comme une maintenance visant à réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou de dégradation du service rendu. Il existe deux méthodes pour cet entretien

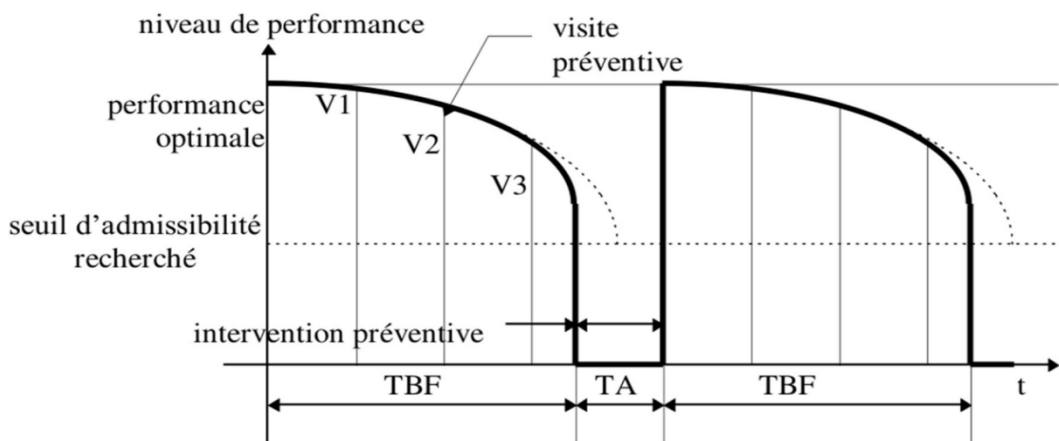


Figure I.3. Maintenance préventive.

**I.4.1.1. La maintenance préventive systématique**

Selon la norme AFNOR X-60-010, la maintenance systématique est définie comme une maintenance préventive effectuée selon un plan établi, en fonction du temps ou du nombre d'unités utilisées [3].

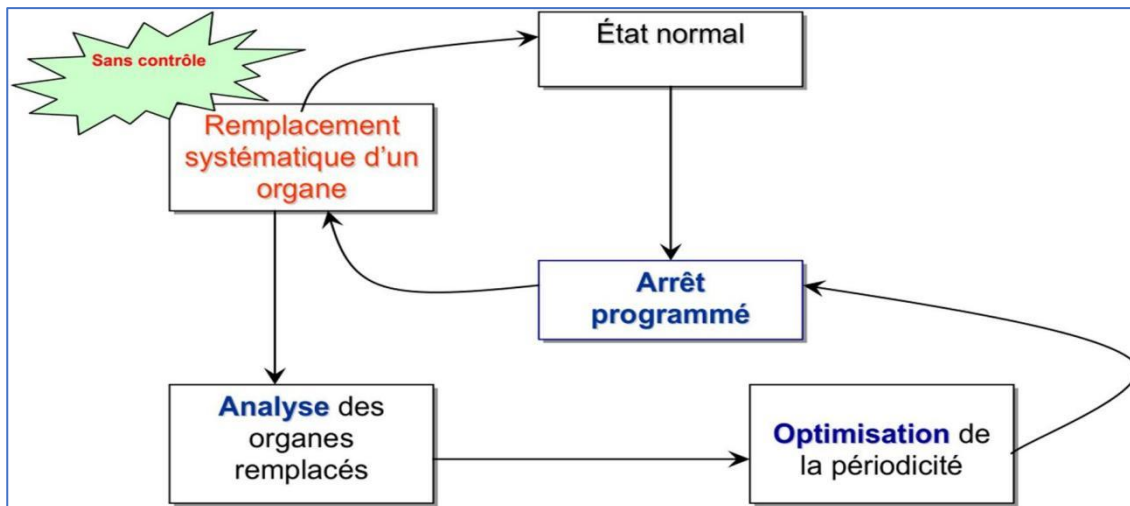


Figure I.4. La maintenance préventive systématique.

#### I.4.1.2. La maintenance préventive conditionnelle

Selon la norme AFNOR X-60-010, la maintenance conditionnelle est définie comme une maintenance préventive faisant l'objet d'une classe d'événements programmés révélant l'état du bien [3].

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles des équipements :[4]

- Mesure des vibrations sonores.
- Mesure de la température.
- Mesure la pression dans divers organes.
- Analyse vibratoire : généralement effectuée dans un atelier de réparation sur une base industrielle.
- Analyse d'huile [5].

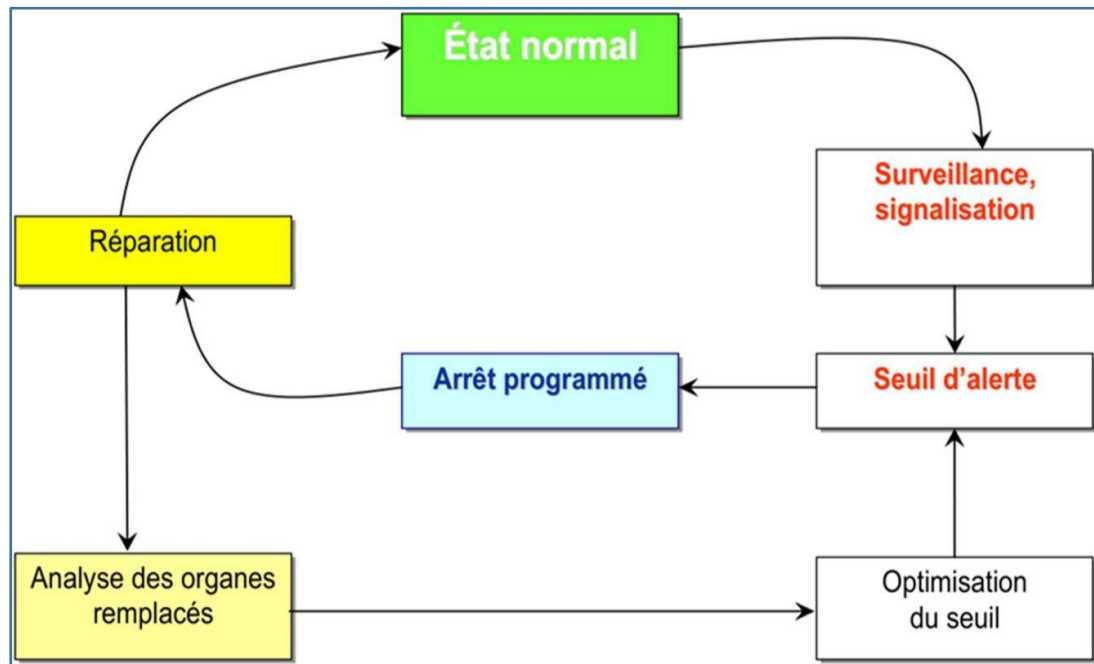


Figure I.5. la maintenance conditionnelle.

#### I.4.1.3. Les opérations de maintenance préventive :

- **Les inspections** : Il s'agit d'activités visant à surveiller et à identifier les anomalies et à exécuter périodiquement l'équipement, y compris les modifications mineures qui ne nécessitent pas d'outils particuliers ou qui n'interrompent pas l'outil ou l'équipement de production.
- **Les visites** : Opération de surveillance effectuée selon un cycle défini dans le cadre de la maintenance préventive du système. Ces interventions correspondent à une liste prédéfinie d'actions pouvant conduire au démontage de composants et à la fixation d'équipements. L'accès peut entraîner des actions de maintenance correctives.
- **Contrôles** : Vérifications de conformité basées sur des données préétablies suivies de jugement.

Les contrôles peuvent :

- Inclure des activités d'information.
- Inclure les décisions : accepter, rejeter, ajourner.
- Actions de maintenance correctives dues à l'accès.

Des opérations de surveillance (inspection, accès, contrôle) sont nécessaires pour contrôler l'évolution de l'état physique de l'actif, de façon continue ou intermittente réservé ou non, calculé en fonction du temps ou du nombre d'unités utilisées.

- **Révision** : Vérifier toutes les actions et contrôler les interventions effectuées

pour s'assurer résiste bien à toute défaillance majeure ou critique, que ce soit pour une période ou une période d'unités d'usage donné selon l'ampleur de cette opération, il est d'usage de distinguer les révisions partielles, révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles [6].

**I.4.2. La maintenance corrective**

La norme AFNOR NF X 60 010 définit la maintenance corrective comme maintenance après panne, où l'on distingue deux types d'intervention [7] :

**I.4.2.1. Palliative (dépannage)**

Elle est basée sur des actions de dépannage, par ce que la défaillance est partielle.

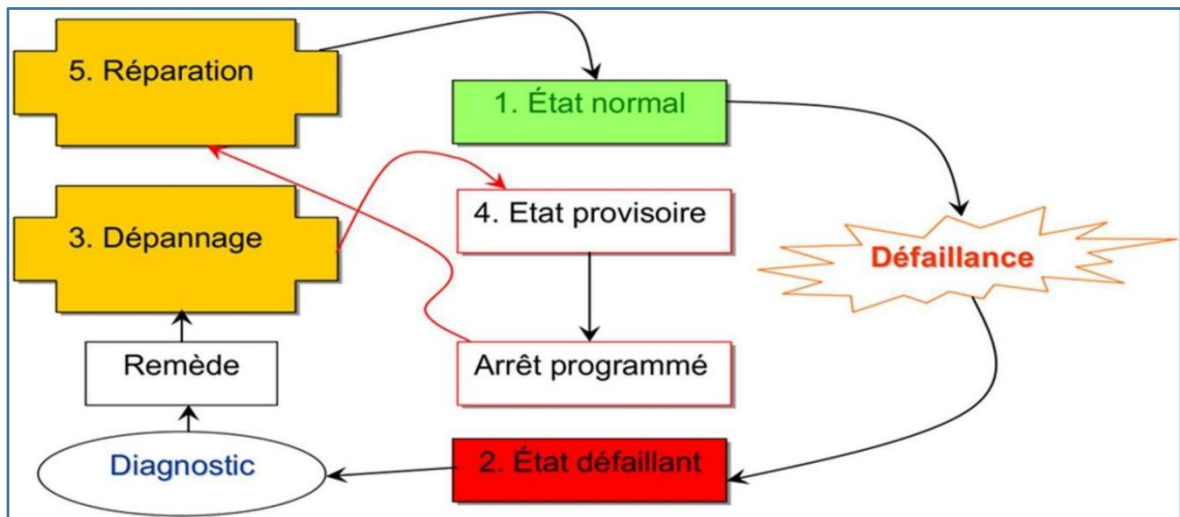


Figure I.6. Maintenance palliative ou dépannage.

**I.4.2.2. Curative (réparation):**

Repose sur une opération de réparation parce que la défaillance est totale.

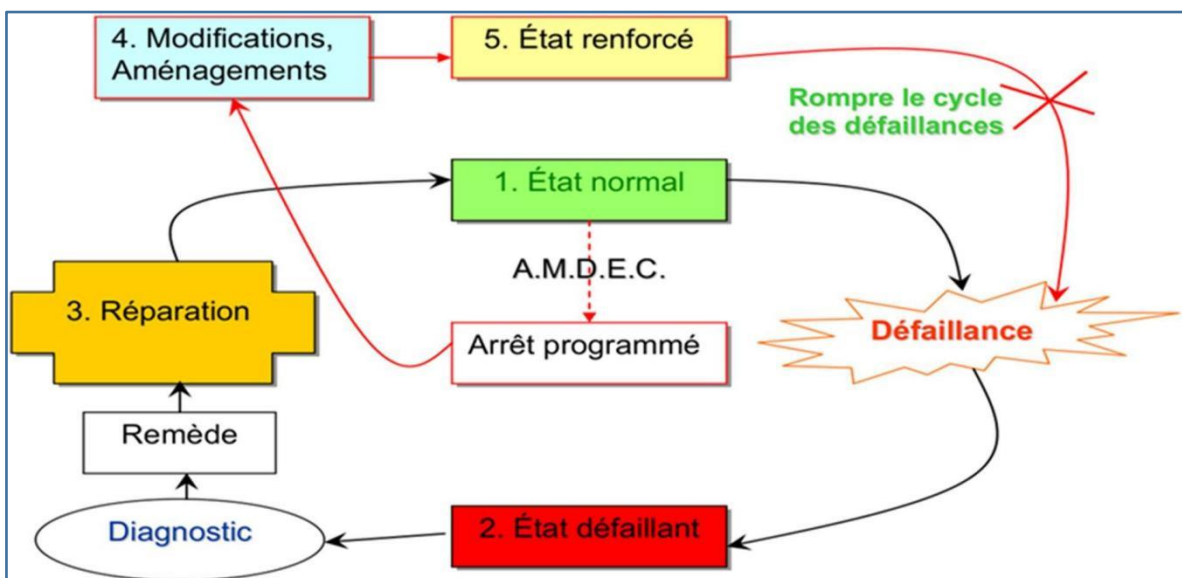


Figure I.7. Maintenance curative ou réparation.

### I.4.2.3. Les opérations de maintenance corrective

- **Le dépannage** : Il s'agit d'une action de maintenance corrective ou d'une opération sur un équipement endommagé en pour le remettre dans son état de fonctionnement.
- **La réparation** : Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique [3].

### I.4.3. La maintenance prédictive ou prévisionnelle

Il s'agit d'une maintenance conditionnelle qui permet de redimensionner la prévision opérations de maintenance effectuées, en estimant la tendance d'évolution des défaillances possibles détectées sur l'appareil et quand elles se sont produites continuer à utiliser jusqu'à l'échec, ces estimations sont obtenues en analysant périodiquement l'état de chaque équipement obtenu par les méthodes de maintenance, l'état et modèles d'usure utilisés [8].

### I.6 Evolution de la maintenance

Au fil du développement de la concurrence et de la course à la compétitivité qui entraîne la recherche de la qualité totale et surtout la réduction des coûts, au fur et à mesure de la complexification et de l'automatisation des processus de production, la maintenance est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Loin d'être aujourd'hui stabilisée, elle évolue au gré des nouvelles technologies de l'information et de communication NTIC, l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, en particulier dans les domaines de la mesure et du contrôle de fonctionnement, de la systématisation progressive, de l'usage des normes et des procédures [9].

### I.7. Importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, et cela est évident lorsque les pannes entraînent des temps d'arrêt imprévus. Par conséquent, toute interruption pendant le fonctionnement entraîne :

- Augmentation du coût de productions.
- Diminution de la marge du profit.
- Rupture du stock.
- Retard des livraisons.
- Ajout des heures supplémentaires.
- Absence des sécurités des opérateurs [10].

### I.8. La mise en place de la maintenance

- Etude initiale pour déterminer les coûts possibles.
- Sélectionnez une fréquence d'intervention fixe (en rapport avec la MTBF).
- Planification de la mission et mesures de sécurité.
- Préparation des documents.
- Exécuter et accéder aux rapports.
- Exploitation des résultats pour l'historique et le réajustement des fréquences.

### I.9. Environnement de la maintenance

La maintenance fait partie du concept global de sécurité de fonctionnement, qui fait lui-même partie de l'assurance produit. [11]

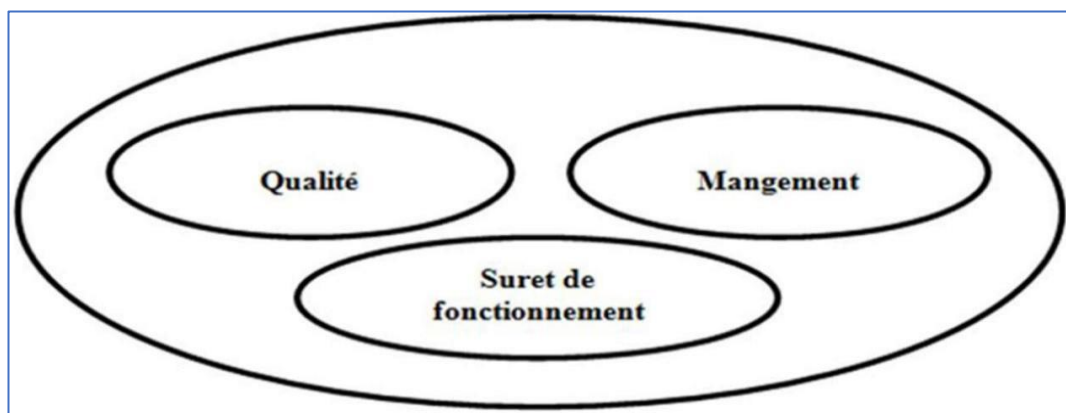


Figure I.8. L'assurance produit.

### I.10. Stratégie de maintenance : (-FD X 60-000 Mai2002)

La stratégie de maintenance, qui résulte de la politique de maintenance, impose des choix pour atteindre, voire dépasser, les objectifs fixés.

Ces choix sont à faire pour :

- Développer, ajuster ou implanter des méthodes de maintenance.
- Élaborer et optimiser la portée de la maintenance.
- Organiser l'équipe de maintenance.
- Internalisation et/ou externalisation partielle ou totalement les Tâches de maintenance.
- Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.
- Étudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité
- La stratégie de maintenance implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables, les résultats mesurés sont comparés aux objectifs et font l'objet d'analyses, une partie importante de la stratégie de maintenance concerne les ressources humaines aussi bien chez les intervenants

extérieurs à l'entreprise que dans la personne de l'entreprise elle-même :

- Sélection, recrutement.
- Formation du personnel.
- Gestion de compétences et des habilitations.
- Communication.
- Etc.[12]

### **I.11. Les niveaux de maintenance**

Un niveau de maintenance se définit par rapport :

- à la nature de l'intervention ;
- à la qualification de l'intervenant ;
- aux moyens mis en Suivre.

La norme NF X 60-010 donne, à titre indicatif, cinq niveaux de maintenance, en précisant le service qui en a la responsabilité, la production ou la maintenance.

#### **I.11.1. Premier niveau**

Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement.

Exemples :

- Echanges en toute sécurité d'éléments consommables tels que : fusibles, voyants,
- Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation.

#### **I.11.2 Deuxième niveau**

Il s'agit de dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opérations mineures de maintenance préventive.

Exemples :

- Graissage d'une machine ;
- Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements. Thermiques ;
- Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.

Ces interventions de deuxième niveau 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.

#### **I.11.3 Troisième niveau**

Il s'agit d'identification et de diagnostic de pannes suivis éventuellement :

- d'échanges de constituants ;

- de réparations mécaniques mineures ;
- de réglage et ré étalonnage général des mesureurs.

Exemples

- emplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension ;
- Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine ;
- Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette.

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

#### **I.11.4 Quatrième niveau**

Il s'agit de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.

Exemples

- Révision générale d'un compresseur ;
- Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage ;
- Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil.

Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention.

#### **I.11.5 Cinquième niveau**

Il s'agit de tous les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante, confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services.

Exemples:

- Révision générale de la chaufferie d'une usine ;
- Rénovation d'une ligne de conditionnement de flacons pour améliorer son degré d'automatisation ;
- Réparation d'un engin de levage portuaire partiellement endommagé à la suite d'une tempête.

Dans ce type de travaux les moyens et les méthodes sont comparables à ceux mis en œuvre lors de la fabrication des matériels. C'est au constructeur d'en fournir, les spécifications techniques et constructives. [13].

**Tableau1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance [14].**

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
I	Exploitant sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
II	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité sans délai.
III	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle, etc.
IV	Equipe complète, polyvalentes atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.
V	Equipe complète, polyvalente en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

### I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une analyse approfondie des différents types de maintenance industrielle, notamment la maintenance corrective, la maintenance préventive, la maintenance prédictive et la maintenance conditionnelle. Chacune de ces approches a été examinée en termes de définition, de principes d'application, ainsi que d'avantages et d'inconvénients. Nous avons également mis en lumière les contextes d'utilisation les plus appropriés pour chaque type, en fonction des objectifs de l'entreprise, de la nature des équipements, et du niveau de criticité des installations.

Ce chapitre a ainsi posé les bases nécessaires à la compréhension des concepts fondamentaux de la maintenance industrielle. Il prépare le terrain pour le chapitre suivant, dans lequel nous étudierons en détail les politiques de maintenance adoptées en milieu industriel, avec un focus particulier sur la stratégie appliquée dans l'entreprise Algal+.

# Chapitre II

**Chapitre II : La maintenance conditionnelle et les lois de calcul de  
la FMD**

## **II.1. Introduction**

Dans le contexte industriel moderne, où la compétitivité, la qualité et la continuité de la production représentent des enjeux stratégiques majeurs, la maintenance des équipements joue un rôle central dans la performance globale des entreprises. L'évolution rapide des technologies, la complexification croissante des systèmes de production et les exigences accrues en matière de fiabilité ont profondément transformé les pratiques de maintenance. On est ainsi passé d'une approche essentiellement corrective, reposant sur l'intervention après panne, à des stratégies intégrées, tournées vers la prévention, l'anticipation et l'optimisation des coûts.

Parmi ces stratégies innovantes, la maintenance conditionnelle se distingue par son efficacité. Basée sur l'observation en temps réel des paramètres de fonctionnement des équipements, elle permet d'intervenir au moment le plus opportun, avant qu'une défaillance ne survienne. Cette approche contribue à réduire les arrêts non planifiés, à prolonger la durée de vie des équipements et à rationaliser les ressources allouées à la maintenance.

Dans ce contexte, l'analyse Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité (FMD) s'impose comme un outil essentiel d'aide à la décision. Elle permet d'évaluer les performances globales d'un système industriel, d'identifier les points critiques et de définir des stratégies de maintenance plus pertinentes et plus efficaces. L'intégration de cette analyse dans les processus de maintenance constitue une étape importante vers une gestion proactive des actifs industriels.

## **II.2. Techniques d'analyse**

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (figure II.1) tels que :

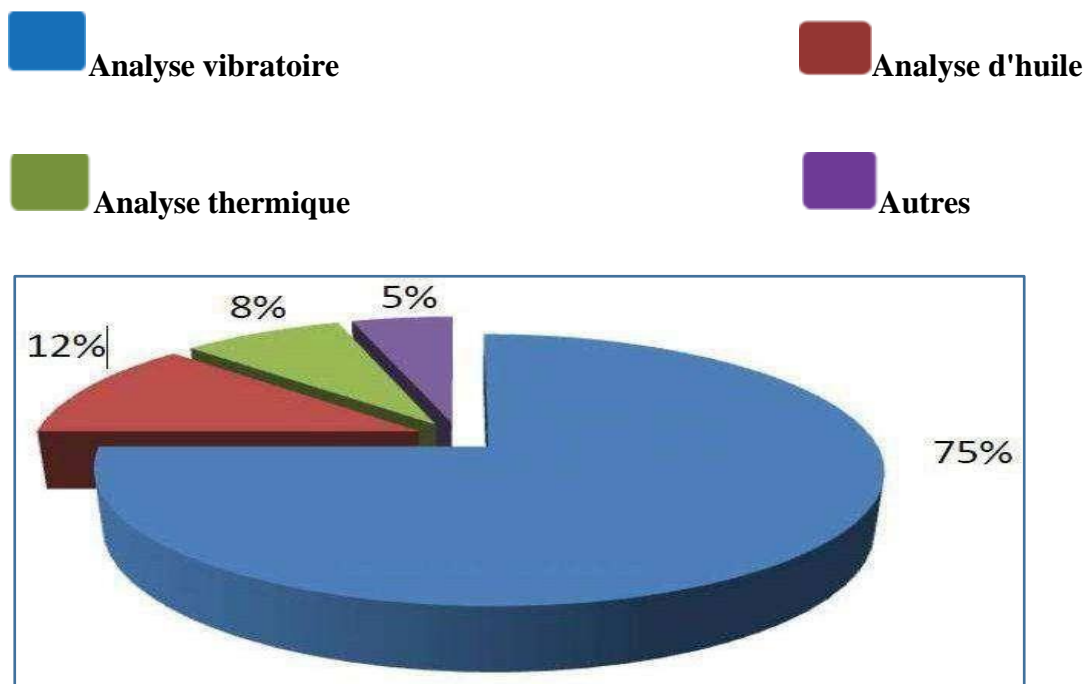
- 1.-**la mesure de vibrations.
- 2.-**la thermographie infrarouge
- 3.-**l'analyse des mesures ultrasonores.
- 4.-**l'analyse d'huile.
- 5.-** Analyse de la signature du courant(MCSA).

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter.

Pour les machines tournantes un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps.

Sur cette figure, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils. [15]

**Pourcentage d'utilisation de différentes méthodes dans le monde.**



**FigureII.1 Différentes méthodes d'analyse.**

### II.2.1 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

### II.2.1.1 Objectifs d'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- ✚ La détection des défauts.
- ✚ L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés

- ✚ Soit dans le domaine temporel,
- ✚ Soit dans le domaine fréquentiel,
- ✚ Soit dans les deux à la fois. [16]

### II.2.1.2 Les avantages :

- ✚ Détection de défauts à un stade précoce,
- ✚ Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi, ✚ autorise une surveillance continue,
- ✚ Permet de surveiller,
- ✚ L'équipement à distance,

### II.2.1.3 Les inconvénients

- ✚ Spectres parfois difficile interpréter.
- ✚ Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

### II.2.1.4 Champs d'application privilégiée

Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts D'alignement, jeux, etc.) Et de sa structure.

### II.2.1.5 Définition d'une vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va -et- vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre, si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort on constate qu'il se traduit par :

- ✚ Un déplacement la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.
- ✚ Une vitesse de déplacement variation du déplacement par rapport au temps.
- ✚ Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps.

### II.2.1.6 Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence son amplitude et sa nature.

### A. Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz]. 1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 Hertz.

### B. Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir.

L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ou niveau crête l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ou niveau crête-crête.

### C. Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (figure II.2 a) ou sinusoïdal complexe (figure II.2 b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain

Nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

Les vibrations périodiques de type impulsionnel (figure II.2c) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux compresseurs à pistons,...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ... Les vibrations aléatoires de type impulsionnel (figure II.2 d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement la cavitation d'une pompe [17].

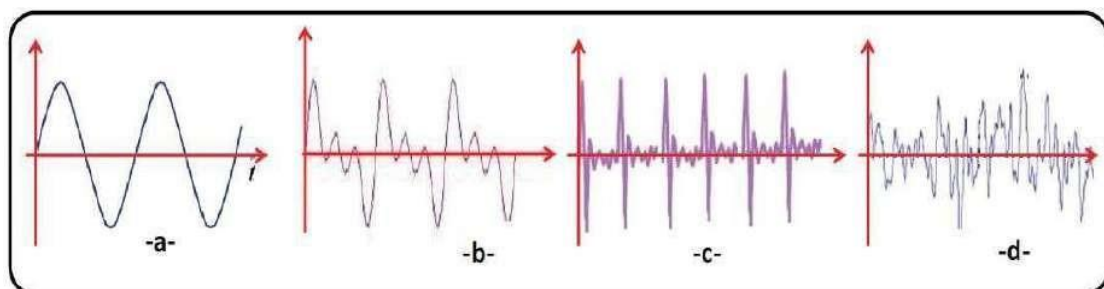


Figure II.2. Nature d'une vibration.

#### II.2.1.7 Les capteurs de vibration :

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration

mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent.

Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

### **II.2.2 L'analyse par thermographie infrarouge**

La thermographie infrarouge «TIR» est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.

La technologie de détection par thermographie infrarouge est devenue un moyen irremplaçable de garantir la sécurité des conditions de production industrielle. Son utilisation est commune à des secteurs de l'industrie aussi divers que la métallurgie et l'énergie électrique, l'industrie pétrolière, l'automatisation, l'exploitation du gaz naturel, l'industrie des transports, et à d'autres professions engagées tel que dans la lutte contre le feu et la surveillance des frontières.

Cette méthode de détection ne nécessite aucune coupure de courant, n'exige ni arrêt des machines, ni interruption de la production. Elle permet de diagnostiquer à l'avance les dysfonctionnements latents, et ainsi de prévenir l'occurrence des pannes, d'éviter les incidents de production. L'imagerie thermique est une technique innovante d'évaluation «sans contact » à la fois sûre, fiable, et rapide.

Une caméra thermique ne mesure pas des températures mais des flux de rayonnement. Après le réglage de certains paramètres par l'opérateur en thermographie, la caméra calcule alors les températures de la cible fournit ensuite à l'utilisateur une cartographie des températures, appelée thermo gramme (figure II.9)[18].



Figure II.3. Thermo gramme : usure de palier

### II.2.2.1 Avantages et inconvénients de la thermographie par infrarouge:

- **Avantage:**
  - ✚ **Mesure sans contact:** à distance –l’opérateur n’est pas exposé au danger.
  - ✚ **Gain de temps:** ne nécessite pas d’arrêt de production, n’affecte pas l’activité de l’objet contrôlé.
  - ✚ **Multidimensionnel:** comparaison possible entre 2 ou plusieurs milliers de points sur la même image.
  - ✚ **Aide à la compréhension:** grâce à l’image vous savez à quel endroit porter votre attention.
  - ✚ **Mesure en temps réel:** thermo gramme généré à la vitesse de la lumière.
  - ✚ **Prédiction des défauts :** les échauffements signes de défaillances annoncées sont visibles au plus tôt.
- **Inconvénients**
  - ✚ Nécessite du matériel spécifique et onéreux
  - ✚ Risques d’erreur
  - ✚ Nécessite un opérateur compétant et formé. [19]

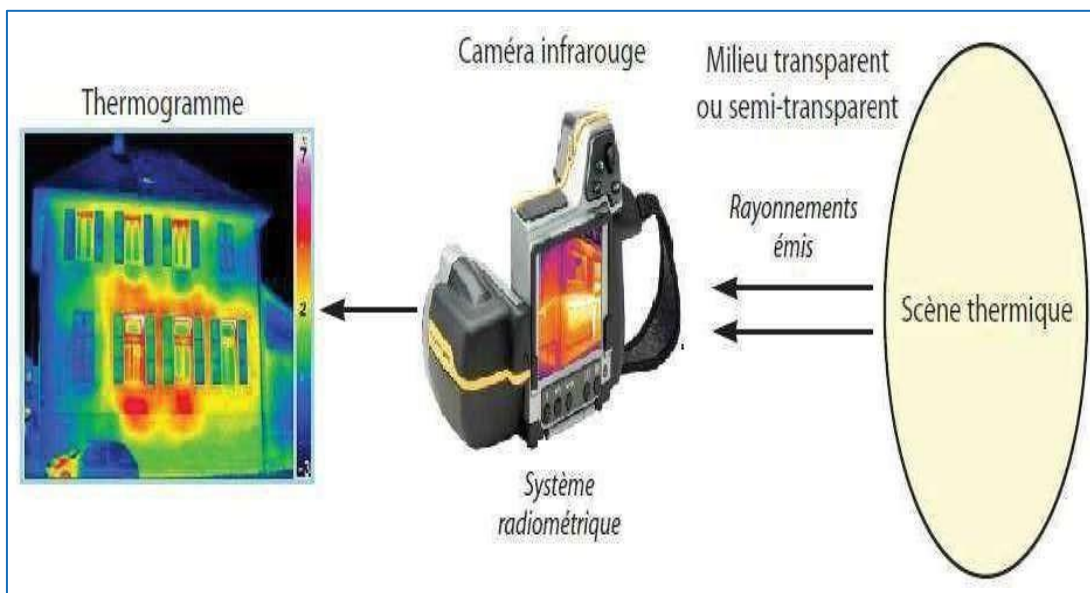
### II.2.2.2 Domaines d'application industrielle

Dans le secteur industriel, son but est souvent la maintenance prédictive. Il s’agit de prévoir, lors d’un diagnostic de contrôle, quels pourraient être les problèmes issus des défauts d’équipements invisibles à l’œil nu. Le principe est d’identifier les éléments défectueux des installations électriques, électromécaniques, hydrauliques, frigorifiques...avant que n’apparaissent les pannes, accidents ou incendies.

### II.2.2.3 Principe de l'analyse thermographique

La caméra infrarouge capte au travers d’un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points

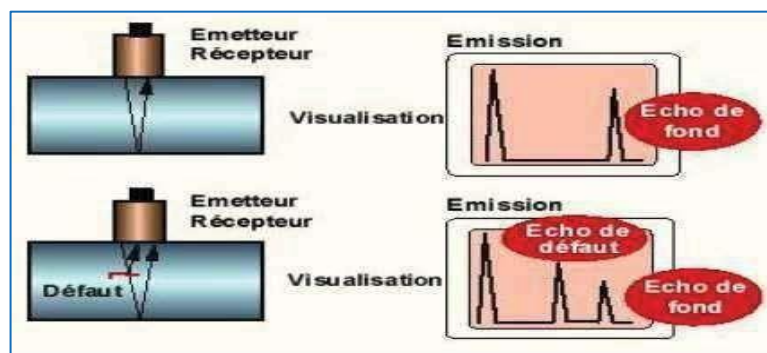
lumineux sur un écran (figure II. 14).L'image ainsi obtenue s'appelle « Thermo gramme ».[20]



FigureII.4 Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge.

### II.2.3 Analyse acoustique ultrasonore

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse. La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).



FigureII.5 Principe du contrôle par ultrasons

On peut distinguer deux types de méthodes par ultrasons :

- A. Les Ultrasons dit « classiques » permettant de déceler des indications au cœur de la Matière en utilisant des transducteurs de type ondes longitudinales ou à ondes inclinées.
- B. Les mesures d'épaisseurs qui permettent de vérifier l'épaisseur restante d'un matériel (on peut établir une cartographie des zones examinées et étudier son évolution dans le temps). Sachant que les fréquences utilisées pour le contrôle des métaux sont de l'ordre de 1 à 10MHz.

Les manières de réaliser les mesures peuvent être classées en deux catégories :

### II.2.3.3 Mesure par réflexion

De manière générale, la mesure par réflexion utilise le même transducteur pour l'émission et la réception du signal.

### II.2.3.4 Mesure par transmission

Ce type possède un émetteur et un récepteur de signal qui sont distincts. La difficulté de cette dernière méthode vient dans le fait que le récepteur doit se trouver exactement là où le signal "sort" de la pièce. Sur la (figure 2.16) une présentation du processus général de ce Contrôle.[21]

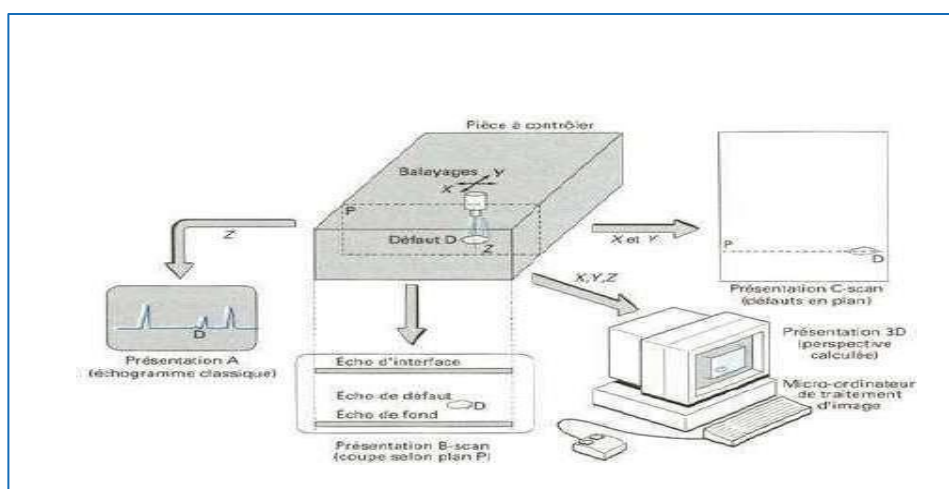


Figure II.6. Présentation du contrôle par ultrasons.

### II.2.3.5 Les appareils de contrôles ultrasonores

Les appareils de contrôles ultrasonores sont des matériels électroniques qui sont conçus pour détecter la présence d'une source de son ultrasonore c'est-à-dire, un son dont la fréquence est supérieure à 20 kHz. Le contrôle aux ultrasons s'effectue le plus souvent avec un palpeur à incidence normale ou un palpeur à incidence oblique.

- A. **Les palpeurs à incidence normale:** ils émettent des ondes longitudinales avec une direction de propagation normale à la surface (figure II.7).



Figure II.7 ; Structure d'un palpeur pour ondes longitudinales.

**B. Les palpeurs d'angle :** ils émettent des ondes transversales dont la direction de propagation est inclinée par rapport à la normale de la surface. Pour l'excitation de ce type d'onde, on utilise le fait qu'une onde longitudinale, créée dans le palpeur, se divise en une onde transversale et une onde longitudinale lors de la réfraction à l'interface entre le palpeur et la pièce (figure II.8). [22]



Figure II.8 Structure d'un palpeur pour ondes transversales.

### II.2.3.6 L'inspection ultrasonore intégrée dans un Programme de maintenance

#### Conditionnelle

Le contrôle ultrasonore constitue une première ligne de défense contre les arrêts de production non planifiés, cette technique est utilisée dans plusieurs domaines par exemple:

### II.2.3.7 Monitoring de vibration acoustique

Le monitoring de vibration acoustique est l'opération qui consiste à suivre le niveau Ultrasonore d'un équipement et de le comparer avec celui que l'on a obtenu sur le même équipement lors des inspections précédentes, ou en le comparant avec celui que l'on obtient généralement sur un équipement similaire montre un exemple de suivi du niveau ultrasonore sur un moteur. Le monitoring de vibration nous renseigne sur les intervalles de lubrification et permet de prédire les pannes mécaniques.



Figure II.9 schéma de Contrôle ultrasonique d'un moteur.

### II.2.3.8 Contrôle des purgeurs de vapeur

Un purgeur de vapeur est une vanne automatique qui s'ouvre pour éliminer les condensats, l'air et le dioxyde de carbone présents dans les canalisations avec la vapeur. Pour l'inspection par ultrasons, on écoute le bruit du purgeur à l'aide du détecteur d'ultrasons et on vérifie si le cycle est continu ou pas. Limites Du contrôle ultrasonore.



Figure II.10 Contrôle ultrasonique d'un moteur

### II.2.3.9 Contrôle de graissage:

La quantité de graisse nécessaire au bon fonctionnement d'un roulement doit occuper un volume égal à environ 20 à 30% du volume libre interne de celui-ci.

Cette élévation de température peut à son tour engendrer des modifications de certaines propriétés telles que la résistance à l'oxydation et cela conduit à la diminution de la qualité de la graisse.

L'opération de graissage peut être assistée par un contrôleur ultrasonique avec une sonde.

On « écoute » le bruit émis par le roulement au fur et à mesure du graissage ; le niveau sonore diminue régulièrement jusqu'à un seuil, qui correspond à la valeur optimale de graissage.

Une règle est couramment utilisée : une élévation du niveau sonore de 10 dB $\mu$ V par rapport à la normale indique un manque de graisse. En pratique, le son produit par un roulement en bon état est caractérisé par un Ronronnement régulier, plaisant et constant. Le surplus de graisse provoque une augmentation de la température, la consistance de la graisse baisse, et il peut se produire des fuites au niveau des étanchéités.



Figure II.11 Graissage d'un roulement Par US.

### II.2.3.10 Inspections électriques

Le contrôle ultrasonore permet de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.). On peut ainsi surveiller un grand nombre d'équipements transformateur isolâtes disjoncteurs.

L'effet corona, aussi appelé « effet couronne » est une décharge électrique entraînée par l'ionisation de l'air séparant deux électrodes portées à un haut potentiel lorsque celui-ci dépasse une valeur critique. Les micros amorçages générés par les effets corona engendrent des détériorations sur les isolants, de sérieuses avaries, des arrêts de production [23].

### II.2.3.11 La détection de fuites

Le principe de la détection de fuite réside dans le fait que la différence de pression entre l'intérieur de la conduite du réseau et le milieu extérieur se traduit par une turbulence, soit une agitation désordonnée des molécules dans le milieu extérieur.

Cette turbulence entraîne une augmentation de la température, et des mouvements et Chocs moléculaire générant des ultrasons qui ont la particularité d'être très directif. La mesure consiste à mesurer l'activité des molécules. Le principe de la détection de fuite s'applique aussi bien sur les réseaux sous pression que les réseaux sous vide.



**FigureII.13 Détection des fuites par US.**

### II.2.3.12 Contrôle d'étanchéité

Le contrôle d'étanchéité est en fait un cas particulier de la détection de fuite. En effet, si la cuve est sous pression, un défaut d'étanchéité sera détecté de la manière qu'une simple fuite d'air comprimé (figure II.14).

Si celle-ci n'est pas sous pression, la détection de fuite sera réalisée à l'aide d'un artifice : un émetteur d'ultrasons. En le plaçant à l'intérieur de l'engin à contrôler, celui-ci générera des ultrasons. S'il ya un défaut d'étanchéité, les ultrasons générés seront mesurables à l'extérieur de la zone étanche et seront détecté comme une fuite classique. Les ultrasons artificiels sont caractérisés par un bruit caractéristique facilement différenciable des ultrasons naturels [24].



Figure II.14 Contrôle d'étanchéité par US

#### II.2.4 Analyse d'huile

L'analyse d'huile en tant qu'instrument de maintenance industrielle commence à être appliquée dans des secteurs précis de l'industrie dès les années 50 du siècle dernier. Elle est peu à peu adoptée un peu partout comme méthode pour détecter des pannes précoces sur des équipements complexes comme les turbines à gaz.

Actuellement, le développement d'équipements de laboratoire ou l'innovation dans les pratiques de maintenance ont placé l'analyse d'huile parmi les méthodes incontournables dans de nombreux secteurs industriels, grâce aux bénéfices qu'elle apporte.

Un bon programme de maintenance fondé sur l'analyse d'huile permet de déterminer la condition de l'équipement, mais aussi l'état même de l'huile utilisée, puisqu'il détecte la contamination et la dégradation de l'huile elle-même, avant que ces circonstances provoquent la panne de l'équipement.

De cette manière, et grâce à un programme de maintenance bien géré, les entreprises peuvent éviter les coûts que cela entraîne pour les pièces de rechange, le changement d'huile avant son heure et

bien sûr les arrêts non programmés qui génèrent des problèmes plus importants pour l'entreprise. Lubrification Management recommande d'analyser l'huile lubrifiante pour conserver les équipements dans des conditions optimales de rendement.

#### II.2.4.1 Effets de la pollution de l'huile.

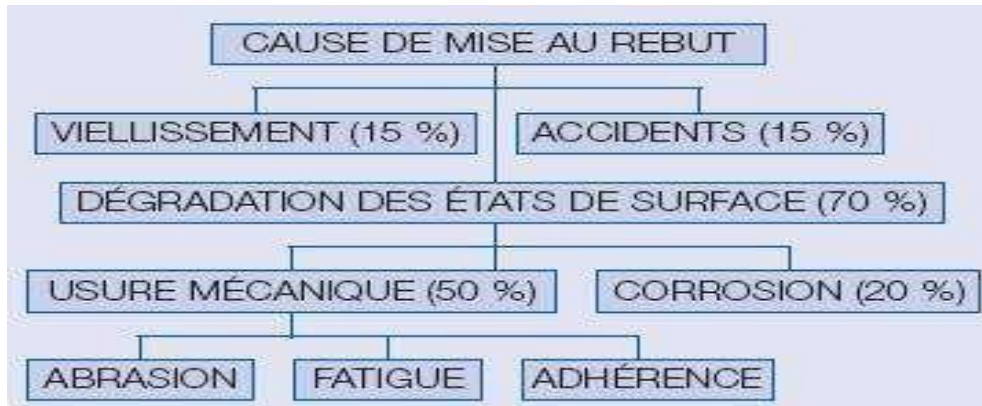


Figure II.15. Les effets de pollution.

#### II.2.4.2 Sources de pollution de l'huile

##### Pollution de fabrication :

- Piston, fluide, moteurs hydrauliques.
- Tuyauteries et flexible, pompes.
- Réservoirs, vannes, etc....

#### II.2.4.3. Pollution générée par l'usure Mécanique: Intégration en fonctionnement.

- Phases de rodage.
- Dégradation du fluid

##### Pollution ingérée (atmosphérique) :

- Mouvements d'huile dans le réservoir.
- Joints de tiges de vérin.
- Joints d'arbres.
- Joints de composants.

##### Pollution de maintenance :

- Montage/démontage des composants.
- Remplacement de flexibles.
- Pleins et appoints d'huile.

#### II.2.4.4 Influence de la pollution de l'huile sur le fonctionnement.

Usures prématurées, colmatage, abrasion etc ....

composants	Détails	Jeux
Vannes	Servo	1-4um
	Proportionnel	1-6um
	Directionnel	2-8um
Pompes à piston a cylindré variable	Piston en chemise	5-40um
	Piston en butée	0.5-5um
Pompes à palettes	Palettes- corps de pompe (radiale)	0.5-1um 5-13um
	Palettes- corps de pompe (latérale)	
Pompes à engrenages	Dont de pignon- corps de pompe	0.5-5 um
	Pignon- flasque	0.5-5 um
Roulements à bille	Epaisseur de film	0.1-0.7um
Roulements à rouleaux	Epaisseur de film	0.4-1um
Palies lisses	Epaisseur de film	0.5-125um
Joints	Joints arbre d'entraînement	0.05-0.5um

**Tableau II.1 : Différentes épaisseurs de pollution d'huile.**

#### II.2.4.5 Objectifs visés par l'analyse de l'huile

L'objectif sera de déceler les principales anomalies afin de donner au Responsable de Maintenance des informations précises sur l'état de la machine, et cela en recherchant dans le lubrifiant :

- Tous les phénomènes de pollution.
- Tous les phénomènes de contamination.
- L'ensemble des métaux provenant de l'usure.
- Le type d'usure.
- Pour les moteurs : l'étude de la qualité de la combustion.
- Dans certains cas et notamment lorsque les vidanges sont espacées, l'état du lubrifiant.

[25].

#### II.2.4.6 Impacts économiques

- Etat de santé des machines.
- Visualisation de l'évolution des analyses par comparaison des résultats obtenus entre chaque analyse.

- Minimisation du temps d'arrêt des pièces maîtresses d'une machine.
- La minimisation des coûts de réparation grâce à des programmes de maintenance.
- L'optimisation des espacements de vidange grâce au suivi de la qualité du lubrifiant [26].

#### II.2.4.7 Les techniques d'analyse des huiles:

D'une manière générale, tous les mécanismes lubrifiés, à la condition que le graissage ne se fasse à fond perdu, sont susceptibles d'être surveillés dans leur fonctionnement par analyse de leur lubrifiant en service. Les résultats permettent de déceler des anomalies caractéristiques telles que :

- La contamination par des particules internes à l'équipement
- L'évolution par comparaison des résultats obtenus à chaque analyse
- Le type d'usure
- La pollution par des agents extérieurs

### II.3 Les lois de la FMD

#### II.3.1 Loi exponentielle $exp(\lambda)$

Une loi exponentielle de paramètre  $\lambda > 0$  modélise la durée de vie d'un élément sans mémoire, ou sans vieillissement (le fait que l'élément ait duré pendant t unité de temps ne change rien à son espérance de vie à partir du temps t). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à l'apparition d'une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances.

##### Fonction de répartition :

Avec :  $x \geq 0$ .

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

(Error! No text of specified style in document..1)

##### Fonction de densité :

Avec :  $x \geq 0$ .

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

(Error! No text of specified style in document..2)

##### Fiabilité :

$$R(x) = e^{-\lambda x}$$

(Error! No text of specified style in document..3)

Avec :  $x \geq 0$ .

**Taux de défaillance :**

Avec :  $\lambda$  constant.

$$\lambda(x) = \lambda$$

(Error! No text of specified style in document..4)

### II.3.2

**Loi**

#### Gamma $G(\alpha, \beta)$

La loi Gamma est définie par un paramètre de forme  $\alpha > 0$  et un paramètre d'échelle  $\beta > 0$ . Elle est utilisée pour modéliser le temps de défaillance d'un élément. [27].

**Fonction de densité :**

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x}{\beta}} x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

(Error! No text of specified style in document..5)

$$D = \max_{x \in \mathbb{R}} |F(x) - F_0(x)|$$

Avec  $x \geq 0$ .

**Taux de défaillance :**

$$\lambda(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)}}{\beta^\alpha \int_x^\infty \Gamma(\alpha) f(t) dt}$$

(Error! No text of specified style in document..6)

Avec  $x \geq 0$ ;

$$\Gamma(\alpha) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

(Error! No text of specified style in document..6)

style in  
document..7)

La fonction de répartition de la loi gamma n'a pas d'expression explicite, ce qui est de même pour la fiabilité.

$$\text{Si } X \rightarrow G(\alpha = 1, \beta = 1/\lambda) \text{ alors } X \rightarrow \exp(\lambda).$$

### II.3.3 Loi log-normale $\text{Log}\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$

Une variable aléatoire continue et positive est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue.

**Fonction de densité :**

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \geq 0.$$

(Error! No  
text of  
specified  
style in  
document..8)

**Fiabilité :**

Avec  $x \geq 0$ ;

$$R(x) = 1 - \Phi\left(\frac{(\ln(x) - \mu)}{\sigma}\right)$$

(Error! No  
text of  
specified  
style in  
document..9)

Où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

### II.3.4 Loi de Weibull $\mathcal{W}(\beta, \alpha)$

La loi de Weibull est définie par un paramètre de forme  $\beta > 0$  et un paramètre d'échelle  $\alpha > 0$ . Elle est souvent utilisée en mécanique pour caractériser le comportement d'un élément dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme  $\beta$  : période de jeunesse ( $\beta < 1$ ), période de vie utile ( $\beta = 1$ ) et période d'usure ou vieillissement ( $\beta > 1$ ).

\* Fonction de répartition :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad x \geq 0.$$

(Error! No  
text of  
specified style  
in  
document..10)

\* Fonction de densité et fiabilité :

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0.$$

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0.$$

(Error! No text of specified style in document..11) specified style in document..12)

\* Taux de défaillance :

$$\lambda(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

(Error! No text of specified style in document..13)

Avec  $\geq 0$ .

Si  $X \rightarrow W (\beta = 1, \alpha)$  alors  $X \rightarrow \exp(\lambda = 1/\alpha)$ .

### II.4 Les tests d'ajustement

Ces tests ont pour but de vérifier qu'une variable aléatoire, dont on possède un n-échantillon indépendant, suit bien une loi données (au moins dans sa forme, sinon dans ses paramètres). Il s'agit d'un test portant sur la validité d'un modèle aléatoire. Il a pour but de légitimer le choix du modèle théorique [28].

On test :

$$H_0 \text{ "Fest la loi de X" contre } H_1 \text{ "F n'est pas la loi de X"}$$

### II.5 Tests Kolmogorov-Smirnov

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de X de fonction de répartition F.

On cherche à tester l'ajustement de la loi de X par une loi théorique fixé  $F_0$

C'est-à-dire :

$$H_0 \text{ "F = F}_0\text{" contre } H_1 \text{ "F} \neq F_0\text{"}$$

- **Principe du test**

Le test de K.S [12] implique le calcul de :

- Fonction de répartition empirique de l'échantillon c'est-à-dire :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{X_j < x} = \frac{\text{nombre d'observation } < x}{\text{taille de l'échantillon}}$$

(Error! No text of specified style in document..14)

- Calculer le plus grand écart entre la distribution empirique  $F(x)$  et la distribution théorique  $F_0(x)$  c'est-à-dire :

$$D = \max_{x \in \mathbb{R}} |F(x) - F_0(x)|$$

(Error! No text of specified style in document..15)

- On fixe

un seuil de signification  $\alpha$  et on compare cet écart  $D$  à des valeurs critiques particulières qu'on note  $d(n, \alpha)$  obtenus à partir de la table de kolmogrov-smirnov. la décision sera :

$$\begin{cases} \text{On accepte } H_0 & \text{si } D < d_{(n, \alpha)} \\ \text{On rejette } H_0 & \text{sinon} \end{cases}$$

### II.6 Tests Khi-Deux

Posé par Karl Pearson en 1900, le test  $\chi^2$  est sûrement le test le plus répandu pour tester l'adéquation d'une loi, continue ou discrète, à des données.

Le problème qui se pose est de savoir si les écarts entre la distribution observée et la loi théorique peuvent être jugés faible [29].

- **Principe du test**

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de  $X$  de fonction de répartition  $F$ . C'est-à-dire :

On cherche à tester l'ajustement de la loi de  $X$  par une loi théorique fixé  $F_0$ . C'est-à-dire :

$$H_0 : F = F_0 \text{ contre } H_1 : F \neq F_0$$

- **Construction du test**

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de  $X$  de fonction de répartition  $F$ . On partage le domaine de  $X$  en  $r$  intervalles  $I_1, I_2, \dots, I_r$ . Soit  $n_i$  l'effectif de la classe  $I_i$ .

On note  $p_i$  la probabilité théorique liée à la classe  $I_i$ . Le test est basé sur la statistique (sous l'hypothèse  $H_0$ ) :

$$K_n^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

(Error! No text of specified style in document..16)

- **Règle de décision**

Remarque :

Si  $K_n^2$  est très petit, c'est que la distribution théorique est Proche de la distribution empirique. Alors qu'au contraire, si  $K_n^2$  est grand, l'écart entre les deux distributions est important, par conséquent :

- Si  $K_n^2 > \chi_{(r-1-q, \alpha)}^2$  on rejette  $H_0$ .
- Si  $K_n^2 < \chi_{(r-1-q, \alpha)}^2$  on rejette pas  $H_0$ .

Donc :

L'ajustement est validé.

q : étant le nombre de paramètre estimés.

Mais pour effectuer le test de Khi-deux il faut vérifier certaines conditions :

- Le nombre de classe  $r \geq 7$ .
- L'effectif théorique  $np_i \geq 8$ .
- Avoir dans la mesure du possible des classes d'effectifs théoriques comparables.

## II.7. Conclusion

La maintenance conditionnelle constitue une avancée significative dans la gestion des équipements industriels. En se fondant sur la surveillance en temps réel de l'état réel des machines, elle permet de planifier les interventions de manière optimale, d'anticiper les défaillances et de réduire les coûts liés à l'exploitation et à l'immobilisation des installations. Contrairement aux approches classiques, elle offre une meilleure maîtrise du cycle de vie des équipements, tout en améliorant la disponibilité et la fiabilité des systèmes de production.

L'intégration de l'analyse Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité (FMD) renforce cette démarche en apportant un cadre rigoureux pour l'évaluation des performances techniques. Grâce aux indicateurs FMD et aux lois de calcul associées, il devient possible de quantifier les risques de défaillance, d'estimer les durées d'indisponibilité, et de mesurer l'efficacité des opérations de maintenance. Ces données constituent une base précieuse pour orienter les choix stratégiques en matière de gestion des actifs.

Ainsi, la synergie entre la maintenance conditionnelle et l'analyse FMD représente une réponse pertinente et efficace aux exigences croissantes de performance, de sécurité et de rentabilité dans l'industrie contemporaine. Elle s'inscrit pleinement dans la logique de transformation numérique des entreprises industrielles, et ouvre la voie à des systèmes de maintenance de plus en plus intelligents, autonomes et adaptatifs.

# Chapitre III

**Chapitre III : présentation de l'Entreprise « Algal+ »**

**III.1 Une brève introduction de l'extrusion en aluminium**

Extrusion d'aluminium a été appliquée à bien des égards innovateurs depuis ses débuts il y a plus de 100 ans. De son utilisation précoce dans la création de tubes et fils à des applications futuristes dans la construction de la station spatiale, l'extrusion d'aluminium a une riche histoire. Le procédé d'extrusion a été breveté en 1797 pour la fabrication de tuyaux de plomb, ce qui a été fait avec le travail manuel jusqu'à ce que l'introduction de la presse à commande hydraulique en 1820. A la fin du XIXe siècle, les méthodes d'extrusion ont également été utilisées pour les alliages de cuivre et de laiton, mais l'application de l'extrusion d'aluminium suivi d'un trajet unique.

**III.2 Les origines de l'aluminium**

Il a fallu attendre la fin des années 1880, avec l'invention du procédé de fusion par Hall et Héroult et le développement de la production commerciale, que le métal argenté est devenu abordable pour un usage quotidien. Les processus de travail initiaux consistaient en laminage, du moulage et forgeage.

**III.3 Développement d'aluminium extrudé**

Alexander Dick a inventé le procédé d'extrusion à chaud moderne en 1894, qui était applicable à la plupart des alliages non ferreux. Aujourd'hui, l'aluminium est le métal le plus couramment extrudé, et il peut être utilisé avec les deux procédés d'extrusion à chaud et à froid. Amérique du Nord a sa première presse d'extrusion d'aluminium en 1904 en Pennsylvanie, États-Unis. L'introduction d'extrusion crée une forte augmentation des applications de pointe pour l'aluminium, en particulier dans la fabrication de pièces automobiles.

La demande croissante pour l'extrusion d'aluminium a atteint de nouveaux sommets au cours des deux guerres mondiales pour une utilisation dans la fabrication d'avions et d'autres exigences militaires. Le développement rapide de l'extrusion a continué après la Seconde Guerre mondiale, et a commencé à se développer dans divers secteurs, notamment le secteur du logement résidentiel, qui a connu une croissance importante dans la période d'après-guerre. Au cours des décennies suivantes, les secteurs des transports et de la construction ont toujours été les principaux bienfaiteurs de produits d'extrusion d'aluminium. Même dans les temps présents, la majeure partie de l'utilisation d'extrusion est dans la fabrication de portes et fenêtres, suivi par les véhicules de tourisme. D'autres principaux produits d'extrusion et les applications sont les biens de consommation et la construction de ponts et d'autoroutes.

L'histoire courte d'extrusion d'aluminium, par rapport à d'autres métaux, a connu un développement vaste et la croissance, en train de révolutionner la façon dont nous vivons. Comme de nouveaux objectifs sont découverts dans l'exploration spatiale et ici à la maison, l'extrusion d'aluminium continuera d'être une partie importante de l'avenir

### III.4 Vue d'ensemble de l'usine Algal Plus (+)

#### III.4.1 Bref historique

Fondée en 1985, est aujourd'hui algale + une entreprise bien établie dans le secteur de l'extrusion en Algérie.

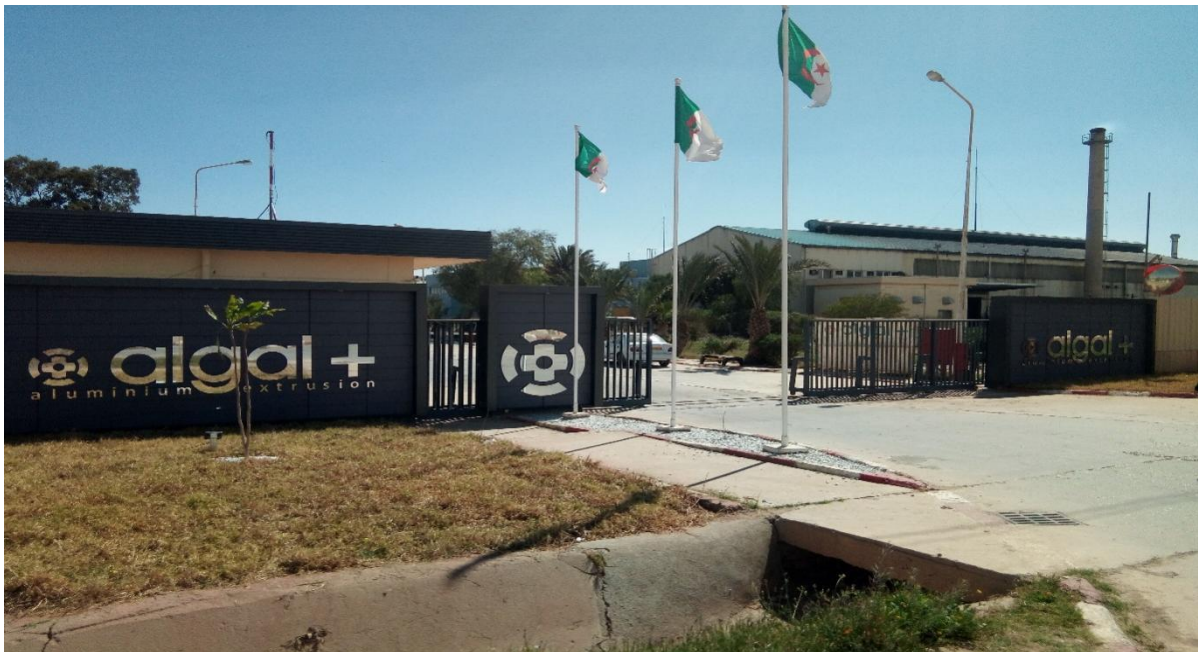
Il a acquis une bonne réputation dans le domaine de l'extrusion, anodisation et laquage de profilés en aluminium pour la construction et l'industrie.

Il est situé à M'sila, à 250 km à l'est d'Alger, à égale distance des ports d'Alger et Bejaia, qui couvrent toute l'Europe en un temps record.

Le complexe croissantes d'aluminium M'sila maintiendra sa position de leader en termes de répondre aux demandes du marché.

En effet, les services publics déjà installés sur une superficie de 123 000 m<sup>2</sup>.

À savoir 630 KVA poste électrique à haute tension, 30 la station électrique de moyenne tension KVA, une station de gaz sont dimensionnés pour accueillir quatre autres presses, en plus des trois presses utilisées



**Figure Error! No text of specified style in document..1. L'interface de l'Entreprise ALGAL+.**

#### III.3.2 Les chiffres relatifs à l'entreprise

- Nombre d'employés 420 environ
- Le capital social: 1'850'000'000 DZD
- Taille de l'entreprise : 15.000 tonnes / an de profilés d'aluminium en alliages

6060/6063

**III.3.3 Chaînes de production**

Avec deux presses installées une capacité de 1600, 2 500 tonnes.

**III.3.4 Certains des concurrents**

Groupe AMR - Setif

Alexo - Bejaïa



Dzal - Oran



Sogema - Alger



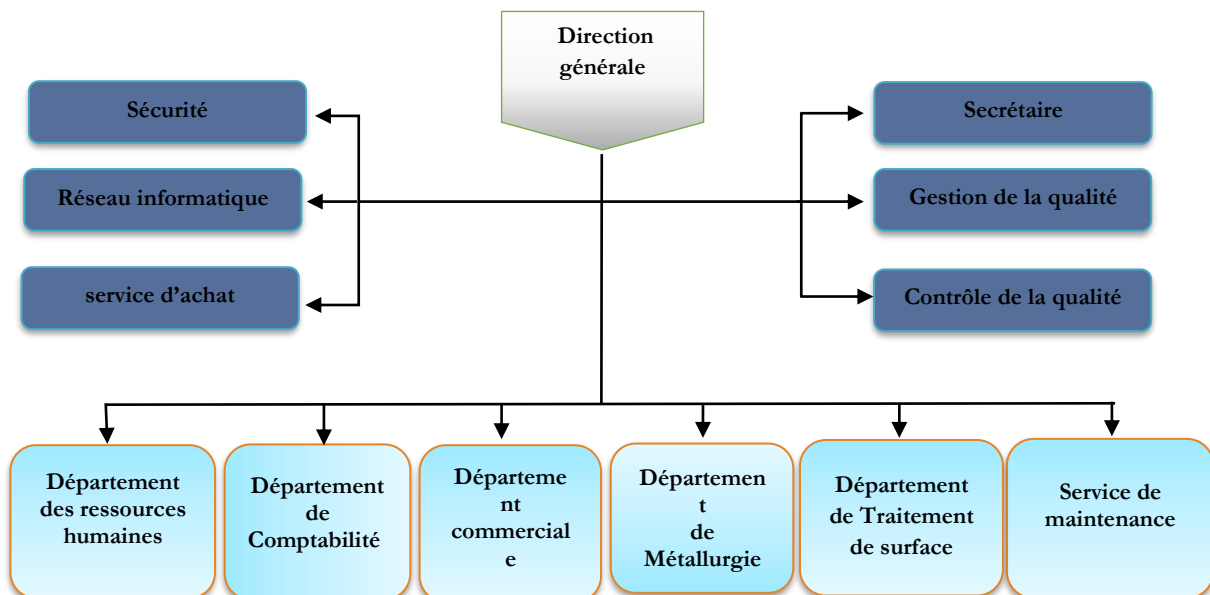
El Wafa- Mil



**III.3.5 Structure organisationnelle de l'entreprise**

Algal Plus, est composé de plusieurs entités fonctionnelles et opérationnelles.

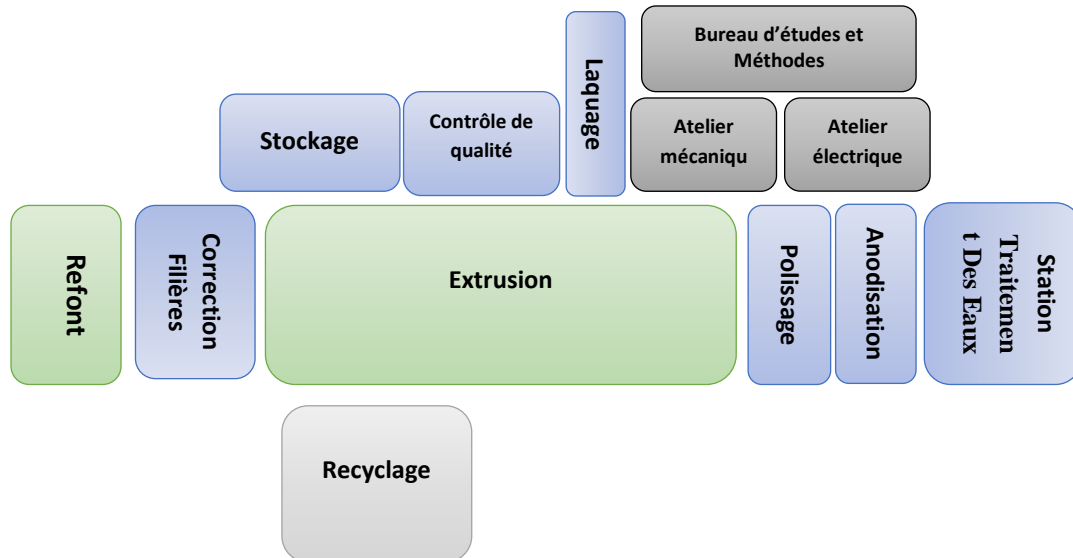
- **7 Divisions :** (Métallurgie, Maintenance, Direction General, Ressource Humaine, Finance, Commercial, Traitement De Surface)
- **17 Centres De Frais :** (Refont, Extrusion, Contrôle De Qualité, Anodisation, Laquage , Emballage, Bureau D'études Et Méthodes, Laboratoire, Recyclage, Mécanique, Électrique , Traitement Des Eaux, Faux Bois, Sécurité, Informatique, Correction Filières.[7])



**Figure Error! No text of specified style in document..2. La structure organisationnelle de l'entreprise.**

### III.3.6 Les unités d'entreprise

**Répartition géographique des différentes unités :** Le tableau suivant illustre la répartition géographique des différentes unités.



**Figure Error! No text of specified style in document..3. Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise.**

#### Extrusion

Avec deux presses installées et une troisième en cours d'installation, d'une puissance de 1.600, 2.500 tonnes, la capacité installée annuellement dépassera les 15.000 tonnes de profiles aluminium par an. [13]



**Figure Error! No text of specified style in document..4. Unité d'extrusion.**

#### Correction de filières

Le matériau de base pour les filières est un acier de haute qualité, et le processus d'usinage est exigeant et demande un savoir-faire et une précision élevée. Outils sont assistés dans leur travail par des équipements commandés par ordinateur (CAM).

Un filage d'essai est effectué avec une matrice ainsi fabriquée. Les déformations des profils sont corrigées par une dernière rectification, cette étape est un travail manuel de précision qui exige une grande expérience dont disposent les correcteurs d'ALGAL+. [13]



**Figure Error! No text of specified style in document..5. L'opération de correction de filières.**

### **Anodisation**

Une installation d'anodisation et de coloration répondant aux exigences les plus strictes du marché. Ces installations permettent d'exécuter toutes les couleurs. En combinant la transformation mécanique de la texture de l'aluminium et la transparence de la couche d'anodisation on obtient des aspects spéciaux et originaux. [13]



**Figure Error! No text of specified style in document..6. L'opération d'Anodisation.**

**Laquage**

L'innovation constante dans le domaine des poudres de thermo laquage permet de répondre aux demandes esthétiques et techniques le plus en plus exigeantes. Aux nuanciers traditionnels s'ajoutent de nouveaux aspects satines, mats, métallises, graines, sables, givres, décors bois et dérivés. Les limites techniques sont repoussées par de nouvelles technologies tel que les poudres encore plus résistantes aux U.V[13].

**III.3.7 Département de maintenance**

Service d'entretien est le cœur de l'entreprise, car elle contribue à faire revivre les différents systèmes et faire face à un divers problème pour maintenir le système sur la statue de veille.

**III.4. Bureau de études et méthode**

Le Bureau des études et des méthodes est une division responsable des tâches suivantes :

- Discuter de tous les plans et les problèmes et proposer des solutions.
- Administration d'intervention.
- La réalisation des rapports d'état des systèmes.
- Étude fichiers de recrutements.

**III.5 Atelier mécanique**

Un atelier de mécanique dirigé par un ingénieur mécanicien qui a commandé et son équipage pour réparer et gérer tous les problèmes d'équipement mécanique qui a été endommagé pendant la production

**III.6 Atelier électrique**

Atelier électrique dirigé par un ingénieur électricien qui a commandé et son équipe pour réparer et gérer tous les problèmes sera d'équipement électrique qui a été endommagé pendant la production.

# Chapitre IV

**Application de FMD sur le système choisi**

#### IV. L'analyse statistique de la FMD

Le choix d'un système électromécanique à analyser ne se fait pas au hasard : il repose sur l'évaluation de son rôle stratégique et de son importance au sein de la chaîne de production. Les équipements les plus critiques sont généralement ceux dont la défaillance peut entraîner des arrêts prolongés, une baisse de qualité, ou des pertes économiques significatives. Il est donc essentiel de sélectionner un système dont la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité influencent directement la performance globale de l'unité industrielle.

Afin d'évaluer le niveau de sûreté de fonctionnement d'un tel système, à travers les indicateurs de Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité (FMD), il est nécessaire d'avoir accès à son historique de pannes. Ces données permettent de quantifier les dysfonctionnements, de déterminer la fréquence des arrêts, la durée des interventions de maintenance, et de détecter les composants les plus critiques.

Dans le cadre de ce mémoire, notre choix s'est porté sur le four à billettes 250 L, un équipement central dans le processus de production de l'entreprise Algal+. Ce four joue un rôle crucial dans la transformation thermique des matières premières et conditionne la qualité des produits finis. En raison de son importance stratégique, toute défaillance au niveau de ce système pourrait impacter lourdement la chaîne de production, tant sur le plan technique qu'économique. L'étude de sa maintenance conditionnelle et de ses performances à travers l'analyse FMD est donc pleinement justifiée dans une démarche d'optimisation industrielle.

##### IV.1. Historique de pannes du four a billettes 250L

Le tableau suivant résume l'historique de pannes de four a billettes 250l d'ALGAL+, M'sila depuis Octobre 2023 jusqu'à Avril 2025.

N°	Type de panne	Date de début de panne	Date de fin de panne	Temps d'arrêt (h)
1	Reglage de poussoir billette de FB2500 TN EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L PTR / Petits travaux	10/10/2023	10/10/2023	1.67
2	reparation de thermocouple de la zone trois EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L ZONE DE RECHAUFFAGE PTR / Petits travaux	14/10/2023	14/10/2023	3.32
3	changement de vanne motorisé de la zone 2 EXTRUSION FOUR A	15/10/2023	15/10/2023	2.67

	BILLETES 250L ZONE DE RECHAUFFAGE PTR / Petits travaux			
4	Reglage de frein de moteur de convoyeur a chaine de four	16/10/2023	16/10/2023	2.08
5	changement de la vanne motorisé de la zone deux et allumage de ruleur	17/10/2023	17/10/2023	1.92
6	reparation de porte de four et reglage de fin de course EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L PTR / Petits travaux	08/02/2024	08/02/2024	4.24
7	paration de convoyeur a chaine de four EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L MOTEUR CONVOIYEUR A CHAINES DE FOUR PTR / Petits travaux	09/02/2024	09/02/2024	2.75
8	Installation de variateur de vitesse a fin d'evité les déclenchements V1000 type VZA42P2BAA - 2,2 KW	04/03/2024	04/03/2024	3.83
9	Réparationde chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	04/02/2025	04/02/2025	4
10	demontage de couvert de four et vidage de four des billette EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L MOTEUR CONVOIYEUR A CHAINES DE FOUR PTR / Petits travaux	05/02/2025	05/02/2025	3.75

<b>11</b>	Retirez-les et remplacez-les en les soudant	06/02/2025	06/02/2025	9.17
<b>12</b>	onter le moteur EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L VENTILATEUR DE CIRCULATION D`AIR CHAUD N°1 DEP / Déplacements	12/02/2025	12/02/2025	4
<b>13</b>	réparation et soudage le convoyour a chaine	13/02/2025	13/02/2025	4.75
<b>14</b>	reparation de thermocouple de la zone une. EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L ZONE DE RECHAUFFAGE PTR / Petits travaux.	01/03/2025	01/03/2025	1.08
<b>15</b>	réglage photo celleul porte four a biellet avec réarmi variateur convoyour a chain et controlé température four	03/03/2025	03/03/2025	1.58
<b>16</b>	nstallation d`une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	07/03/2025	07/03/2025	4.5
<b>17</b>	INSTALLATIONLES ELEMENT AVEC LE SEUDER	13/03/2025	13/03/2025	5
<b>18</b>	travaille pour coupé billetes sur cisaille	15/03/2025	15/03/2025	3
<b>19</b>	Chargement	16/03/2025	16/03/2025	2
<b>20</b>	transporteur abillette 25000	25/03/2025	25/03/2025	0.33
<b>21</b>	la chaines est cassee` four 25000	26/03/2025	26/03/2025	2.5

22	es excite l arret d urgence d armoire de conteneur EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	02/04/2025	02/04/2025	1.83
23	firifkasiu de fereeu	03/04/2025	03/04/2025	3
24	Installation d`une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	06/04/2025	06/04/2025	5.5
25	Installation d`une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	07/04/2025	07/04/2025	5.67
26	Installation d`une nouvelle chaîne Installation d`une nouvelle chaîne pour le four d`extrusion 2500	08/04/2025	08/04/2025	6.33
27	Installation d`une nouvelle chaîne pour le four d`extrusion 2500 8 499 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	09/04/2025	09/04/2025	5
28	Nettoyage du four de la machine d`extrusion2500 EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	14/04/2025	14/04/2025	0.5
29	changement et modification le ventilateur de refroidisseur de unité hydraulique 8 606 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L PTR / Petits travaux	16/04/2025	16/04/2025	5

**Tableau IV. 1. Historique de pannes de la FOUR A BILLETES 250 L**

## IV.2. L'analyse FMD

### IV.2.1. La fiabilité

Pour présenter graphiquement la fonction de fiabilité, on utilisera un logiciel de simulation qui s'appelle **Fiab-Optim**.

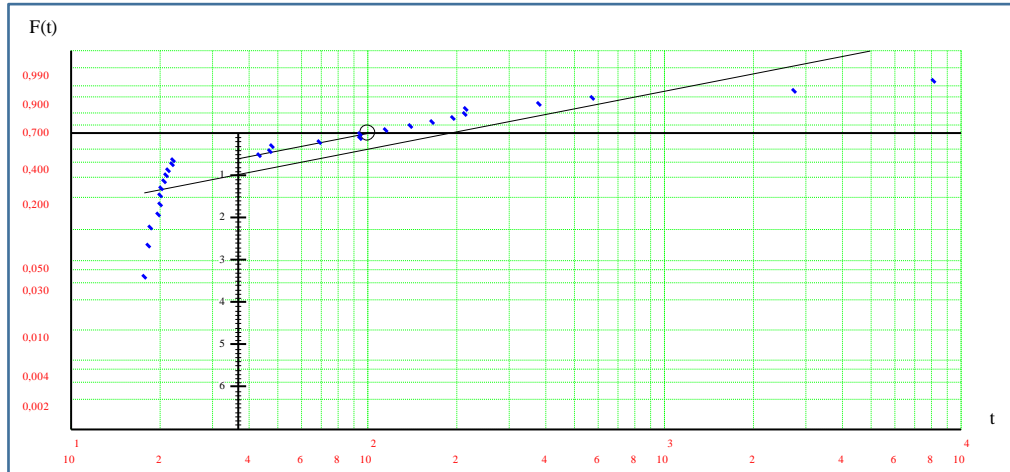
**Fiab-Optim** permet d'ajuster automatiquement les distributions aux données échantillon et de sélectionner le meilleur modèle en secondes. Il est conçu de façon à rendre l'analyse des données aussi facile que possible, laissant en coulisse les détails techniques compliqués et vous permettant ainsi de vous concentrer sur les objectifs de vos affaires.

Les résultats de simulation sont présentés par le Tableau III.2 suivant :

<b>Rangs</b>	<b>TBF</b>	<b>F(i)</b>
1	17.67	0.03448275
2	18.33	0.06896551
3	18.5	0.10344827
4	19.76	0.13793103
5	20	0.17241379
6	20	0.20689655
7	20.25	0.24137931
8	20.68	0.27586206
9	21	0.31034482
10	21.33	0.34482758
11	21.92	0.37931034
12	22.17	0.41379310
13	43	0.44827586
14	46.92	0.48275862
15	47.5	0.51724137
16	69	0.55172413
17	94.33	0.58620689
18	94.42	0.62068965
19	115	0.65517241
20	139.5	0.68965517
21	165.5	0.72413793
22	194.83	0.75862068
23	213.67	0.79310344
24	214	0.82758620

25	379.25	0.86206896
26	573.25	0.89655172
27	2734.08	0.93103448
28	8084.17	0.96551724

**Tableau IV.2. Estimation de la fonction de répartition**



**Figure IV.1. Papier fonctionnel de Weibull**

La figure IV .1montre la maintenabilité en fonction des temps de réparation (TTR), on remarque d’après cette figure que la maintenabilité augmente avec l’augmentation du temps de réparation (TTR). Les paramètres de papier de Weibull sont illustrés par le tableau suivant:

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Beta( $\beta$ )	<b>0.58816909</b>
Eta( $\eta$ )	<b>185.39161</b>
Gamma( $\gamma$ )	<b>0</b>
MTBF	<b>286.41546</b>

**Tableau IV.3. Les paramètres de calcul de fiabilité**

Nous utiliserons le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV pour vérifier le modèle de calcul qui est accepté pour calculer les différentes fonctions (la fiabilité, la densité de probabilité et le taux de défaillance).

#### **IV .2.1.1. Test KOMOGOROV – SMIRNOV**

L'idée du test est de comparer la fonction réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique. Il consiste à mesurer l'écart point par point entre ces deux fonctions:

$$D_{ni} = | F(\mathbf{t}_i) -F(\mathbf{t}) | \dots\dots\dots (IV.01)$$

Où:

F (ti) est la fonction de répartition réelle ; elle peut être obtenue par la méthode des rangs moyens:

$$F(ti) = \frac{\sum ni}{n+1} \dots\dots\dots (IV.02)$$

F(t) est la fonction de répartition théorique donné par l'équation suivante:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(IV.03)$$

On montre que :

$$D_n = | \text{Max} | F(ti) - F(t) | \dots\dots\dots(IV.04)$$

Suit une loi ne dépendant que de η et on écrit que:

$$P(\text{Max} | F(ti) - F(t) | (D_n, \alpha) = 1 - \alpha \dots\dots(IV.05)$$

La valeur de Dn,α est donnée par le tableau de KOMOGOROV SMIRNOV.

Les résultats de comparaison entre les deux fonctions de réparation sont présentés dans le tableau suivant :

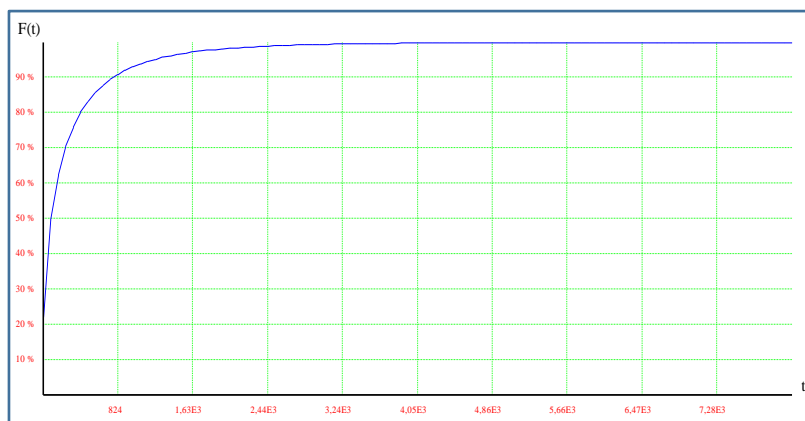
<b>Rangs</b>	<b>TBF</b>	<b>F(ti)réelle</b>	<b>F(t)théoriques</b>	<b>Dni</b>
1	17.67	0.03448275	0.22192898	0.18744623
2	18.33	0.06896551	0.22617431	0.15720880
3	18.5	0.10344827	0.22725384	0.12380557
4	19.76	0.13793103	0.23508587	0.09715484
5	20	0.17241379	0.23654524	0.06413145
6	20	0.20689655	0.23654524	0.02964869
7	20.25	0.24137931	0.23805483	0.00332448
8	20.68	0.27586206	0.24062658	0.03523548
9	21	0.31034482	0.24252060	0.06782422
10	21.33	0.34482758	0.24445650	0.10037108
11	21.92	0.37931034	0.24787504	0.13143530
12	22.17	0.41379310	0.24930750	0.16448560
13	43	0.44827586	0.34517334	0.10310252
14	46.92	0.48275862	0.35960969	0.12314893
15	47.5	0.51724137	0.36167619	0.15556518
16	69	0.55172413	0.42830917	0.12341496

17	94.33	0.58620689	0.48934404	0.09686285
18	94.42	0.62068965	0.48953655	0.13115310
19	115	0.65517241	0.53004768	0.12512473
20	139.5	0.68965517	0.57085645	0.11879872
21	165.5	0.72413793	0.60758006	0.11655787
22	194.83	0.75862068	0.64286357	0.11575711
23	213.67	0.79310344	0.66280130	0.13030214
24	214	0.82758620	0.66313401	0.16445219
25	379.25	0.86206896	0.78203803	0.08003093
26	573.25	0.89655172	0.85664923	0.03990249
27	2734.08	0.93103448	0.99231602	0.06128154
28	8084.17	0.96551724	0.99990011	0.03438287

**Tableau IV.4. La comparaison entre la fonction de répartition réelle et la fonction de répartition théorique**

Le tableau. IV.4 montre que  $D_{\max} = 0.18744623$  et d'après le tableau de KOMOGOROV – SMIRNOV  $D_{n,\alpha} = D_{1,0.05} = 0.97500$ , on remarque que  $D_{\max} < D_{n,\alpha}$  cela implique que le modèle de Weibull est accepté pour calculer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

La figure ci-dessous illustre la fonction de répartition en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF) :



**Figure. IV.2. Fonction de répartition F(t).**

La figure IV.2 illustre la fonction de répartition F(t) en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF). On observe d'après cette figure que la fonction de répartition augmente avec l'augmentation du temps de bon de fonctionnement (TBF).

#### IV.2.1.2. Calculs de la fiabilité, de la densité probabilité et du temps de défaillance

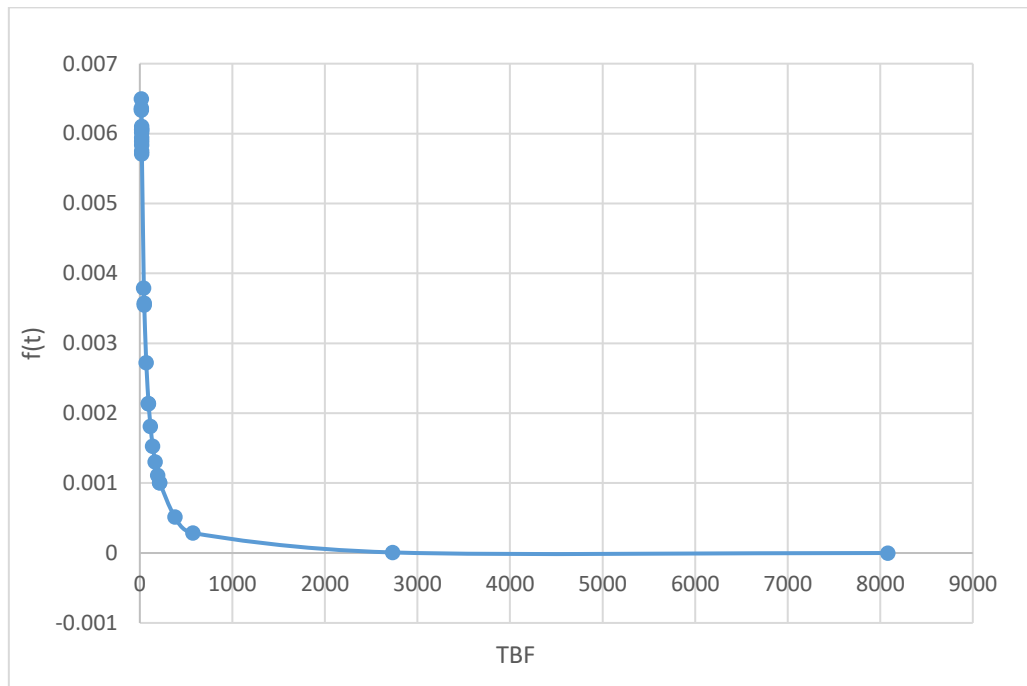
Le tableau III .5 est résumé les calculs de fiabilité, de densité de probabilité et du temps de Défaillance :

<b>TBF</b>	<b>R(t)</b>	<b>f(t)</b>	<b><math>\lambda(t)</math></b>
17.67	0.77807102	0.00649906	0.00835278
18.33	0.77382569	0.00636671	0.00822758
18.5	0.77274616	0.00633602	0.00819936
19.76	0.76491413	0.00610168	0.00797695
20	0.76345476	0.00605983	0.00793738
20	0.76345476	0.00605983	0.00793738
20.25	0.76194517	0.00601699	0.00789688
20.68	0.75937342	0.00594501	0.00782884
21	0.75747940	0.00589280	0.00777949
21.33	0.75554350	0.00584012	0.00772969
21.92	0.75212496	0.00574873	0.00764332
22.17	0.75069250	0.00571105	0.00760771
43	0.65482666	0.00379223	0.00579120
46.92	0.64039031	0.00357775	0.00558682
47.5	0.63832381	0.00354821	0.00555863
69	0.57169083	0.00272488	0.00476636
94.33	0.51065596	0.00213987	0.00419044
94.42	0.51046345	0.00213823	0.00418880
115	0.46995232	0.00181499	0.00386209
139.5	0.42914355	0.00153067	0.00356681

165.5	0.39241994	0.00130456	0.00332439
194.83	0.35713643	0.00111011	0.00310836
213.67	0.33719870	0.00100904	0.00299241
214	0.33686599	0.00100740	0.00299051
379.25	0.21796197	0.00051497	0.00236266
573.25	0.14335077	0.00028570	0.00199301
2734.08	0.00768398	0.00000805	0.00104736
8084.17	0.00009989	0.00000007	0.00067019

**Tableau IV.5. Calculs de la fiabilité, du temps de défaillance et de la densité de probabilité.**

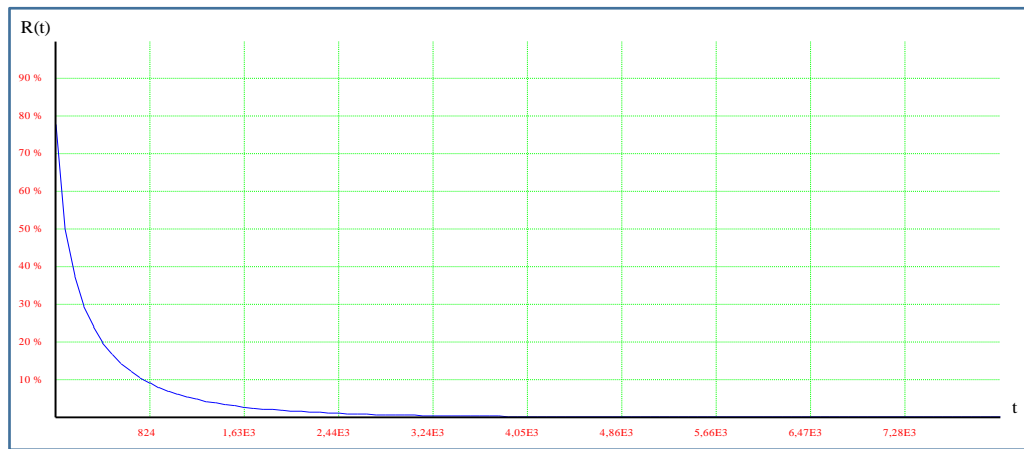
Les présentations graphiques de la fiabilité, de la densité de probabilité et du taux de défaillance sont présentés par les trois figures suivantes:



**Figure.IV.3 la densité de probabilité  $f(t)$**

La Figure IV.3 illustre la courbe de la densité de probabilité  $f(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF). Cette représentation graphique permet de visualiser la probabilité qu'une défaillance survienne à un instant précis, après un certain temps de fonctionnement sans panne. Elle constitue un outil fondamental dans l'analyse de la fiabilité, car elle permet d'identifier les périodes où le risque de défaillance est le plus élevé. Plus la densité de probabilité est concentrée autour d'une

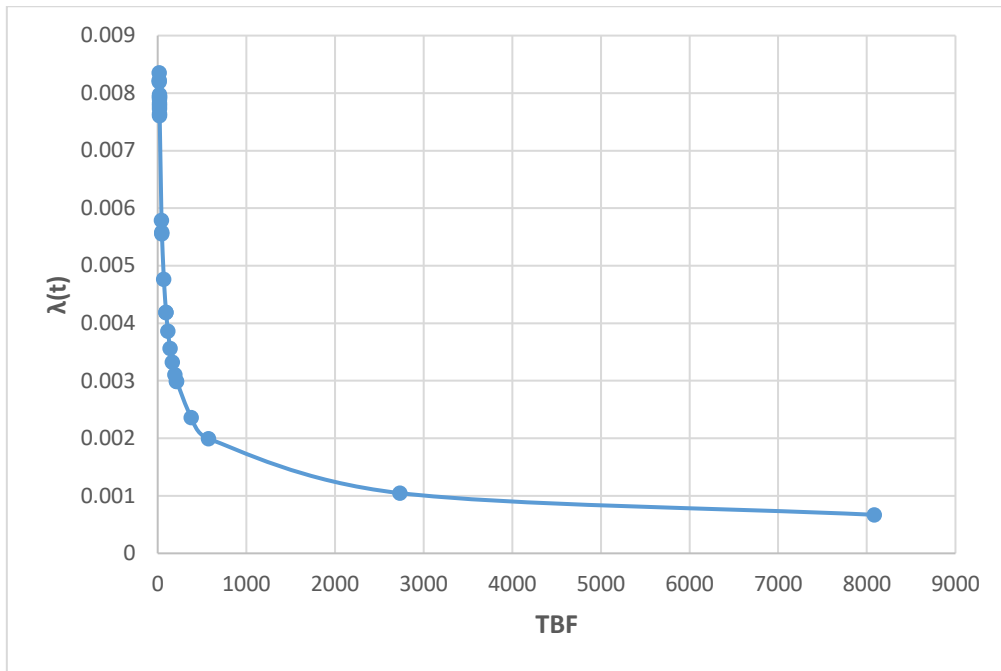
valeur particulière de TBF, plus cela indique une régularité ou une prévisibilité du comportement du système. Cette information est essentielle pour ajuster les stratégies de maintenance préventive et optimiser les intervalles d'inspection ou de remplacement.



**Figure.IV.4. La fonction de fiabilité R(t)**

La Figure IV.4 présente l'évolution de la fonction de fiabilité  $R(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF). Cette fonction exprime la probabilité qu'un système ou un composant fonctionne sans défaillance jusqu'à un instant donné  $t$ . Comme le montre clairement la courbe, la fiabilité décroît progressivement avec le temps. Ce comportement est typique des systèmes soumis à l'usure, aux contraintes d'exploitation ou à des conditions environnementales dégradantes.

Plus le temps passe, plus la probabilité de bon fonctionnement diminue, ce qui reflète l'augmentation du risque de défaillance. Cette information est cruciale pour la planification de la maintenance préventive, car elle permet de déterminer les périodes critiques où l'intervention devient nécessaire afin d'éviter des arrêts imprévus.



**Figure.IV.5 Taux de défaillance  $\lambda(t)$**

La Figure IV.5 illustre l'évolution du taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF). Cette fonction représente la probabilité conditionnelle qu'une défaillance survienne à l'instant  $t$ , sachant que le système a fonctionné sans interruption jusqu'à ce moment. Autrement dit, elle mesure l'intensité du risque de défaillance au cours du temps.

L'analyse de cette courbe permet de mieux comprendre le comportement dynamique du système étudié. Par exemple, un taux de défaillance constant au cours du temps indique un comportement aléatoire (modèle exponentiel), souvent associé à des pannes soudaines et imprévisibles. En revanche, un taux de défaillance croissant traduit une dégradation progressive des composants due à l'usure ou au vieillissement, ce qui est typique de la phase de fin de vie du système. À l'inverse, un taux de défaillance décroissant peut refléter une phase de rodage ou de stabilisation après l'installation initiale.

Cette information est fondamentale pour orienter les choix en matière de stratégies de maintenance. En identifiant les périodes critiques où le taux de défaillance augmente, il devient possible de planifier des interventions préventives ciblées, réduisant ainsi les risques d'arrêts imprévus et optimisant la disponibilité des équipements.

**IV.2.1.3. Calcul de R (MTBF) :**

Pour la moyenne des temps de bon fonctionnement  $MTBF = 286.4$  h, la fiabilité est de :

$$R(MTBF) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{MTBF - t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(IV.06)$$

$$R(MTBF) = 0.27484635$$

**IV .2.1.4. Calcul de F(MTBF) :**

$$F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(IV.07)$$

$$F(MTBF) = 0.72515365$$

**IV.2.1.5. La densité de défaillance f(MTBF) :**

La densité de défaillance correspondante à la moyenne du temps de bon fonctionnement est :

$$f(MTBF) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots(IV.08)$$

$$f(MTBF) = F(MTBF) * R(MTBF) = 0.19930583$$

**IV.2.1.6. Calcul de λ(MTBF) :**

$$\lambda(MTBF) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots(IV.09)$$

$$\lambda(MTBF) = 0.00265225$$

**IV.2.2. La maintenabilité**

La maintenabilité en fonction du taux de réparation est donnée par la formule suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \dots\dots\dots(IV.10)$$

La moyenne du temps de réparation exprimée par :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} \dots\dots\dots(IV.11)$$

TTR : temps de réparation. Et N : nombre de panne.

$$MTTR = 3.48172414h$$

Le taux de réparation est exprimé comme suit :

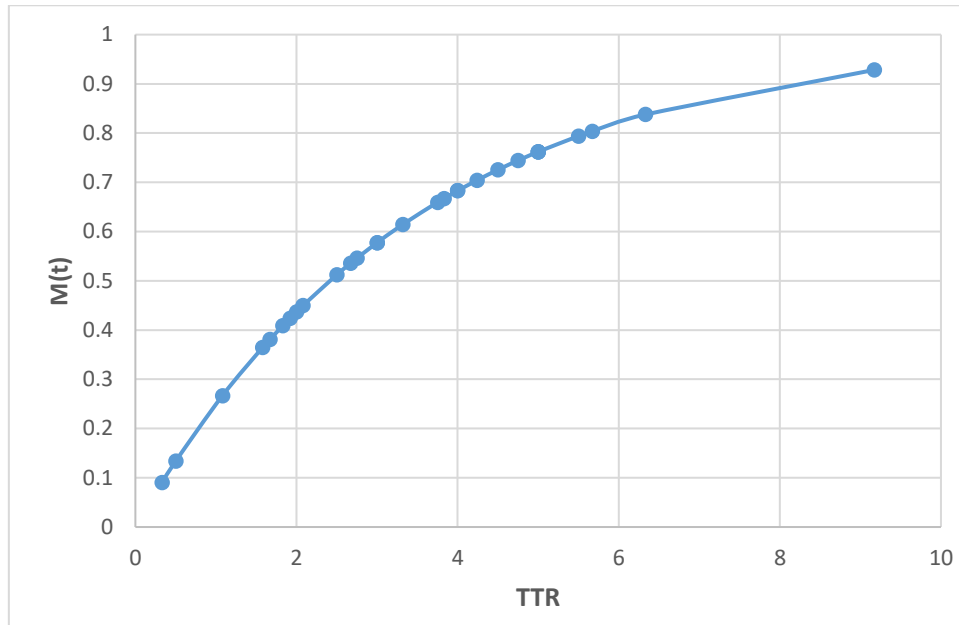
$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0.28721402 \text{ interventions / h} \dots\dots(IV.12)$$

Rang	TTR	M(t)
1	0.33	0.09042755
2	0.5	0.13377190
3	1.08	0.26669322
4	1.58	0.36478906
5	1.67	0.38099839

6	1.83	0.40880044
7	1.92	0.42388669
8	2	0.43697319
9	2.08	0.44976243
10	2.5	0.51229036
11	2.67	0.53553145
12	2.75	0.54608192
13	3	0.57753220
14	3	0.57753220
15	3.32	0.61462968
16	3.75	0.65940206
17	3.83	0.66713880
18	4	0.68300081
19	4	0.68300081
20	4.24	0.70411589
21	4.5	0.72540639
22	4.75	0.74443195
23	5	0.76213930
24	5	0.76213930
25	5	0.76213930
26	5.5	0.79395838
27	5.67	0.80377699
28	6.33	0.83766038
29	9.17	0.92819151

**Tableau IV.6. Calcul de la maintenabilité**

La figure suivante illustre la courbe de la fonction de maintenabilité :



**Figure IV.6. Courbe de la fonction de maintenabilité**

La Figure IV.6 représente la fonction de maintenabilité en fonction du temps de réparation (TTR). Cette fonction exprime la probabilité qu'un système ou un équipement soit réparé dans un temps inférieur ou égal à une durée donnée  $t$ . En d'autres termes, elle permet d'évaluer la facilité et la rapidité avec lesquelles une installation peut être remise en état de fonctionnement après une défaillance.

Comme l'indique la courbe, on observe une augmentation progressive de la maintenabilité avec l'accroissement du TTR. Ce comportement est attendu, car plus le temps de réparation alloué est long, plus la probabilité de terminer la réparation dans ce délai augmente. Cette tendance reflète également l'efficacité des procédures de maintenance et l'accessibilité des composants.

L'analyse de cette fonction permet ainsi de mesurer la capacité du système à retrouver un état opérationnel dans des délais acceptables. Elle constitue un outil précieux pour dimensionner les ressources de maintenance, planifier les interventions, et réduire les durées d'indisponibilité des équipements. Une bonne maintenabilité se traduit par des temps de réparation courts et une courbe qui atteint rapidement une valeur proche de 1, signe d'une remise en service rapide et fiable.

L'étude de cette fonction, couplée à celle de la fiabilité et du taux de défaillance, permet de construire une vision complète de la performance technique d'un système industriel et d'orienter efficacement les stratégies de maintenance préventive ou corrective.

#### **IV .2.3.2 Disponibilité instantané**

La disponibilité instantanée exprimée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation, elle est donnée par la relation suivante :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \dots\dots\dots (IV.13)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \dots\dots\dots (IV.14)$$

$$\mu = \frac{1}{MTBR} \dots\dots\dots (IV.15)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{286.41546} = 0.00349143$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{3.48172414} = 0.28721402$$

$$\mu + \lambda = 0.29070545$$

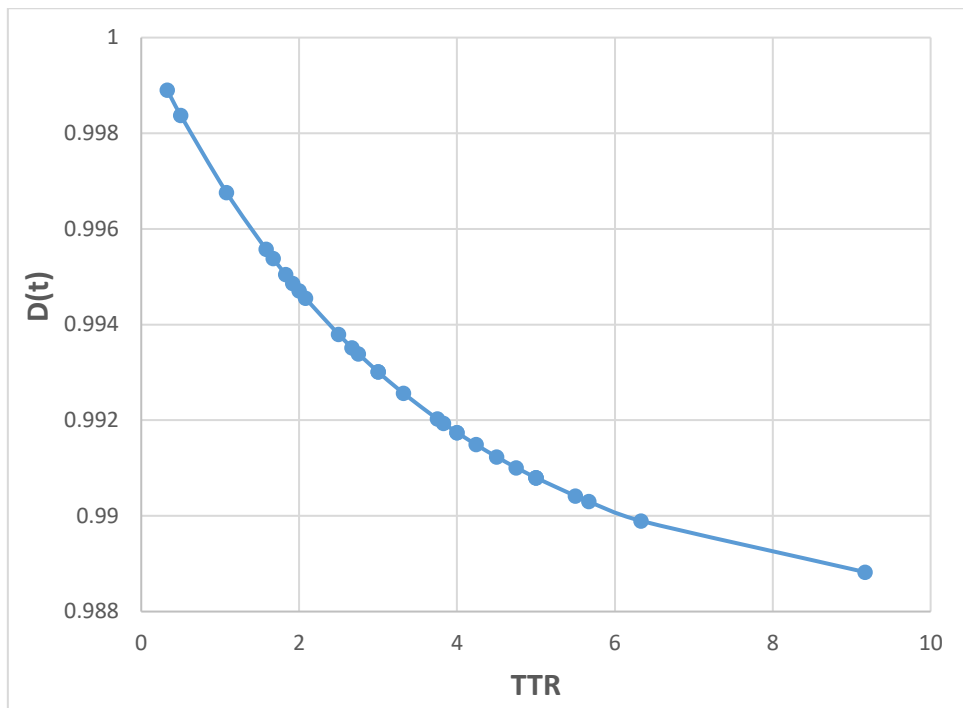
Le tableau suivant présente les valeurs de la disponibilité du système en fonction des différents temps de bon fonctionnement (TBF). En reliant les TBF (temps de bon fonctionnement) aux TTR (temps de réparation), ce tableau permet d'évaluer dans quelle mesure les arrêts dus à des défaillances sont compensés par l'efficacité des actions de maintenance. Plus le TBF est élevé par rapport au TTR, plus la disponibilité du système est importante, ce qui indique une bonne performance globale et une faible probabilité d'indisponibilité.

Rang	TTR	D(t)
1	0.33	0.99890137
2	0.5	0.99837523
3	1.08	0.99676381
4	1.58	0.99557642
5	1.67	0.99538091
6	1.83	0.99504500
7	1.92	0.99486281
8	2	0.99470481
9	2.08	0.99455045
10	2.5	0.99379639

11	2.67	0.99351640
12	2.75	0.99338935
13	3	0.99301086
14	3	0.99301086
15	3.32	0.99256484
16	3.75	0.99202724
17	3.83	0.99193443
18	4	0.99174422
19	4	0.99174422
20	4.24	0.99149121
21	4.5	0.99123632
22	4.75	0.99100874
23	5	0.99079712
24	5	0.99079712
25	5	0.99079712
26	5.5	0.99041734
27	5.67	0.99030028
28	6.33	0.98989692
29	9.17	0.98882506

**Tableau IV.7. Tableau de disponibilité instantané**

La figure suivante illustre la courbe de la disponibilité :



**Figure IV.7. La Courbe de disponibilité instantanée**

La Figure IV.7 illustre l'évolution de la disponibilité intrinsèque du système en fonction du temps de réparation (TTR). Cette disponibilité, dite « intrinsèque », est calculée en considérant uniquement les temps de bon fonctionnement (TBF) et les temps de réparation (TTR), sans tenir compte des autres facteurs extérieurs tels que les délais logistiques ou administratifs. Elle constitue ainsi une mesure représentative de la performance technique propre au système et à son environnement de maintenance immédiat.

Comme le montre la courbe, on observe une diminution progressive de la disponibilité intrinsèque à mesure que le temps de réparation augmente. Ce comportement est logique, car un allongement du TTR réduit la proportion de temps pendant lequel l'équipement est disponible pour fonctionner. Autrement dit, plus la durée des réparations est longue, plus le système reste indisponible, ce qui impacte négativement sa performance globale.

Cette analyse met en évidence l'importance de réduire les temps d'intervention en maintenance pour améliorer la disponibilité des installations. Elle souligne également la nécessité d'une organisation efficace de la maintenance, impliquant une bonne préparation des interventions, la disponibilité des pièces de rechange, la qualification du personnel technique, ainsi que l'utilisation d'outils de diagnostic rapide.

### **IV.3. L'application des méthodes d'analyse**

#### **IV.3.1. La méthode de la courbe ABC**

Pour appliquer efficacement la méthode ABC à l'analyse des pannes du groupe électropompe, il est nécessaire de suivre une démarche structurée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, il convient de classer les différents types de pannes observées, par ordre décroissant de fréquence d'occurrence ou d'impact (selon le critère retenu : nombre d'arrêts, durée d'indisponibilité, coût, etc.). Cette étape permet d'identifier les pannes les plus critiques du système.

Ensuite, il faut calculer le cumul du nombre de pannes et déterminer le pourcentage cumulé pour chacune d'elles, afin de mettre en évidence leur poids relatif dans l'ensemble des défaillances recensées. Cela permet de distinguer les pannes majeures (classe A), les pannes secondaires (classe B) et les pannes mineures (classe C), selon le principe de Pareto (80/20), selon lequel une minorité de causes est souvent responsable de la majorité des effets.

Dans un second temps, il est également indispensable de calculer le cumul et le pourcentage de la fréquence de chaque type de panne, ce qui permet de renforcer la pertinence de la classification ABC. Ce double classement (par fréquence et par impact cumulé) constitue un outil puissant d'aide à la décision pour prioriser les actions de maintenance correctives ou préventives.

Le tableau suivant illustre cette démarche en présentant de manière synthétique l'ensemble des calculs effectués, avec les colonnes correspondantes : type de panne, nombre d'occurrences, fréquence relative, cumul, pourcentage cumulatif, et classement ABC.

N°	Types des pannes	Temps de pannes	Fréquence	Cumul de T-p	Cumul de fréquence	Cumul NT,P (%)	Cumul de fréquence %
1	Installation d'une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	15.67	3	15.67	3	15.51	10.34
2	Retirez-les et remplacez-les en les soudant	9.17	1	24.84	4	24.60	13.79
3	Installation d'une nouvelle chaîne Installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500	6.33	1	31.17	5	30.87	17.24
4	Changement et modification le ventilateur de refroidisseur de unité hydraulique 8 606 83 F401 EXTRUSION	5	1	36.17	6	35.82	20.68

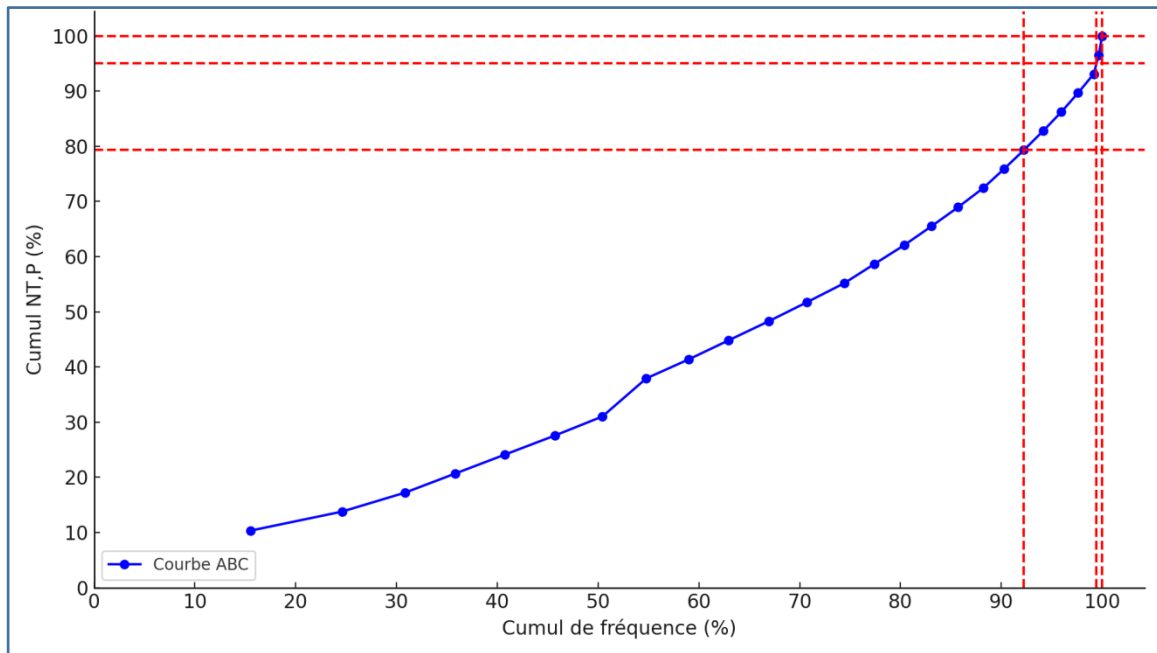
	FOUR A BILLETES 250L PTR / Petits travaux						
5	Installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500 8 499 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	5	1	41.17	7	40.77	24.13
6	Installation des éléments avec le Sauder	5	1	46.17	8	45.72	27.58
7	Réparation et soudage le convoyeur a chaîne	4.75	1	50.92	9	50.43	31.03
8	Réparation de thermocouple de la zone une. extrusion four a billetes 250l zone de rechauffage ptr / petits travaux.	4.4	2	55.32	11	54.78	37.93
9	Reparation de porte de four et reglage de fin de course extrusion four a billetes 250l ptr / petits travaux	4.24	1	59.56	12	58.98	41.37
10	Noter le moteur extrusion four a billetes 250l ventilateur de circulation d'air chaud n°1 dep / déplacements	4	1	63.56	13	62.94	44.82
11	Réparation de chaîne extrusion four a billetes 250L DEP / Déplacements	4	1	67.56	14	66.91	48.27

12	Installation de variateur de vitesse afin d'éviter les déclenchements V1000 type VZA42P2BAA - 2,2 KW	3.83	1	71.39	15	70.70	51.72
13	Démontage de couvert de four et vidage de four des billette extrusion four a billettes 250l moteur convoyeur a chaines de four ptr / petits travaux	3.75	1	75.14	16	74.41	55.17
14	Firifkasiu de fereui	3	1	78.14	17	77.38	58.62
15	Travaille pour couper billettes sur cisaille	3	1	81.14	18	80.36	62.06
16	Réparation de convoyeur a chaine de four extrusion four a billettes 250l moteur convoiyeur a chaines de four ptr / petits travaux	2.75	1	83.89	19	83.08	65.51
17	Changement de vanne motorisé de la zone 2 extrusion four a billettes 250l zone de rechauffage ptr / petits travaux	2.67	1	86.56	20	85.72	68.96
18	La chaines est cassée`four 25000	2.5	1	89.06	21	88.20	72.41
19	Reglage de frein de moteur de convoyeur a chaine de four	2.08	1	91.14	22	90.26	75.86
20	Chargement	2	1	93.14	23	92.24	79.31
21	Changement de la vanne motorisé de la zone deux et allumage de rouleur	1.92	1	95.06	24	94.14	82.75
	Excite l'arrêt d'urgence d armoire de conteneur						

22	EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	1.83	1	96.89	25	95.95	86.20
23	Reglage de poussoir billette de FB2500 TN EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L PTR / Petits travaux	1.67	1	98.56	26	97.61	89.65
24	Réglage photo celleul porte four a biellet avec réarmi variateur convayour a chain et controlé température four	1.58	1	100.14	27	99.17	93.10
25	Nettoyage du four de la machine d'extrusion2500 EXTRUSION FOUR A BILLETES 250L DEP / Déplacements	0.5	1	100.64	28	99.67	96.55
26	Transporteur abillette 25000	0.33	1	100.97	29	100	100

**Tableau IV .8. L'analyse ABC**

La Figure IV.8 présente la représentation graphique de la courbe ABC, illustrant la relation entre le pourcentage cumulé des heures de panne et le pourcentage cumulé de la fréquence des pannes. Cette courbe permet de visualiser l'application du principe de Pareto à l'analyse des défaillances, en mettant en évidence qu'une part relativement faible des types de pannes est responsable d'une proportion élevée du temps total d'indisponibilité. Elle constitue ainsi un outil essentiel pour prioriser les actions de maintenance en ciblant les pannes les plus critiques.



**Figure IV .8. La Courbe d'ABC**

D'après cette figure, on observe que la courbe ABC contient trois zones d'où :

**Zone "A":** les 79.31 % des heures de panne représentent 92% de fréquence de panne, cette zone contient les éléments les plus tombent en panne : (Installation d'une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L DEP / Déplacements , Retirez-les et remplacez-les en les soudant , Installation d'une nouvelle chaîne Installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500 , changement et modification le ventilateur de refroidisseur de unité hydraulique 8 606 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L PTR / Petits travaux , installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500 8 499 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L DEP / Déplacements , INSTALLATIONLES ELEMENT AVEC LE SEUDER)

**Zone "B":** les 15.69% des heures de panne représentent 98% de fréquence de panne.

**Zone "C":** les 5% des heures de panne représentent 2% de fréquence de panne.

#### **IV.4. Proposition des solutions**

D'après les résultats obtenus, on voit que la fiabilité de (Installation d'une nouvelle chaîne EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L DEP / Déplacements , Retirez-les et remplacez-les en les soudant , Installation d'une nouvelle chaîne Installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500 , changement et modification le ventilateur de refroidisseur de unité hydraulique 8 606 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L PTR / Petits travaux , installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500 8 499 83 F401 EXTRUSION FOUR A BILLETTES 250L DEP / Déplacements , INSTALLATIONLES ELEMENT AVEC LE SEUDER) est plus réduite

qui égale 45.72 % et d'après la courbe ABC, on remarque que les éléments précédents sont importants ; on propose Pour remédier aux différentes pannes mentionnées, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Concernant l'installation d'une nouvelle chaîne pour le four à billettes 250L DEP, il est essentiel de vérifier la compatibilité de la chaîne avec le système existant, de procéder à un test de fonctionnement initial avant le démarrage complet, de former le personnel à une utilisation sécurisée et de mettre en place un programme de maintenance préventive. Pour les pièces à retirer et à remplacer par soudage, il est recommandé d'utiliser des équipements et matériaux de soudage de qualité, de respecter strictement les règles de sécurité, de vérifier la qualité des soudures par des essais non destructifs, et de surveiller la pièce lors de la mise en service. Lors de l'installation d'une nouvelle chaîne pour le four d'extrusion 2500, il faut consulter les recommandations du fabricant, installer soigneusement la chaîne, effectuer des essais en mode ralenti et documenter toute l'opération. En ce qui concerne le changement et la modification du ventilateur du refroidisseur de l'unité hydraulique, il est important de sélectionner un ventilateur performant, de s'assurer de la propreté et de la bonne fixation du système de refroidissement, de tester le bon fonctionnement après modification, et d'installer des capteurs de température pour un meilleur suivi. Enfin, pour l'installation des éléments avec le soudeur, il convient de calibrer correctement l'équipement, de former les opérateurs, de faire un test sur une pièce non critique, et de choisir un matériau de soudure compatible avec les métaux à assembler.

#### **I.V.4.1. Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle vise à renforcer la disponibilité et la fiabilité de la machine FOUR A BILLETES 250L, tout en réduisant les arrêts imprévus et en minimisant les coûts liés à la maintenance. Cette approche repose sur une surveillance continue de l'état de la machine, permettant d'intervenir uniquement en fonction des données concrètes collectées sur le terrain.

Contrairement à la maintenance corrective, cette stratégie permet de détecter les anomalies avant qu'elles ne causent une panne, en observant régulièrement les indicateurs de fonctionnement de la machine. Ainsi, elle permet d'éviter Les interruptions coûteuses de production, lesquelles peuvent représenter jusqu'à deux tiers des coûts opérationnels totaux

##### **Systèmes de surveillance et de diagnostic**

Pour assurer l'efficacité de la maintenance conditionnelle, il est essentiel de mettre en place des systèmes avancés de surveillance et de diagnostic capables de repérer les premiers signes de défaillance. Les paramètres suivants seront suivis :

- **Vibrations** : Des capteurs seront utilisés pour détecter les déséquilibres, les roulements usés et autres anomalies mécaniques.

- **Température** : Surveillance des températures des composants critiques tels que les moteurs, les roulements et les systèmes de refroidissement.
- **Bruit** : Utilisation de capteurs acoustiques pour repérer toute variation anormale du niveau sonore, souvent signe d'une défaillance imminente.
- **Lubrification** : Contrôle de la qualité et du niveau des lubrifiants afin de prévenir l'usure prématurée due à un frottement excessif.
- **Courant électrique** : Analyse de la consommation électrique pour identifier d'éventuelles anomalies dans les moteurs ou les circuits électriques.

#### - **Fréquence des inspections et des entretiens**

La fréquence des inspections et des opérations de maintenance sera définie en fonction des données collectées par les systèmes de surveillance. Un programme type pourrait inclure :

- Inspections hebdomadaires : Vérification des niveaux de lubrification, nettoyage des filtres et inspection visuelle des composants externes.
- Inspections mensuelles : Analyse des vibrations, contrôle des connexions électriques et inspection thermique des composants critiques.
- Inspections trimestrielles : Tests complets des systèmes de diagnostic, étalonnage des capteurs, et analyse approfondie des données pour anticiper les dégradations à long terme.
- Interventions conditionnelles : Déclenchées lorsque les valeurs mesurées dépassent les seuils prédéfinis (par exemple, une vibration excessive nécessitera une intervention immédiate).

#### - **Processus de maintenance**

Le processus de maintenance comprend plusieurs étapes clés :

- Collecte des données : Les capteurs enregistrent en continu les données relatives aux paramètres critiques.
- Analyse des données : Des logiciels spécialisés traitent ces données en temps réel pour détecter les écarts par rapport aux normes de fonctionnement.
- Planification des interventions : En fonction des résultats de l'analyse, les actions de maintenance sont programmées avant que les défaillances ne se produisent.
- Rapports et suivi : Chaque intervention est documentée et analysée afin d'optimiser le programme de maintenance et d'ajuster les seuils d'alerte pour les futures interventions.

#### - **Équipe de maintenance**

Une équipe dédiée à la maintenance conditionnelle sera constituée pour garantir la mise en œuvre et le suivi du plan. Elle sera composée de :

- Techniciens de maintenance : Formés aux techniques de diagnostic et de réparation propres à la machine FOUR A BILLETES 250L.

- Ingénieurs fiabilité : Responsables de l'analyse des données, de l'identification des tendances et de la planification des actions préventives.
- Superviseurs de maintenance : Chargés de coordonner les interventions et d'assurer la liaison avec les autres services de l'entreprise.

#### **IV.4.2. Plan de maintenance préventive systématique additionnel**

##### **IV.4.2.1. Objectifs**

Le plan de maintenance préventive systématique additionnel a pour but de renforcer l'efficacité de la stratégie de maintenance en place. Ses principaux objectifs sont les suivants :

- Réduire les arrêts non planifiés en anticipant les défaillances avant qu'elles n'entraînent une interruption du processus de production.
- Allonger la durée de vie des équipements par des interventions régulières et adaptées, limitant l'usure prématurée des composants.
- Renforcer la sécurité du personnel et assurer la conformité réglementaire, en maintenant les installations dans un état optimal de fonctionnement et en respectant les normes en vigueur.
- Compléter les opérations de maintenance préventive déjà existantes en ciblant des éléments critiques ou moins accessibles, souvent négligés dans les cycles standards d'entretien.

##### **IV.4.2.2 Périmètre**

Équipements critiques (ex: pompes, moteurs, compresseurs, armoires électriques, systèmes de sécurité).

Infrastructures souvent négligées dans le plan principal (ex: systèmes d'éclairage, ventilation, canalisations, etc.).

##### **IV.4.2.3 Fréquence d'intervention**

La fréquence d'intervention désigne le rythme régulier ou la périodicité selon laquelle une opération de maintenance est planifiée et exécutée sur un équipement ou un composant spécifique. Dans notre cas, les interventions préventives de four à billettes 250L sont résumées dans le tableau suivant :

<b>Activité</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Responsable</b>
Vérification visuelle des installations secondaires	Mensuelle	Technicien maintenance
Nettoyage des armoires électriques	Trimestrielle	Électricien
Inspection des systèmes de ventilation	Trimestrielle	Technicien HVAC
Contrôle des serrages mécaniques	Semestrielle	Mécanicien
Test de fonctionnement des dispositifs de sécurité	Trimestrielle	Responsable sécurité

Vidange et graissage équipements de secours	Semestrielle	Mécanicien lubrificateur
---	--------------	--------------------------

#### IV.4.2.4. Documents de suivi

Afin d'assurer une traçabilité rigoureuse et une évaluation efficace des opérations de maintenance, plusieurs documents de suivi doivent être mis en place :

- Fiches de maintenance systématique : recensent les opérations à effectuer, leur fréquence, et les points de contrôle.
- Registre des interventions : documente chaque action de maintenance avec les informations suivantes : date, nom de l'intervenant, nature de l'intervention, anomalies constatées et actions correctives appliquées.
- Tableau de bord des indicateurs clés : permet le suivi des performances de la maintenance à travers des indicateurs tels que :
  - Le taux de panne
  - Le MTBF (Mean Time Between Failures) : temps moyen entre deux défaillances
  - Le MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation

#### IV.4.2.5. Moyens nécessaires

Pour garantir la mise en œuvre efficace du plan de maintenance préventive systématique, les moyens suivants doivent être mobilisés :

- Checklists spécifiques par type d'équipement : facilitent l'exécution standardisée des tâches de maintenance.
- Outils de diagnostic avancés, tels que :
  - Caméras thermiques pour la détection de surchauffes,
  - Analyseurs vibratoires pour la surveillance de l'état mécanique.
- Personnel formé et qualifié : apte à identifier les signes avant-coureurs de défaillance et à interpréter les données issues des outils de diagnostic.
- Accès à la documentation technique : schémas, notices des constructeurs, historiques de pannes, etc., indispensables à une maintenance rigoureuse.

#### IV.4.2.6. Plan d'amélioration continue

Pour garantir la pertinence et l'efficacité durable du plan de maintenance, une démarche d'amélioration continue doit être intégrée :

- Évaluation annuelle du plan : analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs fixés (réduction des arrêts, amélioration du taux de disponibilité, etc.).

- Intégration des retours d'expérience (REX) : prise en compte des observations du personnel de maintenance et des anomalies récurrentes.
- Révision des fréquences d'intervention : ajustement basé sur l'évolution du comportement réel des équipements et des défaillances observées.

#### **IV.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons focalisé notre étude sur un système électromécanique stratégique : le four à billettes 250 L. En exploitant son historique de fonctionnement sur une période déterminée, nous avons pu extraire les temps de bon fonctionnement (TBF) et procéder à une analyse statistique approfondie.

À partir de ces données, nous avons établi les fonctions de répartition théorique et empirique, puis appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov afin de valider le modèle probabiliste le plus approprié. Les résultats ont confirmé que la loi de Weibull est la mieux adaptée pour modéliser la fiabilité de ce système, permettant ainsi de calculer la fonction de fiabilité, la densité de probabilité et le taux de défaillance de manière précise.

L'analyse a révélé une fiabilité relativement faible à la moyenne des TBF, avec une valeur de 45,72 %, ce qui met en évidence une dégradation significative des performances du système. Par ailleurs, l'application de la méthode ABC a permis d'identifier que les composants les plus critiques et les plus exposés aux pannes sont également ceux qui occupent une place centrale dans le bon fonctionnement du four.

Face à ce constat, nous avons proposé un ensemble de mesures correctives et préventives visant à réduire la fréquence des défaillances et à améliorer la disponibilité globale de l'équipement.

## Conclusion générale

À l'issue de ce travail, nous avons pu démontrer de manière concrète et argumentée l'impact considérable qu'une stratégie de maintenance conditionnelle, adossée à une analyse approfondie de la Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité (FMD), peut avoir sur la performance globale d'un système industriel. À travers l'étude de cas du four à billettes 250 L de l'entreprise Algal+, nous avons mis en œuvre une démarche rigoureuse et structurée, fondée sur des données terrain, permettant d'élaborer un plan de maintenance préventive optimisé, à la fois réaliste, pertinent et applicable.

L'un des apports majeurs de cette étude réside dans la mise en évidence de l'importance de la surveillance continue des paramètres de fonctionnement. Grâce à cette approche, il devient possible d'anticiper les défaillances potentielles avant qu'elles ne provoquent des arrêts de production coûteux, réduisant ainsi de manière significative les temps d'indisponibilité des équipements. Ce type de maintenance ciblée permet également de rationaliser les ressources, en focalisant les interventions sur les éléments critiques identifiés grâce à l'analyse FMD.

L'approche Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité s'est révélée être un outil d'aide à la décision extrêmement pertinent, en ce qu'elle offre une vision complète des points faibles du système et permet de hiérarchiser les priorités d'action. En adoptant cette méthodologie, les responsables de maintenance peuvent orienter leurs efforts avec une meilleure efficacité, ce qui se traduit par une amélioration mesurable de la performance technique et économique des équipements.

Ce mémoire illustre, par ailleurs, la nécessité d'une évolution des pratiques de maintenance dans les industries modernes. En effet, dans un environnement de plus en plus concurrentiel, où la réduction des coûts, l'optimisation des ressources et la fiabilité des installations sont devenues des impératifs, la mise en œuvre de solutions de maintenance intelligentes n'est plus une option, mais une exigence stratégique. L'intégration d'outils d'analyse avancés, tels que l'analyse vibratoire, les algorithmes prédictifs ou encore les modèles de simulation, représente une voie prometteuse vers une gestion plus proactive et performante des équipements industriels.

À plus long terme, l'évolution vers des systèmes de maintenance intelligents, s'inscrivant dans la logique de l'Industrie 4.0, permettra d'aller encore plus loin. L'utilisation conjointe de capteurs intelligents, de plateformes de traitement des données en temps réel, d'intelligence artificielle et de jumeaux numériques ouvrira la voie à une maintenance prédictive et autonome,

capable d'auto-diagnostiquer les anomalies, de prévoir les défaillances avec précision et de recommander des actions optimales sans intervention humaine directe.

Ce mémoire montre que la maintenance, trop longtemps considérée comme une fonction secondaire, doit être repositionnée comme un levier stratégique majeur de la compétitivité industrielle. Elle contribue non seulement à améliorer la performance opérationnelle des installations, mais également à renforcer la résilience, la sécurité et la durabilité des systèmes industriels. Ce travail constitue une contribution modeste mais concrète à cette vision, et ouvre la voie à de futures recherches, notamment dans l'intégration de solutions IoT, de big data et d'IA dans les stratégies de maintenance industrielle.

# **Bibliographies**

- [1] **BENNECIB SOFIANE** ( Etude Analytique FMD d'une BANC D'EPREUEVE 500 ) Mémoire DE MASTER Université de Annaba
- [2] **François Monchy, Jean-Pierre Vernier** .Méthodes et organisations. 3e édition, 2010
- [3] NF-EN-13306-X-60-319. Terminologie de la maintenance. Norme AFNOR. 2001
- [4] **Anter Lebidi**, « Développement de la production d'un système électromécanique par une proposition d'une politique de maintenance efficace » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2014
- [5] **NEGADI ALI**, « la maintenance des Equipements de forage (CAS TP127 HASSI MESSAOUD) » Mémoire de master génie mécanique, université ABDOU BEKR BELKAID-TLEMCEN, juin 2014
- [6] **M. KADI**, Etude et amélioration FMD d'une motopompe centrifuge, Mémoire de master professionnel, Université de Ouargla, (2014).
- [7] **Touama Elhadj**, « Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, Juin 2014
- [8] **Asbai Samir**, « Evaluation des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement d'une turbine à gaz » Mémoire de Master en Génie Mécanique, Université de Bejaïa, 2017
- [9] **Jean .B**, « la TPM : un système de production », Technologie (SCEREN - CNDP) – Revue Française de gestion Industrielle, Paris, avril 2008.
- [10] **Ouertani, Amine** "Effets des stratégies de maintenance sur la performance d'une ligne de production avec zones de stockage à capacité finie" Mémoire de l'université du Québec à Trois Rivières, 2010
- [11] **Belouadah Abdenaceur**, « Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2016
- [12] FD X60-000 "Maintenance industrielle - Fonction maintenance" AFNOR, 2002.

- [13] **L. BENALI**. Maintenance Industrielle. Office des Publications Universitaires (OPU) 2006.
- [14] **Touama Elhadj**, « Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production » Mémoire de Master en génie électrique, université de m'sila, Juin 2014.
- [15] **Landolsi Foued**, «Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire».
- [16] **Omar DJEBILI** ; «Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne (2013)
- [17] **Chevalier R**, «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM, (2001).
- [18] **Dominique Pajani et Pierre Bremond**, Thermographie infrarouge appliquée à la maintenance industrielle, 110 pages, Edition broché, 1994.
- [19] **S. Boularand**, Thermographie en maintenance, TSMI, Jean Dupuy- Tarbes, 2014.
- [20] La thermographie infrarouge en maintenance prédictive, energie.wallonie.be. Édition.
- [21] **François Berthelot**, Benoit Dupont, Guide ultrasons multiéléments, Principes et applications pour le contrôle non destructif, 2013
- [22] **J.Perdijon**, Le contrôle non destructif par ultrasons, Hermes 1993
- [23] **Manuel** d'utilisation des produits et guide des services: SDT Ultrasound solutions, SKF, Fluk, Bernstein, Balluff, Baumer, Chauvin Arnaud, Testo, Ht, Flir, mpsmaintenance, VIBREXON, 2018.
- [24] The American Society for Non destructive Testing, Non destructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 7, Ultrasonic Testing (UT), ISBN: 978-1-57117-105-4.
- [25]. **F. MOHAMMED**. Étude de la qualité des huiles lubrifiantes par des méthodes chimiométriques .thèse de master.2017.EST FES.
- [26]. Lubrifiants et produits connexes pour l'automobile. Guide pratique à l'attention des acheteurs publics de lubrifiants et de produits connexes pour véhicule terrestre à moteur thermiques: Collection marchés publics, Edition 2000.
- [27] **G. Zwingelstein**. la Maintenance basée sur la Fiabilité
- [28] Catalogue général des profils mai 2010.

[29] S. Butdee et al. CaseXPert A Process Planning System with Feature Based Neural Network Search Strategy for Aluminum Extrusion Die Manufacturing.2008