

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université A. Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département de Mathématique



**MEMOIRE DE FIN DE CYCLE**

*En vue de l'obtention d'un Master en  
Mathématique*

**Option : Statistique et Analyse Décisionnelle**

*Thème*

**Optimisation de la maintenance**

**Présenté par:**

*M<sup>elle</sup>* Meddour Kenza

*M<sup>elle</sup>* Tamiti Kenza

**Soutenu le 15 JUIN 2015 devant le jury composé de :**

Présidente	M <sup>me</sup> TIMERIDJINE K.	M.C.B	U.A. Mira, Béjaïa
Rapporteur	M <sup>r</sup> BOURAINE M.	M.A.A	U.A. Mira, Béjaïa
Examinatrice	M <sup>me</sup> LAGHA K.	M.C.B	U.A. Mira, Béjaïa

**Promotion 2014 /2015**

---

## *Remerciements*

---

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant qui nous a donné la force et le savoir afin d'accomplir ce travail.*

*Un grand merci pour nos familles, surtout nos parents qui nous ont épaulés, soutenus et suivis tout au long de ce projet.*

*A nos chères amis qui ont toujours été présents et fidèles.*

*A notre encadreur M<sup>r</sup>BOURAINÉ pour son encouragement et son suivi attentif pour la réalisation de ce travail.*

*A l'ensemble du personnel de la Direction de CEVITAL pour le temps qu'ils nous ont consacré durant la collecte des données .*

*Nous tenons aussi à remercier également les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail M<sup>me</sup>TIMERIDJINE K. et M<sup>me</sup>LAGHA K. .*

*Enfin, pour toute personne qui a contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire. Veuillez bien trouver ici l'expression de nos sincères remerciements.*

---

## *Dédicaces*

---

*Ce modeste travail est dédié :*

*A mes chers parents que Dieu les protège tous les deux .*

*A mon frère Idir et mes sœurs : Nadia, Bahia, Wahiba, Houda, Meriem et Magueda.*

*A ma belle sœur sabrina.*

*A mes beaux frères : Fateh, Nesro, Nouba et Abde allah.*

*A mes neveux et nièces : Yanisse, Imene, Ayemene, Rafik, Wassim, Bouchra, Alaâ,  
Abde erraoufe, Ritadje et Razia.*

*A ma chère amie que j'adore Rachida.*

*A ma famille.*

*A mes amis (surtout Lamia )et collègues et tous ceux qui nous ont aidé.*

***kenza.T***

---

## *Dédicaces*

---

*Au nom du tout merveilleux sentiment, je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents qu'une expression ne pourra traduire l'ampleur de mon amour  
et reconnaissances pour eux.*

*A mes soeurs*

*A mon époux*

*A mon binôme et amie Kenza*

*A mes amis et tous ceux qui nous ont aidé.*

*kenza.M*

# Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
<b>1 Notions de base de la fiabilité</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Notions de fiabilité . . . . .	3
1.2.1 Définition du concept de fiabilité . . . . .	3
1.2.2 Défaillance de matériel ou système . . . . .	4
1.2.3 Matériel réparable . . . . .	7
1.2.4 Matériel irréparable (non réparable) . . . . .	8
1.2.5 La maintenabilité . . . . .	8
1.2.6 Disponibilité . . . . .	9
1.3 Indices de fiabilité . . . . .	9
1.3.1 Fonction fiabilité . . . . .	9
1.3.2 Taux de défaillance . . . . .	10
1.3.3 La courbe en baignoire . . . . .	11
1.4 Fiabilité des systèmes . . . . .	11
1.4.1 Configuration série . . . . .	12
1.4.2 Configuration parallèle . . . . .	12
1.4.3 Autres configurations . . . . .	13
1.5 Modèles paramétriques de fiabilité . . . . .	13
1.5.1 La loi exponentielle . . . . .	13
1.5.2 La loi de weibull . . . . .	15
1.6 Analyse de Pareto ou ABC : . . . . .	16

---

<b>2</b>	<b>Sur quelques notions de maintenance</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Généralités sur la fonction maintenance . . . . .	19
2.2.1	Définition de la maintenance . . . . .	19
2.2.2	Rôle et intérêt de la maintenance . . . . .	20
2.2.3	Fonctions d'un service maintenance . . . . .	20
2.3	Politique de maintenance . . . . .	21
2.3.1	Méthode de maintenance . . . . .	21
2.3.2	Les opérations de maintenance . . . . .	24
2.4	Les stratégies de maintenance . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Optimisation de la maintenance</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction . . . . .	28
3.2	Les domaines d'application de l'optimisation de la maintenance . . . . .	28
3.3	Les différentes méthodes d'optimisation de la maintenance . . . . .	29
3.3.1	La méthode de l'industrie aéronautique M.S.G-3 . . . . .	29
3.3.2	La méthode d'optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF) . . . . .	29
3.3.3	Les méthodes " Risk Based " ou " Risk Informed " . . . . .	41
3.3.4	Méthode Total Productive Maintenance (TPM) . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Application</b>	<b>52</b>
4.1	Introduction . . . . .	52
4.2	Les étapes de conditionnement . . . . .	52
4.3	Analyse de Pareto . . . . .	53
4.3.1	Courbe et diagramme de Pareto . . . . .	55
4.3.2	Interprétation de l'analyse de Pareto . . . . .	55
4.4	Traitement statistique des données collectées . . . . .	56
4.4.1	Ajustement des temps d'arrêt par la loi Exponentielle . . . . .	56
4.4.2	Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle . . . . .	63
4.4.3	Indices de fiabilité : . . . . .	74
4.5	Evaluation des coûts de maintenance . . . . .	75
4.6	Calcul des taux de rendement global (TRG) de chaque mois : . . . . .	76
	<b>Conclusion générale</b>	<b>81</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>81</b>

# Table des figures

1.1	Chronogramme d'un équipement réparable. . . . .	7
1.2	Chronogramme d'un équipement irréparable. . . . .	8
1.3	Courbe en baignoire. . . . .	11
1.4	Configuration série. . . . .	12
1.5	Configuration parallèle. . . . .	13
1.6	Densité de probabilité de la loi exponentielle. . . . .	14
1.7	Influence de $\beta$ sur la densité de probabilité et le taux de défaillance. . . . .	15
1.8	Diagramme de Pareto. . . . .	18
2.1	Les diverses options de la maintenance. . . . .	26
3.1	Schéma descriptif pour l'application de l'OMF. . . . .	31
3.2	Les étapes de l'O.M.F. . . . .	33
3.3	Retour d'expérience, processus en boucle. . . . .	36
3.4	Bilan des coûts. . . . .	39
3.5	Taux de Rendement Global. . . . .	50
4.1	Les étapes de conditionnement. . . . .	52
4.2	Courbe de Pareto. . . . .	55
4.3	Diagramme de Pareto. . . . .	55
4.4	Ajustement des temps d'arrêts de la souffleuse par la loi Exponentielle. . . . .	57
4.5	Ajustement des temps d'arrêts du diviseur par la loi Exponentielle du Diviseur . . . . .	58
4.6	Ajustement des temps d'arrêts de la fardeuse par la loi Exponentielle de la fardeuse . . . . .	59
4.7	Ajustement des temps d'arrêts du palettiseur par la loi Exponentielle du palettiseur . . . . .	60
4.8	Ajustement des temps d'arrêts de la remplisseuse par la loi Exponentielle. . . . .	61
4.9	Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle. . . . .	64
4.10	Fonction de fiabilité de la souffleuse. . . . .	65
4.11	Taux de défaillance de la Souffleuse. . . . .	65
4.12	Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle. . . . .	66
4.13	fonction de fiabilité du Diviseur. . . . .	67
4.14	Taux de défaillance du Diviseur. . . . .	67

---

4.15 Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle. . .	68
4.16 Fonction de fiabilité de la Fardeleuse. . . . .	69
4.17 Taux de défaillance de la Fardeleuse. . . . .	69
4.18 Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle. . .	70
4.19 Fonction de fiabilité du Palettiseur. . . . .	71
4.20 Taux de défaillance du Palettiseur. . . . .	71
4.21 Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle. . .	72
4.22 fonction de fiabilité de la Remplisseuse. . . . .	73
4.23 Taux de défaillance de la Remplisseuse. . . . .	73
4.24 Représentation des temps du mois de décembre. . . . .	76
4.25 Représentation des temps du mois de janvier. . . . .	77
4.26 Représentation des temps du mois de février. . . . .	78
4.27 Représentation des temps du mois de mars. . . . .	79
4.28 Représentation des temps du mois d’avril. . . . .	80



# Liste des tableaux

3.1	Les causes de pertes et la conduite. . . . .	51
4.1	Résultats de l'analyse de Pareto. . . . .	54
4.2	Les équipements les plus fragiles. . . . .	56
4.3	Résultats de l'ajustement de la variable temps d'arrêts de la souffleuse. . .	57
4.4	Résultats de l'ajustement de la variable temps d'arrêts du diviseur. . . . .	58
4.5	Résultats de l'ajustement de la variable temps d'arrêts du fardeleuse. . . .	59
4.6	Résultats de l'ajustement de la variable temps d'arrêts de la Palettiseur. .	60
4.7	Résultats de l'ajustement de la variable temps d'arrêts de la Remplisseuse.	61
4.8	Résultats de l'ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Ex- ponentielle de la souffleuse. . . . .	64
4.9	Résultats de l'ajustement du variable bon fonctionnement par la loi Expo- nentielle du diviseur. . . . .	66
4.10	Résultats de l'ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Ex- ponentielle de la fardeleuse. . . . .	68
4.11	Résultats de l'ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Ex- ponentielle de la Palettiseur. . . . .	70
4.12	Résultats de l'ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Ex- ponentielle de la Remplisseuse. . . . .	72
4.13	Indices de fiabilité. . . . .	74
4.14	Les coûts de la maintenance. . . . .	76
4.15	Taux de mois de décembre. . . . .	77
4.16	Taux de mois de janvier. . . . .	77
4.17	Taux de mois de février. . . . .	78
4.18	Taux de mois de mars. . . . .	79
4.19	Taux de mois d'avril. . . . .	80

# Liste des abréviations

<b>A(t)</b> :	Fonction disponibilité.
<b>C<sub>d</sub></b> :	Coûts des défaillances.
<b>C<sub>m</sub></b> :	Coûts des pièces de matières.
<b>C<sub>p</sub></b> :	Coût de l'entretien préventif .
<b>C<sub>s</sub></b> :	Coût de main d'œuvre.
<b>C<sub>o</sub></b> :	Coût de stockage de la pièce de rechange.
<b>E(T)</b> :	Espérance mathématique de la variable aléatoire t.
<b>F(t)</b> :	Fonction de répartition de la variable aléatoire t.
<b>f(t)</b> :	Fonction de densité de la variable aléatoire t.
<b>MDT</b> :	Mean Down Time, moyenne de temps de panne.
<b>MTBF</b> :	Mean Time Between Failure, moyenne des temps entre pannes.
<b>MTTF</b> :	Mean time To Failure, moyenne des temps jusqu'à la défaillance.
<b>MTTR</b> :	Mean Time To Repair, moyenne des temps de réparation.
<b>MUT</b> :	Mean Up Time, moyenne des temps de bon fonctionnement.
<b>OMF</b> :	Optimisation de la maintenance par la fiabilité.
<b>P<sub>p</sub></b> :	Pertes de production.
<b>P<sub>m</sub></b> :	Pertes de matières premières.
<b>P<sub>a</sub></b> :	Pertes d'amortissement.
<b>P<sub>e</sub></b> :	Pertes d'énergie consommée.
<b>R(t)</b> :	Reliability, fiabilité au temps t.
<b>TPM</b> :	Maintenance Productive Totale.
<b>TRG</b> :	Taux de Rendement Global.
<b>λ(t)</b> :	Taux défaillance dépendant du temps.
<b>V(X)</b> :	Variance de la variable aléatoire X.
<b>α(alpha)</b> :	Niveau de signification.
<b>η(eta)</b> :	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull.
<b>β(beta)</b> :	Paramètre de forme de la loi de Weibull..
<b>γ(gamma)</b> :	Paramètre de position de la loi de Weibull.

# Introduction générale

Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises subissent de grandes pressions de la part de leurs clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, en outre, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment. Pour satisfaire la demande en qualité et en quantité, tout en respectant les délais de livraison, les conditions de sécurité et les coûts, l'entreprise doit disposer d'un outil de production fiable. Ainsi, les entreprises doivent gérer efficacement leurs coûts de fonctionnement et optimiser leurs moyens de production[7]. Autrement dit, il s'agit de produire plus avec un moindre coût et donc d'avoir une meilleure disponibilité des moyens de production tout en dépensant moins. Ceci nécessite des méthodes spécifiques d'aide à la décision et de nouvelles structures à intégrer dans la stratégie des entreprises. C'est pourquoi, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace.

Maintenir l'appareil de production n'est pas une tâche facile pour toute entreprise industrialisée, où toute erreur ou dysfonctionnement peut être un danger aux personnels. Les concepts de la maintenance sont définis pour maximiser la performance globale de l'entreprise. La mise en œuvre de ces concepts exige des ressources humaines compétentes, un système de gestion de pièces de rechange adéquat et un système d'information bien pensé, pour assurer un échange efficace entre les différents intervenants.

La stratégie de maintenance affecte fortement la performance d'une entreprise car il y a plusieurs façons de maintenir une installation. On peut jouer sur le type de maintenance (maintenance préventive, maintenance corrective,...), sur les types de tâches, sur leurs fréquences, sur le niveau d'intervention, etc. Donc le choix d'une politique de maintenance s'impose et doit conduire à trouver le meilleur compromis entre maintenance et coût car l'absence ou l'excès de maintenance se traduisent par de mauvais résultats financiers.

Nous nous intéressons, dans ce travail, aux méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons donné un intérêt particulier à la méthode d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM).

L'OMF permet de choisir entre la maintenance préventive et la maintenance corrective en se basant sur l'évaluation des coûts de maintenance, tout en tenant compte de la fiabilité des équipements et de la sécurité des personnes et des installations.

La TPM est basée sur huit piliers, dont le troisième vise à dégager la politique de maintenance adéquate en se basant sur le taux de défaillance de l'équipement. Les autres piliers de cette méthode permettent d'évaluer le rendement ainsi que l'efficacité du personnel et de l'installation.

Nous avons appliqué ces deux méthodes sur les données collectées au niveau de CEVI-TAL concernant la chaîne de production des bouteilles d'huile d'un litre.

Notre travail est organisé comme suit :

Les notions de base de la théorie de fiabilité font l'objet du premier chapitre. Le deuxième chapitre s'intéresse au concept de maintenance, ainsi que les différentes politiques de maintenance. Au chapitre trois, nous présentons les différentes méthodes d'optimisation de la maintenance que nous mettons en application dans le quatrième chapitre.

# Chapitre 1

## Notions de base de la fiabilité

### 1.1 Introduction

Ce chapitre introduit les notions de fiabilité et de disponibilité ainsi que les indices de fiabilité. Il introduit aussi la loi exponentielle, qui a la propriété d'absence de mémoire, et la loi de weibull qui ajuste, en général, la fiabilité des équipements mécaniques.

### 1.2 Notions de fiabilité

#### 1.2.1 Définition du concept de fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un système (équipement mécanique, électronique, informatique, ...) à accomplir une fonction (ou mission) donnée durant une période déterminée dans des conditions spécifiées d'exploitation [3],[15]. Les conditions sont toutes les contraintes externes, qu'elles soient d'origine mécanique, chimique, atmosphérique, humaine ,autres.

Le terme " fiabilité " est un néologisme (mot de création récente). En effet, ce terme, traduit du mot anglo-saxon "reliability", a été introduit aux U.S.A. en 1960 par la Commission Electrotechnique Internationale.

La fiabilité fait partie intégrante du concept de qualité d'un produit ou du service qui repose sur :

- ✓ Sa conformité à l'instant de l'achat ( $t = 0$ ).
- ✓ Sa fiabilité n notée  $R(t)$ .

Dans la définition de la fiabilité, on retient 4 notions fondamentales :

- **Notion de bien :**

Ces biens peuvent être classés en biens d'équipements, biens intermédiaires et biens de consommation. En outre ils peuvent être classés en fonction de leur durabilité.

- **Notion “accomplir une fonction” :**

Exigence d'un niveau minimum de performances en deçà duquel le bien est considéré comme défaillant (critère de défaillance, taux de défaillance, mode de défaillance,...).

- **Notion de probabilité :**

La probabilité  $p$  de réalisation d'un événement  $A$  est définie par le rapport entre le nombre de cas favorables ( $m$ ) et nombre de cas possibles ( $n$ ) :

$$P = \text{prob}\{\epsilon\} = h/n$$

- **Notion de “temps donné” :**

La fiabilité est une fonction probabiliste associée à une variable aléatoire  $X$  dépendante du temps (Nombre de tours, de cycles, ...).

La notion de fiabilité se distingue selon l'étape étudiée de la vie du système [2][19] :

a) **Fiabilité prévisionnelle** : C'est celle qui est déterminée durant la phase de conception sur la base d'un modèle mathématique, définie à partir des données de fiabilité de ses composants.

b) **Fiabilité estimée** : C'est la fiabilité mesurée après avoir conçu le système et ceci à l'aide d'un ensemble d'essais.

c) **Fiabilité opérationnelle** : C'est la fiabilité mesurée sur un matériel en exploitation. Elle dépend des conditions réelles d'exploitation et de support logistique.

## 1.2.2 Défaillance de matériel ou système

La défaillance est une perte partielle ou totale des propriétés d'un élément qui diminue significativement et entraîne la perte totale de sa capacité de fonctionnement [3],[19] .

- \* **Paramètres d'identification des défaillances :**

On pourra identifier les défaillances et les classer à partir d'une combinaison de paramètres répartis en six groupes en fonction de :

**a. Causes fondamentales d'apparition :**

- **La faiblesse inhérente (intrinsèque) :**  
Défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au matériel lui-même lorsque les contraintes dépassent les capacités du matériel au-delà des possibilités données de celui-ci.
- **Le mauvais emploi (extrinsèque) :**  
Défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du matériel.
- **Défaillance première :**  
Défaillance d'un matériel dont la cause directe ou indirecte n'est pas due à la défaillance d'un autre équipement.
- **Défaillance seconde :**  
Défaillance d'un matériel dont la cause directe ou indirecte est due à la défaillance d'un autre équipement.

**b. La vitesse de manifestation des défaillances :**

- **Les défaillances graduelles :**  
Elles se caractérisent par une variation progressive des paramètres déterminant la fiabilité du système. Ce type de défaillance est prépondérant pour le matériel mécanique, pour lequel se manifeste l'usure des composants après une certaine durée de bon fonctionnement.
- **Les défaillances subites :**  
Elles sont dues à une perte totale des propriétés du système entraînant une incapacité de fonctionnement. Ce type de défaillance caractérise spécialement un matériel électronique.

**c. En fonction de leur amplitude :**

- **Les défaillances partielles :**  
Elles résultent de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telles qu'elles n'entraînent pas une disparition complète de la fonction requise.

- **Les défaillances complètes :**

Elles résultent de déviations d'une ou des caractéristiques, telles qu'elles entraînent une disparition complète de la fonction requise.

d. **L'âge :**

- **Les défaillances précoces :**

Elles surviennent durant la période de jeunesse de l'équipement, c'est-à-dire juste après sa mise en fonctionnement. Ces défaillances peuvent être attribuées à la conception, la fabrication ou la mauvaise utilisation de l'équipement.

Généralement, un contrôle rigoureux est effectué avant la mise en service pour détecter les éléments présentant ce type de défaillance.

- **Les défaillances aléatoires :**

Elles apparaissent durant la période de vie utile de l'équipement. Ce sont des défaillances accidentelles. Elles ont la même probabilité d'apparition et sont généralement catalectiques (c'est-à-dire à la fois soudaines et complètes).

- **Les défaillances par usures :**

Ce sont des pannes progressives et elles apparaissent suite à la fatigue, l'usure et la dégradation de l'équipement après une longue période de fonctionnement, de processus de détérioration ou de corrosion.

e. **L'aptitude à être constatée :**

- **Défaillance fugitive (systématique) :**

Défaillance de courte durée difficilement constatable et non reproductible à volonté.

- **Défaillance intermittente :**

Défaillance non permanente, mais plus au moins facilement reproductible.

- **Défaillances permanente :**

Défaillance constatable à tout moment.



**f. Conséquences :**

- **Défaillance critique :**  
Défaillance qui risque de causer des blessures à des personnes ou des dégâts importants au matériel.
- **Défaillance majeure :**  
Défaillance qui n'est pas critique mais qui risque de réduire l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa fonction requise.
- **Défaillance mineure :**  
Défaillance qui n'est pas critique et qui ne réduit pas l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa fonction requise.

**1.2.3 Matériel réparable**

C'est un matériel qui peut être remis en fonctionnement après avoir subi une défaillance. La vie d'un tel matériel peut être décrite à l'aide de ce chronogramme [16] :

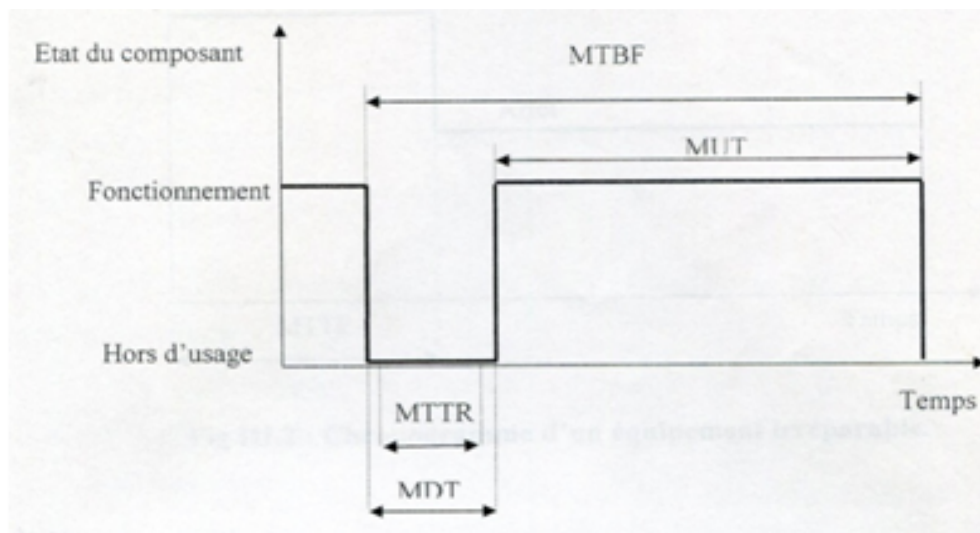


FIG. 1.1 – Chronogramme d'un équipement réparable.

Avec ,

MTBF : Moyenne des temps entre deux défaillances (Mean Time Between Failure).

MUT : Moyenne des temps de fonctionnement (Mean Up Time).

MDT : Moyenne des temps de panne (Mean Down Time).

MTTR : Moyenne des temps techniques de réparation (Mean Time To Repair).

### 1.2.4 Matériel irréparable (non réparable)

Le matériel ne peut être remis en fonctionnement.

Le chronogramme correspondant est [16] :

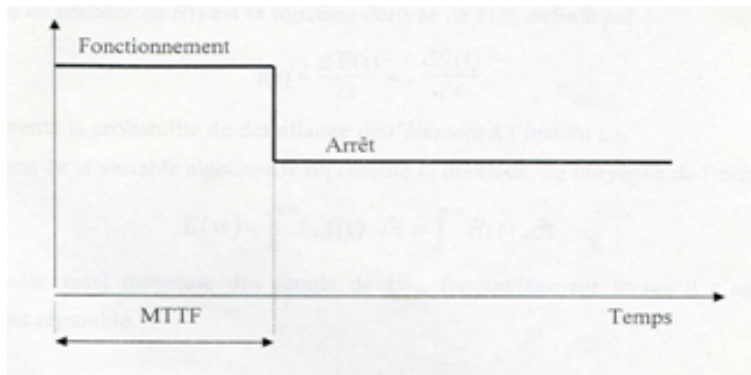


FIG. 1.2 – Chronogramme d'un équipement irréparable.

Avec :

MTTF : Moyenne des temps jusqu'à la panne (Mean time to Failure).

### 1.2.5 La maintenabilité

C'est l'évolution de la facilité avec laquelle s'exécutent les actions nécessaires pour réparer les défaillances qui peuvent s'effectuer dans des conditions données et dans un délai déterminé.

## 1.2.6 Disponibilité

**Définition 1.1.** [2]

Soit  $X(t)$  une variable aléatoire décrivant l'état d'un élément, avec :

$$X(t) = \begin{cases} 1, & \text{si l'élément fonctionne;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

On appelle disponibilité de l'élément à la date  $t$  et on la note  $A(t)$ , la probabilité que l'élément fonctionne à cet instant :

$$A(t) = P(X(t) = 1) = E(X(t)),$$

**Définition 1.2.** On appelle disponibilité moyenne au cours de la période  $(0, T)$ , la quantité :

$$D(t) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt,$$

où  $A(t)$  est la proportion de temps (au cours de la période  $(0, T)$ ) pendant laquelle l'élément fonctionne.

## 1.3 Indices de fiabilité

### 1.3.1 Fonction fiabilité

Admettons qu'à la date  $t = 0$  un élément est mis en fonctionnement et qu'à la date  $t = T$  il tombe en panne. La durée de vie  $T$  de cet élément est assimilée à une variable aléatoire non négative, vu que la défaillance est la conséquence de divers facteurs aléatoires.

La fonction de répartition  $F(t) = P(T \leq t)$  de la variable aléatoire  $w$  représente la probabilité que l'élément tombe en panne avant l'instant  $t$ .

La fonction de fiabilité, notée  $R(t)$ , représente la probabilité que l'élément fonctionne sans défaillance dans l'intervalle  $[0, t]$ . Elle est donnée par :

$$R(t) = p(T > t) = 1 - F(t).$$

La densité de probabilité  $f(t)$  est la fonction dérivée de  $F(t)$ , définie par :

$$f(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial t} = -\frac{\partial R(t)}{\partial t}.$$

Elle représente la probabilité de défaillance de l'élément à l'instant  $t$ . L'espérance de la variable aléatoire  $w$  représente la durée de vie moyenne de l'élément :

$$E(T) = \int_0^{+\infty} t.f(t).dt = \int_0^{+\infty} R(t).d(t)$$

On l'appelle aussi moyenne des temps de bon fonctionnement (MTTF) lorsqu'il s'agit d'un équipement réparable.

### 1.3.2 Taux de défaillance

Soit l'événement :

$A_{t,t+h} = \{ \text{l'élément fonctionne sans défaillance durant l'intervalle } [t, t+h] \}$ .

La probabilité pour que l'élément fonctionne sans défaillance au cours de l'intervalle  $[t, t+h]$  sachant qu'il n'est pas tombé en panne jusqu'à l'instant  $t$  est :

$$\begin{aligned} R(t, t+h) &= \frac{P(A_{t,t+h} \cap A_{0,t})}{P(A_{0,t})} \\ &= \frac{P(A_{0,t+h})}{P(A_{0,t})} = \frac{R(t+h)}{R(t)}. \end{aligned}$$

La probabilité de panne au cours de l'intervalle  $[t, t+h]$  est :

$$F(t, t+h) = 1 - R(t, t+h) = \frac{R(t) - R(t+h)}{R(t)}.$$

On appelle taux de défaillance, la fonction  $\lambda(t)$  définie par :

$$\lambda(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(t, t+h)}{h} = \frac{-R'(t)}{R(t)}.$$

La notion de taux de défaillance représente la probabilité de panne pour un système dans l'intervalle infiniment petit  $[t, t+h]$ , sachant qu'il a fonctionné sans défaillance jusqu'à l'instant  $t$ . Les notions de fiabilité ci-dessus sont liées, la connaissance de l'une d'elles permet de déterminer les autres : En effet ,

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(u) du \right].$$

D'où

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}.$$

Où  $f(t) = F'(t)$ .

### 1.3.3 La courbe en baignoire

La courbe en baignoire (Fig.1.3) donne l'évolution du taux de défaillance  $\lambda(t)$ , en fonction de l'âge du matériel. Elle comprend (pour un matériel mécanique) trois phases, chacune avec un sens de variation différent.

**Période de jeunesse** : elle est caractérisée par des pannes précoces (Défauts de conception, surproduction),  $\lambda(t)$  est décroissant.

**Période de maturité** : correspond à la vie utile de l'élément (Défauts occasionnelles),  $\lambda(t)$  est pratiquement constant.

**Période de vieillesse** : correspond à la période d'usure (détérioration, corrosion, etc.) de l'élément,  $\lambda(t)$  est croissant.

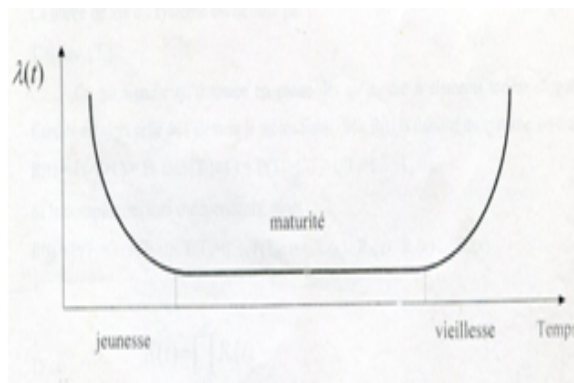


FIG. 1.3 – Courbe en baignoire.

## 1.4 Fiabilité des systèmes

Dans l'étude de fiabilité d'un système complexe, on est amené à décomposer ce système en un certain nombre d'éléments ou de sous systèmes. Ces éléments peuvent être indépendants (c-à-d que d'un point de vue fiabilité, la défaillance de l'un des éléments du système n'entraîne pas la défaillance d'un autre) ou dépendants [14],[16].

La fiabilité d'un système est déterminée en fonction de la fiabilité de tous ses éléments.

Selon l'incidence de la fiabilité de l'un de ces composants sur l'état du système, on distingue les configurations suivantes :

### 1.4.1 Configuration série

Ce système fonctionne si tous ses composants fonctionnent. Il est composé de  $n$  équipements supposés indépendants, de durée de vie  $T_i$  et de fiabilité  $R_i$  pour  $i$  variant de 1 à  $n$ .

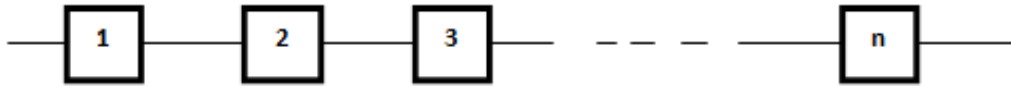


FIG. 1.4 – Configuration série.

La durée de vie du système est donnée par :

$$T = \min\{T_i\}$$

Ce qui signifie qu'il tombe en panne dès qu'un des  $n$  éléments tombe en panne. Sa fiabilité est alors celle de l'élément le moins fiable. Soit  $R(t)$  la fiabilité du système, on a alors :

$$R(t) = P(T > t) = P(\min\{T_i\} > t) = P(T_1 > t, T_2 > t, \dots > T_n > t).$$

Si les composants étant indépendants, alors :

$$R(t) = P(T_1 > t) \cdot P(T_2 > t) \cdot \dots \cdot P(T_n > t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t)$$

d'où :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

### 1.4.2 Configuration parallèle

Le système est défaillant si et seulement si tous ses éléments sont défaillants. C'est-à-dire que le système est capable de fonctionner avec au moins l'un de ses composants.

$$R(t) = 1 - P(T < t) = 1 - P(T_1 < t, T_2 < t, \dots, < T_n < t).$$

Si les composants du système sont indépendants alors :

$$R(t) = 1 - P(T_1 < t) \cdot P(T_2 < t) \cdot \dots \cdot P(T_n < t).$$

D'où :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)).$$

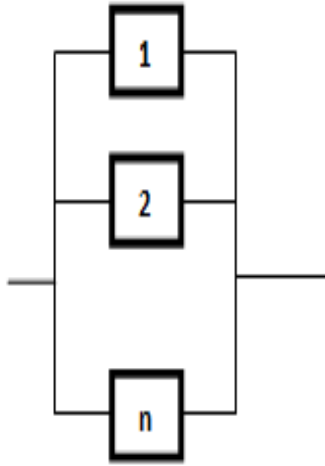


FIG. 1.5 – Configuration parallèle.

### 1.4.3 Autres configurations

Il existe d'autres configurations. Citons par exemple le système  $k$  parmi  $n$ , le système série-parallèle, parallèle-série, etc.

## 1.5 Modèles paramétriques de fiabilité

### 1.5.1 La loi exponentielle

C'est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant [14].

Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance ou l'intervalle de temps entre deux défaillances successives.

Elle est définie par le taux de défaillance  $\lambda$  ou par la moyenne des temps de bon fonctionnement  $\frac{1}{\lambda}$ .

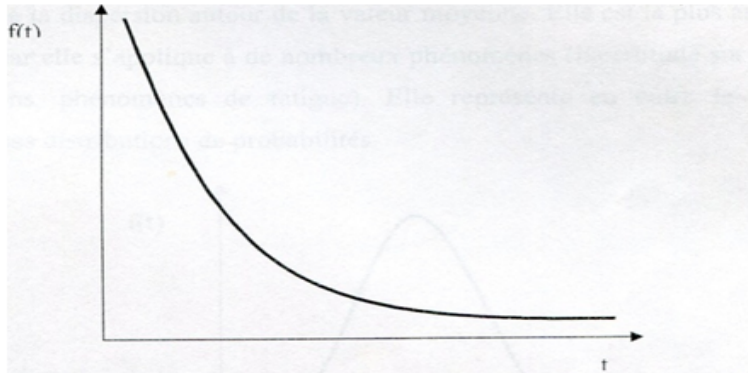


FIG. 1.6 – Densité de probabilité de la loi exponentielle.

- Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0;$$

- Fonction de réparation :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; t > 0$$

- Fonction de fiabilité :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0;$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda;$$

- Espérance :

$$E(T) = \frac{1}{\lambda};$$

- Variance :

$$V(T) = \frac{1}{\lambda^2}.$$

**Proposition 1.1.** Une propriété importante de la distribution exponentielle est la perte de mémoire ou absence de mémoire. Cette propriété se traduit mathématiquement par l'équation suivante :

$$\mathbb{P}(T > s + t \mid T > t) = \mathbb{P}(T > s) \quad \forall s, t \geq 0.$$

**Preuve 1.1.** La condition d'absence de mémoire se formule de la manière suivante [18] :

$$\mathbb{P}(T > s + t \mid T > t) = \mathbb{P}(T > s) \quad \forall s, t \geq 0.$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\mathbb{P}(T > s + t)}{\mathbb{P}(T > t)} \quad \forall s, t \geq 0 \\ &= \frac{e^{-(s+t)}}{e^{-t}} = e^{-s} = \mathbb{P}(T > s). \end{aligned}$$



### 1.5.2 La loi de weibull

C'est une loi fréquemment utilisée en fiabilité des matériels mécaniques. Elle permet de représenter les différentes phases de la vie d'un matériel : jeunesse, vie utile et vieillesse. Elle est caractérisée par trois paramètres :  $\gamma$ ,  $\eta$  et  $\beta$ .

– **Le paramètre de position  $\gamma$  :**

Il représente le décalage existant entre le début de l'observation et le début du processus que l'on observe.

– **Le paramètre d'échelle  $\eta$ ,  $\eta > 0$  :**

Ce paramètre nous renseigne sur l'étendue de la distribution .

– **Le paramètre de forme  $\beta$ ,  $\beta > 0$  :**

Il est associé à la cinétique du processus observé.

- Si  $\beta < 1$  : Le taux de défaillance décroît dans le temps, ce qui correspond à la période de jeunesse des matériels dans la courbe en baignoire.
- Si  $\beta = 1$  : Le taux de défaillance est constant, ce qui correspond à la période de vie utile.
- Si  $\beta > 1$  : Le taux de défaillance est croissant, ce qui correspond à la période de vieillesse ou d'usure.

**Remarque 1.1.** Pour  $\beta > 3$ , la loi de Weibull se rapproche de la loi Normale [2].

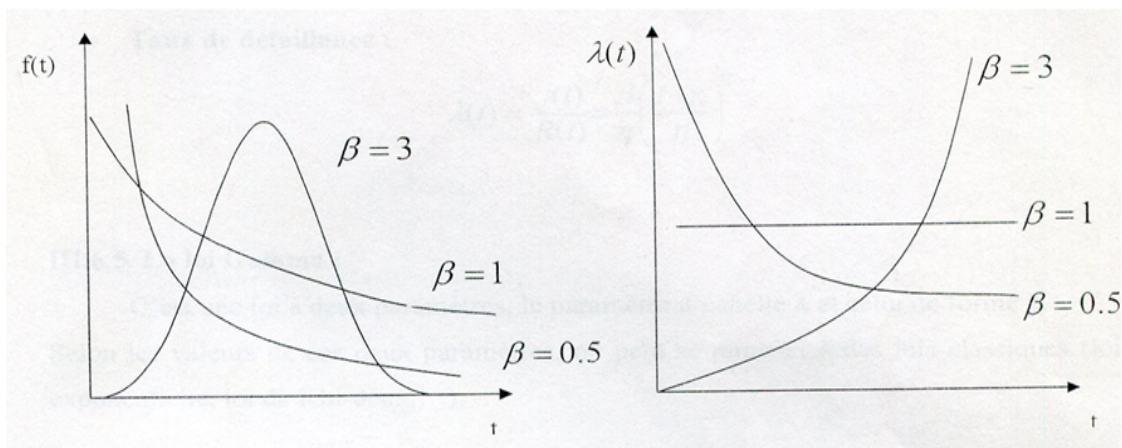


FIG. 1.7 – Influence de  $\beta$  sur la densité de probabilité et le taux de défaillance.

- Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) t > \gamma;$$

- Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) t > \gamma;$$

- Fonction de fiabilité :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) t > \gamma;$$

- Espérance :

$$E(T) = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right),$$

tel que :

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt;$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}.$$

**Remarque 1.2.** Il existe d'autres lois très utilisées en fiabilité telles que la loi Normale, la loi Log-Normale, la loi Gamma, etc.

## 1.6 Analyse de Pareto ou ABC :

Le diagramme de Pareto est un moyen simple pour classer les phénomènes par ordre d'importance. Ce diagramme et son utilisation sont aussi connus sous le nom de "règle des 20/80" ou méthode ABC.

Vilfredo Pareto, démontra le principe d'une inégalité de la répartition des richesses et des revenus dans une population quelconque et en déduisit une loi qui peut s'énoncer ainsi : "Quand il y a un grand nombre de variantes possibles, très souvent moins de 20% de ces variantes représentent plus de 80% des cas qui peuvent se présenter dans la réalité".

Le diagramme de Pareto est un histogramme dont les plus grandes colonnes sont conventionnellement à gauche et vont décroissant vers la droite. Une ligne de cumul indique l'importance relative des colonnes. La popularité des diagrammes de Pareto provient d'une part parce que de nombreux phénomènes observés obéissent à la loi des 20/80, et que d'autre part si 20% des causes produisent 80% des effets, il suffit de travailler sur ces

20% pour influencer fortement le phénomène. En ce sens, le diagramme de Pareto est un outil efficace de prise de décision.

- **Classification :**

Pareto propose une classification en trois (3) groupes : A, B et C d'où le nom, méthode ABC

- ✓ Le groupe A est composé des causes constituant 80% des effets du phénomène (représentant généralement 20% des causes).
- ✓ Le groupe B est composé des causes constituant 15% des effets du phénomène (représentant généralement 30% des causes).
- ✓ Le groupe C est composé des causes constituant 5% des effets du phénomène (représentant généralement 50% des causes.).

- **Construction du diagramme :**

A partir des données recueillies, on définit les catégories, puis :

- On répartit les données dans les catégories ;
- Les catégories sont classées dans l'ordre décroissant, (tri dans Excel par exemple) ;
- Faire le total des données ;
- Calculer les pourcentages pour chaque catégorie : fréquence / total ;
- Calculer le pourcentage cumulé ;
- Déterminer une échelle adaptée pour tracer le graphique ;
- Placer les colonnes (les barres) sur le graphique, en commençant par la plus grande à gauche ;
- Lorsque les barres y sont toutes, tracer la courbe des pourcentages cumulés.

- Diagramme de Pareto

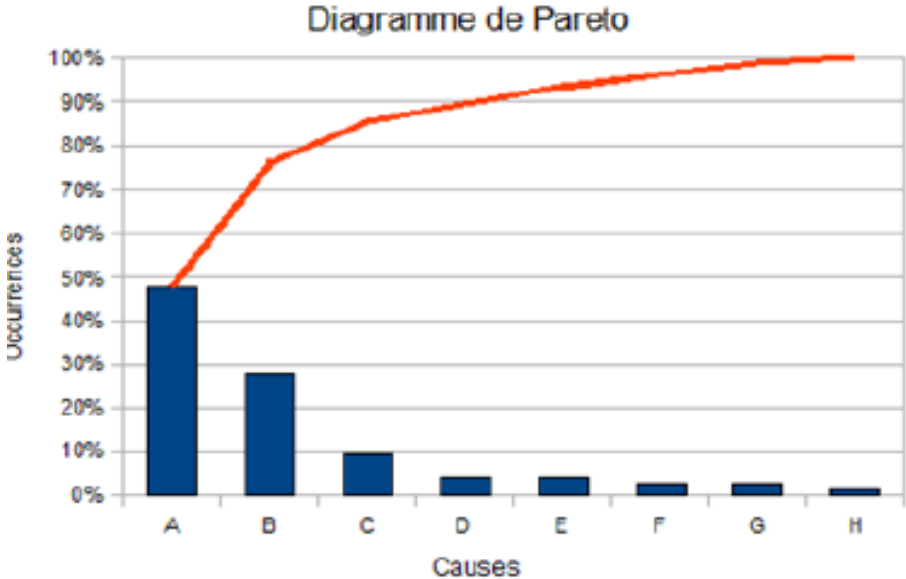


FIG. 1.8 – Diagramme de Pareto.

# Chapitre 2

## Sur quelques notions de maintenance

### 2.1 Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, la notion de maintenance ainsi que son rôle et son intérêt. Nous avons donné un intérêt particulier aux différents types de maintenance, sans oublier les principales opérations de maintenance.

### 2.2 Généralités sur la fonction maintenance

#### 2.2.1 Définition de la maintenance

- Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité ou pallier aux défaillances.
- Selon l'AFNOR (Association Française de Normalisation) par la norme NFX-60-010, la maintenance se définit comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal [1].

La définition de la maintenance fait donc apparaître quatre notions :

- ✓ Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance.
- ✓ Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.
- ✓ Etat spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétence et les objectifs attendus de la maintenance.
- ✓ Coût optimal qui implique la conduite de ces opérations dans un souci d'efficacité économique, c'est -à-dire en respectant le budget alloué pour la maintenance.

## 2.2.2 Rôle et intérêt de la maintenance

### Rôle :

- Elle doit assurer la rentabilité des équipements en tenant compte de la politique définie par l'entreprise.
- Elle procède à des études préalables afin de permettre la réduction des coûts et des interventions.
- Elle prépare le travail, étudie les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'intervention.

### Intérêt :

La maintenance se montre très importante pour les 4 domaines suivants :

- **La productivité :**

En limitant le nombre de défaillances, la maintenance permet de conserver une bonne productivité en réduisant le nombre d'arrêts de la production ou son ralentissement.

- **La qualité :**

En limitant la dérive des systèmes due au vieillissement ou à l'usure, la qualité de la production est conservée.

- **La sécurité :**

En limitant les défaillances la maintenance permet de prévenir certains accidents.

- **La durabilité des biens :**

En limitant les effets de l'usure et du vieillissement, la maintenance permet de conserver les équipements en bon état plus longtemps et ainsi permet des économies de rachat de matériel et d'éviter les problèmes causés par l'intégration de nouveaux matériels.

## 2.2.3 Fonctions d'un service maintenance

### a. Fonction étude et méthode :

Elle consiste à mettre en place des études techniques pour :

- Rechercher des améliorations.
- Participer à la conception de travaux neufs.
- Participer à l'analyse des accidents de travail.
- Etablir des fiches d'instructions pour les interventions.
- Etablir les plannings d'intervention.

- Analyser les coûts de maintenance.
- Définir des stratégies de maintenance.

**b. Fonction exécution et mise en œuvre :**

Son aspect pluri-technique nécessite une bonne connaissance des matériels ainsi qu'une bonne maîtrise des diverses technologies.

## 2.3 Politique de maintenance

Lorsque la politique ou la stratégie de maintenance est définie, on doit choisir ensuite la méthode la plus appropriée pour atteindre les objectifs fixés. Le choix de cette méthode dépendra également d'autres paramètres à savoir :

- La connaissance du matériel, de son âge, de son état et de la durée de vie de ces différents organes.
- La probabilité de pannes ; faible ou élevée.
- La facilité d'intervention.
- La possession en stock de pièces de rechange.
- Les moyens disponibles au moment de l'intervention.

### 2.3.1 Méthode de maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir une méthode de maintenance, il faut être informé des objectifs de la direction, des décisions politiques de maintenance, mais il faut aussi connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels ; le comportement du matériel en exploitation ; les conditions d'application de chaque méthode ; les coûts de maintenance et les coûts de perte de production. Nous présentons, ci-après, les méthodes de maintenance les plus utilisées :

**1. Maintenance préventive :**

C'est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Elle doit permettre d'éviter des défaillances de matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

- **La maintenance préventive systématique**

C'est une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète.

Cette méthode nécessite de connaître : le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries. La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

- Equipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée). Par exemples : appareil de lavage, extincteur (incendie), réservoir sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc.
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves. Par exemples : tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avion, trains, etc.
- Equipements ayant un coût de défaillance élevé. Par exemples : éléments d'une chaîne automatisée, systèmes fonctionnant en continu.
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service. Par exemples : consommation excessive d'énergie, allumage et carburation déréglés pour les véhicules à moteurs thermiques.

- **La maintenance préventive conditionnelle**

C'est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien.

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant les cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là, nous pouvons décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint, mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.



- **But de la maintenance préventive**

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse ;
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc ;
- Diminuer le budget de la maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves.

## 2. La maintenance corrective

Elle est effectuée après défaillance. La défaillance peut être totale ou partielle.

La maintenance corrective a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés ou / et une dépréciation en quantité ou / et en qualité des services rendus.

## 3. Autres politiques de maintenance pour systèmes mono-composants :

Nous citons, ci-après, d'autres politiques de maintenance moins populaires mais importantes [11] :

- **Politique de la limite de défaillance :**

Sous cette politique, la maintenance préventive a lieu seulement lorsque le taux de défaillance ou autres indices de fiabilité atteignent un niveau prédéterminé et les défaillances sont corrigées par des réparations.

- **Politique de maintenance préventive séquentielle :**

Sous cette politique, un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps inégaux. Souvent les intervalles deviennent de plus en plus courts avec le temps, sachant que la majorité des éléments nécessitent des maintenances plus fréquentes avec l'âge.

- **Politique de la limite de réparation :**

Lorsqu'un élément tombe en panne, le coût de réparation est estimé. La réparation est entreprise si le coût estimé est inférieur à une limite prédéterminée ; sinon l'élément est remplacé, cette politique est connue sous le nom de "la limite du coût de réparation".

### 2.3.2 Les opérations de maintenance

#### 1. Les opérations de la maintenance corrective

Dans le cas de la maintenance corrective (curative) il s'agit d'utiliser les opérations suivantes :

- **La rénovation :**

Inspection complète de tous les organes, reprise complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défectueux, conservation des pièces bonnes.

La rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

- **La réparation :**

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après défaillance.

L'application de la réparation, opération de maintenance corrective, peut être décidée, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique. Tous les équipements sont concernés par cette opération.

- **Le dépannage :**

C'est une action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage, opération de maintenance corrective, n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps. Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

Ainsi le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

En plus des opérations de la maintenance curative on distingue :

## 2. Les opérations de la maintenance préventive

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- **L'inspection :**

C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Cette activité peut s'exercer notamment au moyen de ronde.

- **Le contrôle :**

C'est une vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle peut :

- Comporter une activité d'information ;
- Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement ;
- Déboucher sur des actions correctives.

- **La visite :**

Activité consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tous ou une partie des équipements. Elle peut entraîner certains démontages et déclencher des opérations correctives des anomalies constatées. Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

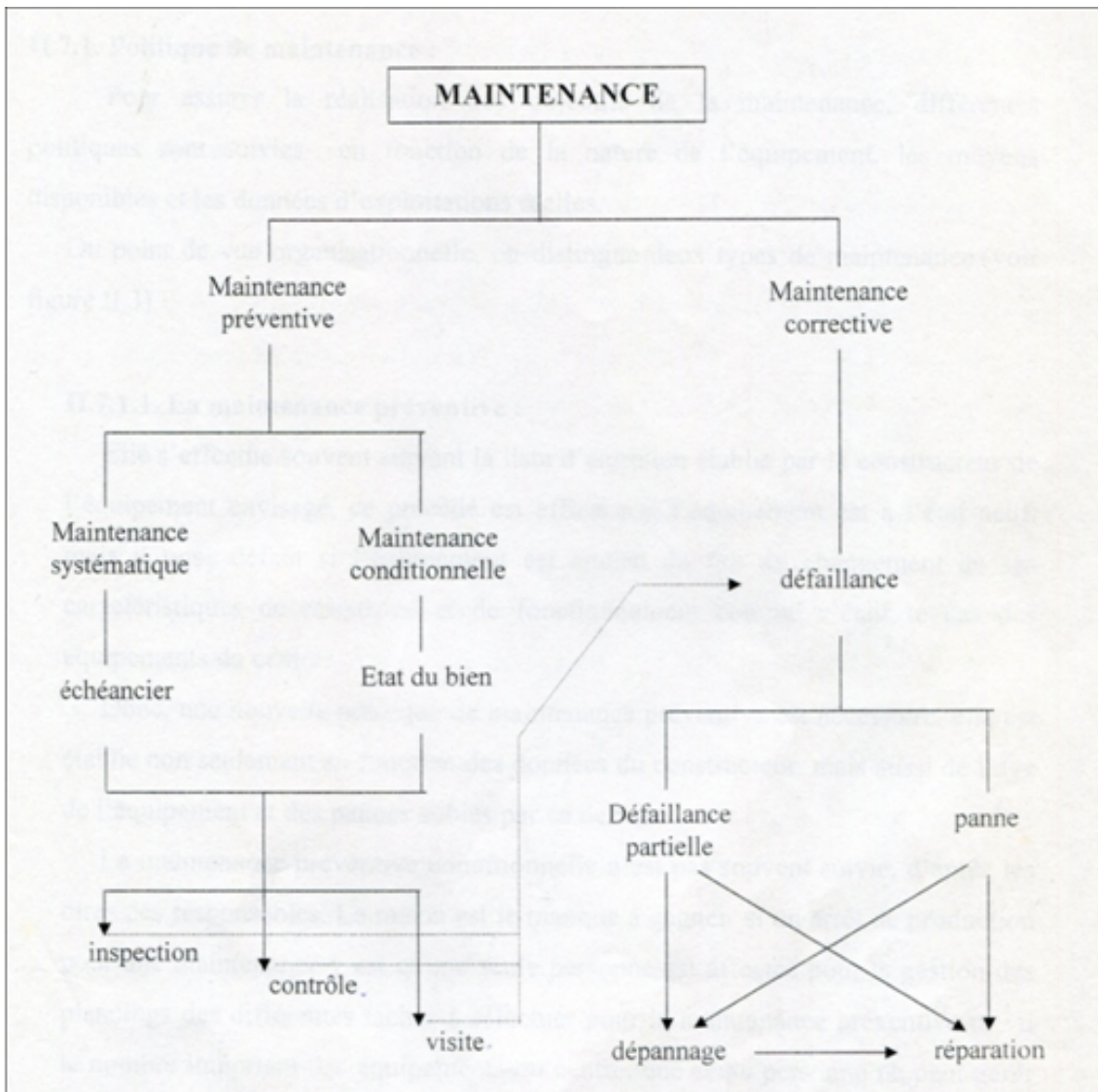


FIG. 2.1 – Les diverses options de la maintenance.

### 3. Autres opérations du service maintenance

- **La révision :**

C'est l'ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales.

- **Amélioration :**

Elle consiste à procéder à des modifications, des changements ou des transformations sur un matériel correspondant à la maintenance.

## 2.4 Les stratégies de maintenance

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation pouvant entraîner leur panne et d'éventuels effets sur le fonctionnement de l'installation.

Les mécanismes de dégradation peuvent être de plusieurs types : usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques divers...etc. Leurs vitesse d'évolution dépend de plusieurs facteurs (condition de fonctionnement, tâches de maintenance mal exécutées,...).

Cinq types de défaillance sont définis pour les équipements : perte de la fonction, fonctionnement intempestif, refus de s'arrêter, refus de démarrage et fonctionnement dégradé.

Face à la diversité des équipements d'une installation et de leurs comportements, les responsables de maintenance doivent envisager de véritables stratégies. Ils peuvent décider, par exemple, de pratiquer une maintenance corrective à la suite de la défaillance d'un équipement, mais cela ne permet pas d'éviter les conséquences des pannes sur le fonctionnement de l'installation. Une autre attitude consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive systématique selon laquelle la décision d'intervenir précède l'apparition de la panne. Cela permet de diminuer le nombre de défaillances et de faire des gains économiques. La maintenance préventive conditionnelle est de plus en plus utilisée. Elle présente l'avantage de limiter le nombre d'interventions sur les équipements. En effet, la remise en état de matériel est réalisée uniquement lorsque celui-ci présente des signes de dysfonctionnement (dégradation, apparition de symptômes, ...). L'importance de l'impact de la politique de maintenance sur les performances du système considéré rend nécessaire son optimisation [16].

# Chapitre 3

## Optimisation de la maintenance

### 3.1 Introduction

Après avoir introduit les notions fondamentales de fiabilité ainsi que la notion de maintenance, nous abordons dans ce chapitre le concept d'optimisation de la maintenance et les différentes méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons présenté, plus ou moins en détail, la méthode d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM) qui font l'objet de notre application.

### 3.2 Les domaines d'application de l'optimisation de la maintenance

On peut rappeler que certaines méthodes d'optimisation de la maintenance ont été initialement développées dans les domaines de l'aéronautique et de la production d'énergie, en particulier pour les centrales nucléaires avant d'être adaptées et appliquées dans d'autres secteurs industriels. En effet, les risques présentés par ce type d'activités (transport aéronautique et énergie nucléaire) pour les personnes et l'environnement impliquent une vraie rigueur dans leurs exploitations et maintenance parce qu'il existe un réel souci pour réduire au maximum les dangers et aussi diminuer les interventions inutiles. Ainsi, la sécurité a été à la base des documents établis par le " Maintenance Steering Groupe (MSG) " pour définir et décrire le programme de maintenance préventive du Boeing 747 [20].

L'optimisation de la maintenance permet :

- La définition d'une stratégie de maintenance (celle qui permet une meilleure disponibilité des installations à un meilleur coût).
- Elaboration d'un programme d'entretien préventif.
- La détection des dysfonctionnements, les opérations de diagnostic et réparation.

- Le choix entre la décision d'investir ou de maintenir (remplacement des actifs ou leurs entretiens).

### 3.3 Les différentes méthodes d'optimisation de la maintenance

Dans cette partie, nous allons présenter les principales méthodes d'optimisation de la maintenance.

#### 3.3.1 La méthode de l'industrie aéronautique M.S.G-3

L'objectif majeur du MSG-3 (Maintenance Steering Groupe) est de définir la maintenance qui permet d'assurer la sécurité des avions. Si la sécurité est l'objectif premier, le transport aéronautique est fortement soumis aux lois du marché et le critère économique est aussi pris en compte. Il n'apparaît cependant pas comme l'objectif majeur de la méthode.

Le principe du MSG-3 est d'organiser le choix des tâches de maintenance en fonction des conséquences des défaillances. Le but d'une action de maintenance préventive n'est pas directement d'assurer qu'un équipement soit en état de marche mais plutôt d'éviter les conséquences de son dysfonctionnement. Le cœur de la méthode est la logique de sélection des tâches de maintenance qui, en fonction des conséquences des défaillances, orientera vers les actions les plus efficaces et les plus économiques [20].

#### 3.3.2 La méthode d'optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF)

Cette méthode a vu le jour dans l'industrie aéronautique civile et militaire américaine des années 1980, sous le nom de RCM (Reliability Centered Maintenance), dans le but de maîtriser les coûts d'exploitation des avions. Développée par EDF à partir de 1990, généralisée ensuite sur les centrales nucléaires puis mise en œuvre sur des systèmes considérés comme les plus importants vis-à-vis des critères de sûreté, de disponibilité et de coûts d'exploitation.

La méthode a été adaptée pour être utilisée sur d'autres types d'installations (centrales thermiques au charbon, turbines à combustion, lignes de transport d'électricité, éoliennes, . . .). Des sociétés prestataires de services en maintenance l'ont transféré à d'autres secteurs industriels (automobile, offshore, . . .).

Cette approche permet de choisir une stratégie de maintenance préventive compte tenu d'objectifs de disponibilité, de sûreté et de coûts, en tenant compte des conséquences potentielles identifiées, à savoir l'occurrence des modes de défaillance et les effets sur le fonctionnement du système, ainsi que des données de retour d'expérience des dysfonctionnements de matériels [20][21].

### 1. Définition de l'OMF

On peut tenter de définir l'OMF en disant qu'il s'agit d'une méthode d'aide à la décision pour élaborer le programme de maintenance préventive d'une installation en respectant des contraintes et en optimisant des critères :

- Nature des contraintes à respecter :
  - La sécurité des personnes.
  - La préservation de l'environnement.
  
- Nature des critères à optimiser :
  - Disponibilité (disponibilité de l'installation).
  - Coûts.
  - Qualité (préservation d'un bon niveau de qualité du produits).

La figure ci-après résume les principales étapes nécessaires pour la mise en œuvre de cette méthode.



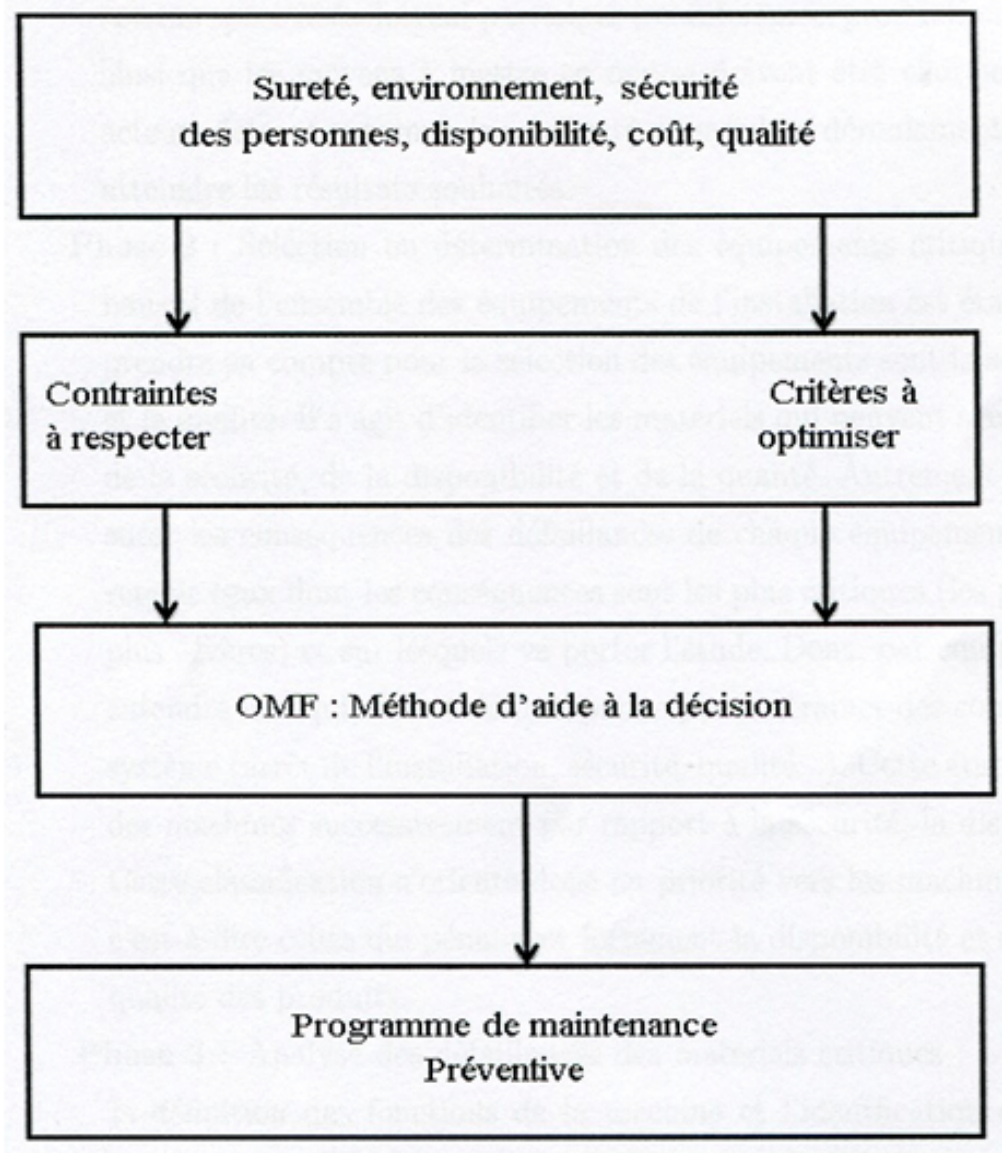


FIG. 3.1 – Schéma descriptif pour l'application de l'OMF.

## 2. Présentation de la méthode

C'est une démarche rationnelle qui vise à limiter au mieux les conséquences des défaillances d'origine matérielle sur le fonctionnement d'une installation. Elle est basée sur l'analyse de la fiabilité des équipements et permet de déterminer [20][13] :

- Où les actions préventives sont-elles nécessaires (sur quels matériels) ?
- Quelles sont les actions à effectuer ?
- Quand intervenir ?

La démarche se décline en cinq (05) phases :

**Phase 1 :** Formation d'un groupe OMF pilote :

C'est une équipe à laquelle tous les acteurs spécialisés doivent participer (maintenance, production, qualité).

**Phase 2 :** Sélection ou détermination des équipements critiques :

Un inventaire exhaustif de l'ensemble des équipements de l'installation est établi. Les trois critères à prendre en compte pour la sélection des équipements sont la sécurité, la disponibilité et la qualité. Cette étape permet le classement des machines successivement par rapport aux ces trois critères déjà définis.

**Phase 3 :** Analyse des défaillances des matériels critiques :

L'analyse commence par mode de défaillance, il faut voir la description de la manière dont la machine ou le système ne remplit plus sa fonction. Ainsi, on peut identifier les défaillances significatives (les plus importantes) pour ces matériels critiques.

**Phase 4 :** La sélection des tâches de maintenance :

Les phases précédentes ont permis de répondre à la question fondamentale " sur quels matériels et pour prévenir quelles défaillances doit-on faire de la maintenance préventive ? ". Il s'agit alors de proposer des tâches élémentaires de maintenance justifiées pour couvrir les modes de défaillance significatifs et après regroupement, à écrire le programme de maintenance préventive qui y répond de manière optimale.

**Phase 5 :** Analyse du retour d'expérience :

La recherche des matériels critiques (phase 2) puis des défaillances significatives (phase 3) et la sélection des tâches de maintenance (phase 4) nécessitent une connaissance des mécanismes de dégradation conduisant éventuellement aux défaillances. Pour ce faire on exploite les données archivées relatives à l'historique des machines (fichier historique). La mise en place d'un retour d'expérience démarre par une sensibilisation du personnel, la mise en place et le suivi d'un ensemble de fiches et d'indicateurs.

Les principales étapes de l'O.M.F sont résumées dans la figure ci-après :

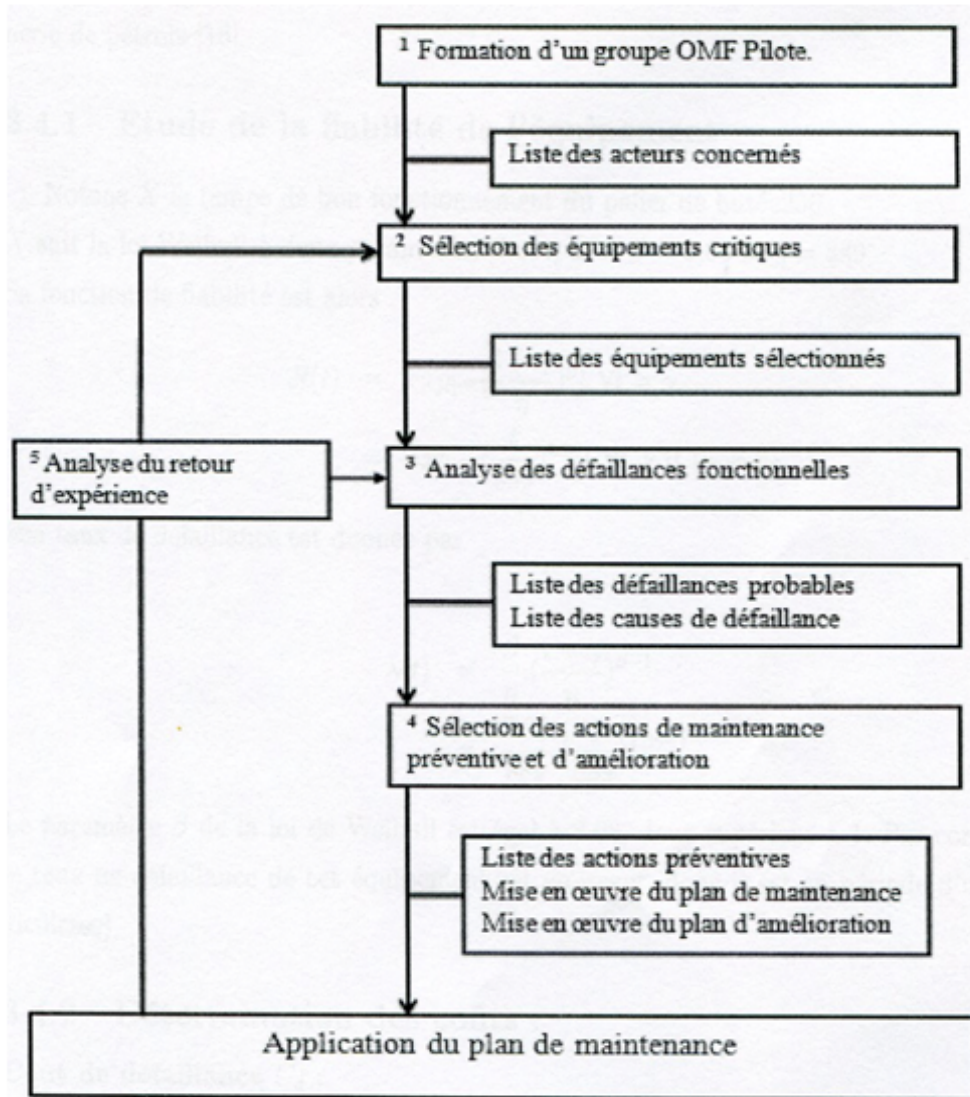


FIG. 3.2 – Les étapes de l'O.M.F.

### 3. Choix du cadre d'étude

La partie de l'installation qui est le cadre d'étude peut être un ensemble de systèmes (par exemple une unité de production de vapeur), un système ou un sous-système par exemple un système de compression d'air), un gros matériel (un moteur ou une motopompe). Pour s'assurer du meilleur rapport entre les résultats obtenus et le coût de l'étude, il est nécessaire de choisir convenablement le sujet. Un premier tri s'impose dès le départ et une hiérarchisation des sujets possibles permettra d'aborder en priorité les études les plus prometteuses. Pour cela, il convient de considérer les différents aspects suivants [5] :

- Les conséquences que les défaillances peuvent avoir sur les enjeux considérés. On pourra ainsi proposer de noter les systèmes en fonction des conséquences qu'ils peuvent avoir sur la disponibilité, les coûts, la qualité, etc.
- Les améliorations potentielles qui peuvent être apportées au programme de maintenance existant. Par exemple, il n'est peut-être pas pertinent d'engager l'analyse d'un programme qui vient juste d'être révisé.
- L'évolution du nombre de défaillances et de dégradations constatées à travers le retour d'expérience.
- Les changements de mode d'exploitation qui peuvent affecter les mécanismes de dégradation et les risques de défaillance. Le programme de maintenance doit dans ce cas être remanié et la mise en œuvre de la méthode OMF sera profitable. Il vaut mieux classer les systèmes et s'attaquer à ceux dont les performances sont les plus sensibles aux actions de maintenance.

Nous allons voir les différents outils servant à produire les données indispensables à l'étude OMF, le retour d'expérience et les conditions de son efficacité.

**Remarque 3.1.** Sur le terrain, les industries qui sollicitent le plus souvent une optimisation de la maintenance préventive, sont d'abord celles qui font face à de lourds coûts de maintenance, donc un matériel vieillissant et budget trop serré pour un renouvellement.

### 4. Retour d'expérience pour l'OMF ;

L'étude OMF est une méthode d'aide à la décision de la stratégie de maintenance à mener. Elle sollicite le bon sens, mais cela ne suffit pas, on a aussi besoin de données quantitatives pour appréhender les problématiques de maintenance d'un point de vue pragmatique.

Le retour d'expérience technique s'intègre donc dans le système d'information et dans le management des entreprises, et est un point clé stratégique de la sûreté de fonctionnement industrielle. Le retour d'expérience n'est pas une fin en soi, mais

un moyen contribuant à ces enjeux qui sont en somme, la maîtrise du matériel, et précisément :

- ✓ De la sûreté et l'environnement ;
- ✓ La disponibilité ;
- ✓ La qualité du produit ;
- ✓ Les coûts de maintenance ;
- ✓ La durabilité et la prolongation de la durée d'exploitation ;
- ✓ Et l'aide à la conception des installations futures.

Notons aussi que, dans l'industrie, le retour d'expérience intervient pendant tout le cycle de vie d'un produit ou d'une installation, de l'avant-projet sommaire à la fin de vie, pour ainsi dire, un processus d'amélioration continu.

#### 4.1 Le retour d'expérience un processus d'amélioration continu

L'un des résultats des études OMF est l'établissement de programmes optimisés de maintenance préventive. Ces programmes sont ensuite appliqués. Ils doivent cependant être actualisés (il s'agit d'un processus en boucle), pour les raisons suivantes :

Les conditions d'environnement et d'exploitation peuvent varier et des vieillissements peuvent apparaître et nécessiter une surveillance accrue.

L'impact d'un programme de maintenance " optimisé " peut s'avérer négatif en termes de fiabilité et de réduction des coûts. Il est important de prévoir une réactualisation périodique (tous les 3 à 5 ans pour les composants actifs, tous les 10 ans pour les composants passifs).

Les programmes de maintenance, ne peuvent s'envisager sans :

- L'archivage des études OMF réalisées précédemment, assurant la traçabilité des analyses et leur réactualisation.
- Une structure pérenne de retour d'expérience technique relative aux défaillances et aux actions de maintenance des équipements les plus importants et intégrée dans le système d'information de l'entreprise.

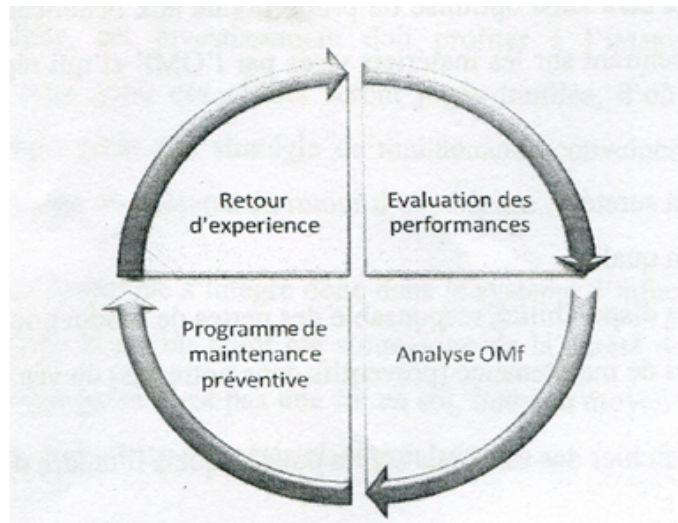


FIG. 3.3 – Retour d'expérience, processus en boucle.

#### 4.2 Qualité des données

Dans le domaine du retour d'expérience, peut être plus que dans d'autres domaines, la qualité des données est primordiale, car elle a un impact direct sur la fiabilité des résultats et l'interprétation du retour d'expérience [12] .

#### 4.3 Constitution de la base de données

Comme certains objectifs peuvent se révéler contradictoires, il est donc important d'identifier précisément ce que l'on cherche avant de constituer une banque de données de retour d'expérience et de réaliser les outils d'accès et de traitement qu'il faudra lui associer.

On peut ainsi distinguer différents types de bases de données dans le domaine industriel :

- Les banques d'événements : à caractère historique, associant des faits techniques ou humains (événement, incidents, accidents, etc.) au temps, et qui concernent plutôt les situations d'exploitation dans les installations.
- Les banques de défaillances : qui nécessitent le recueil de défaillances, de dégradations, d'actions de maintenance et de statistiques de fonctionnement, et qui concernent toutes les situations relatives aux matériels.

Il existe encore d'autres banques (de contrôle, surveillance, statistiques, connaissance, etc.)

## 5. Analyse fonctionnelle

Pour pouvoir étudier les dysfonctionnements possibles d'un système, il est clair qu'il faut d'abord comprendre comment il fonctionne durant ses différentes phases de fonctionnement normal.

Par ailleurs, la partie de l'installation que l'on a choisie d'étudier doit être délimitée. Si ce n'est pas déjà fait, il faut commencer par la découper en systèmes et déterminer les limites matérielles de chacun, c'est ce que permet l'analyse fonctionnelle. Elle va servir à comprendre comment les fonctions des systèmes sont réalisées et à couper l'installation selon une logique fonctionnelle. Cette analyse repose sur une démarche déductive.

### 5.1 Décomposition fonctionnelle

Elle consiste à découper de plus en plus finement les fonctions en partant de celles de l'installation pour parvenir aux fonctions plus élémentaires remplies par les matériels. En effet, ce sont les fonctions du " haut " (au niveau de l'installation) qui définissent les enjeux, et c'est sur celles du " bas " (au niveau des matériels) que l'on effectue les interventions de maintenance. L'analyse fait le lien entre le " haut " et le " bas ", en allant du " haut " vers le " bas ". Plusieurs techniques sont utilisables sachant que l'on part d'une installation existante, connue et documentée, et non de la feuille blanche d'un concepteur [6] .

### 5.2 Décomposition sur un système

Cette étape consiste à reformuler les informations que l'on peut extraire des schémas mécaniques et des documents descriptifs du fonctionnement.

Elle assure une bonne traçabilité à l'étude, un intérêt non négligeable est qu'elle aide le groupe de travail à bien comprendre le fonctionnement du système étudié.

### 5.3 Décomposition matérielle

Les premières étapes d'une analyse OMF servent à trier les matériels (ou plus précisément leurs modes de défaillance) en analysant les fonctions auxquelles ils participent de manière à ne retenir que ceux qui feront l'objet d'interventions de maintenance préventive.

La réalisation d'un schéma mécanique simplifié peut éliminer certains matériels secondaires et de réduire un peu le volume de l'étude.

On obtient ainsi un schéma simplifié sur lequel apparaissent des matériels, qui remplissent des fonctions élémentaires importantes. Ces matériels peuvent à leur tour être décomposés de manière à faire apparaître leurs composants qui peuvent être la cause de défaillances et sur lesquels porteront les tâches de maintenance préconisées [6].

## 6. Détermination des coûts

La détermination des coûts se fait à partir d'un bilan [11].

### 6.1 Coût de défaillance $C_d$ :

Il se compose des coûts suivants :

- Perte de production  $P_p$  : Connaissant le temps d'arrêt  $T$  et le coût horaire  $C_h$ , la perte de production est estimée de la façon suivante :

$$P_p = T \cdot C_h.$$

- Perte de matières premières  $P_m$  : Elle représente la matière consommée et non transformée en produit négociable.
- Perte d'amortissement  $P_a$  : C'est la perte de l'amortissement des matériels en panne.
- Energie consommée  $P_e$  : C'est une pure perte.  
Le coût de défaillance  $C_d$  est alors :

$$C_d = P_p + P_m + P_a + P_e,$$

avec :

- $P_p$  : Coût de perte de production.
- $P_m + P_a + P_e$  : Coût de réparation.

### 6.2 Coût du préventif $C_p$ :

Il se compose des coûts suivants :

- Coût des salaires  $C_s$  : Qui représente les salaires directs et indirects.
- Coût d'amortissement  $C_a$  : Amortissement du matériel d'entretien ramené à l'heure.
- $T$  est la durée d'intervention (ce temps concerne la sous-traitance).
- Coût de stockage de la pièce de rechange  $C_0$ .
- Coût des pièces et matières  $C_m$ .

Les coûts de l'entretien préventif est alors :

$$C_p = (C_s + C_a) \cdot T + C_0 + C_m.$$



### 6.3 Bilan des coûts

Le bilan est représenté dans la figure 3.4.

Notons que [11] :

- Peu de maintenance entraîne une augmentation des nombres de défaillances, donc une augmentation des arrêts et des pertes de production importantes. Autrement dit, dans ce cas de figure, le coût de production augmente et le coût de maintenance (l'argent dépensé pour éviter les défaillances) diminue.
- Trop de maintenance entraîne une élévation des dépenses de maintenance et une diminution des pertes de production et par voie de conséquence une diminution du coût de production.

La courbe illustre le coût total (coût de la maintenance + coût de défaillance). Elle montre bien l'existence d'une maintenance optimale, c'est-à-dire une maintenance effectuée à moindre coût et qui assure une bonne disponibilité des équipements. Pour effectuer ces choix stratégiques, des méthodes permettant d'optimiser les stratégies de maintenance sont appliquées. Ainsi, on peut définir l'optimisation de la maintenance comme étant un processus conduisant à la prise d'un ensemble de mesures pour assurer une meilleure efficacité.

Dans le cas de la maintenance, objet de notre étude, l'intérêt de l'optimisation est d'assurer une meilleure disponibilité des équipements à un meilleur coût, c'est-à-dire en dépensant le moins possible.

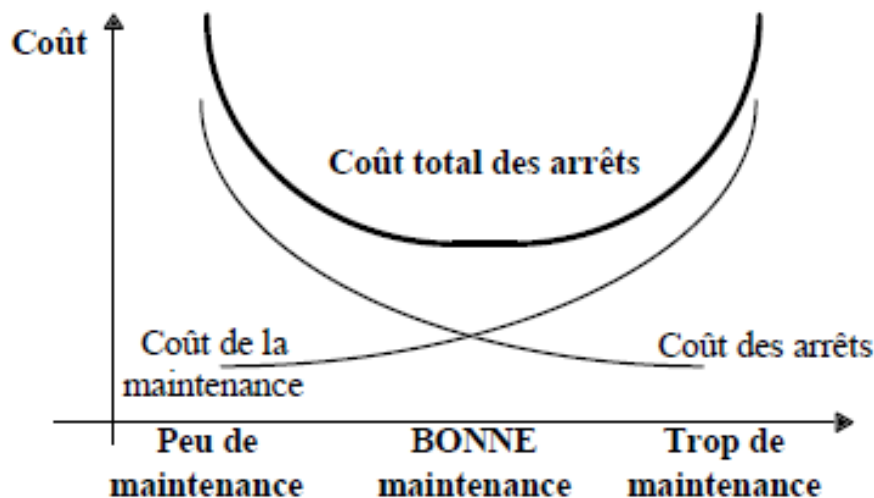


FIG. 3.4 – Bilan des coûts.

### 7. Choix entre le préventif et le correctif

Avant de choisir entre la maintenance préventive et la maintenance corrective, une justification économique s'impose. Cette étude prendra en considération : des éléments à caractère économiques (coûts de maintenance, coûts d'indisponibilité et les coûts de défaillance) et les éléments à caractères techniques (la fiabilité).

Il faut répondre à la question suivante : quel type de maintenance choisir ? La corrective ou la préventive ?

**-La première solution :** Réaliser une maintenance corrective.

Cette solution impose d'attendre la défaillance. Le coût total de l'intervention ( $C_T$ ) sera égal au : coût de l'intervention de maintenance corrective  $C_c$  + coût d'indisponibilité dû à la défaillance  $C_d$ .

$$C_T = C_c + C_d.$$

Le coût moyen par unité de temps est donné par [11] :

$$G_c = \frac{C_p + C_d}{MUT}$$

**-La deuxième solution :** Réaliser une maintenance préventive.

Cette solution impose de remplacer systématiquement le composant au bout d'un temps d'usage  $T$ . Le coût total de l'intervention ( $C_T$ ) sera égal à : Coût de l'intervention de maintenance préventive systématique  $C_p$  + coût d'une défaillance éventuelle  $[1 - R(T)]C_d$ .

$$C_T = C_p + C_d[1 - R(T)].$$

Le coût moyen par unité de temps est donné par [11] :

$$G(T) = \frac{C_p + [1 - R(T)]C_d}{\int_0^T R(t)dt},$$

où

- Le numérateur représente l'espérance du coût total du cycle et le dénominateur représente l'espérance de la longueur du cycle.
- $T$  est l'âge du remplacement préventif (variable de décision).
- $C_p$  le coût du remplacement préventif.
- $C_d$  le coût de défaillance incluant le coût de remplacement.
- $R(t) = 1 - F(t)$  est la fonction de fiabilité ou de survie.

Pour le choix entre le préventif et le correctif, il faut comparer le coût de la maintenance (de remplacement de l'élément)  $C_p$  et celui de défaillance  $C_d$  du même élément en service. S'agissant de défaillances d'usure (taux de défaillance

croissant); la valeur du rapport  $r = \frac{C_d}{C_p}$  influence les résultats. Pour  $r \geq 1$  la maintenance préventive systématique est rentable.

### 8. Calcul des temps optimums de remplacement

Nous appliquerons la maintenance préventive systématique lorsque  $G(t) < G_c$ , c'est-à-dire lorsque  $\frac{G(t)}{G_c} < 1$ . Le temps optimum de remplacement serait celui qui minimiserait le coût  $G(t)$ . Il serait la solution de la relation :

$$\frac{dG(t)}{dt} = 0,$$

avec :

$$\frac{d^2G(t)}{d^2t} > 0.$$

### 3.3.3 Les méthodes ” Risk Based ” ou ” Risk Informed ”

Aux Etats-Unis, au niveau des centrales nucléaires. Le besoin de mieux cerner les risques, de réduire les coûts de maintenance, et de diminuer autant que possible l'exposition du personnel aux radiations, a conduit à deux approches. L'une appelée Risk Based (ou Risk Informed) In Service Inspection (RB-ISI) appliquée aux matériels passifs (cuve, tuyauteries), l'autre appelée Risk Based In Service Testing (RB-IST) appliquée aux matériels actifs (pompes et des robinets) [20].

#### – Principe du RB-ISI (Risk Based In Service Inspection)

L'objectif de la méthode RB-ISI est de déterminer les zones des tuyauteries qu'il est utile d'inspecter, puis de savoir comment et avec quelle fréquence il convient de le faire. La méthode consiste à déterminer les éléments de structure susceptibles d'être concernés par une inspection après l'analyse du système.

#### – Principe du RB-IST (Risk Based In Service Testing)

Les programmes In Service Testing appliqués aux pompes et aux robinets des systèmes de sûreté des centrales nucléaires ont pour objectif de vérifier qu'un matériel est en mesure d'accomplir ses fonctions ou de détecter des dégradations qui peuvent entraîner des défaillances.

Ces interventions comprennent les essais mais également les autres tâches de maintenance préventive.

### 3.3.4 Méthode Total Productive Maintenance (TPM)

Appelée aussi méthodes japonaises ou méthode centrées sur l'organisation et la recherche de bonnes pratiques. Nakajima [10] définit la TPM comme une approche où tous les employés participent à la maintenance préventive par des activités d'équipes. C'est la définition qui est adoptée d'emblée dans la littérature sur la TPM. Il ajoute que le terme " Total " de TPM a trois significations : le rendement global des installations, un système global de réalisation et une participation de tout le personnel. La TPM vise à modifier la manière de penser des employés vis-à-vis de la maintenance et à améliorer leur niveau de connaissance [8]

#### 3.4.1 Historique

L'origine du terme total productive maintenance n'est pas clairement définie. Certains l'attribuent à des producteurs américains dans les années 60. La littérature TPM a commencé à se constituer à la fin des années 80 avec des livres et des articles écrits par des japonais et des américains. La plus grande conférence sur la TPM a eu lieu aux Etats-Unis en 1900 [17].

#### 3.4.2 La notion de la TPM :

La TPM implantée au Japon en 1971, s'intègre tout à fait dans une vision systémique de l'entreprise. Elle implique un décroisement des services en faisant participer le personnel de production aux tâches de maintenance. Elle vise ainsi à atteindre zéro panne.

La Total productive maintenance signifie :

- ✓ **Maintenance** : Maintenir en bon état = réparer, nettoyer, graisser et accepter d'y consacrer le temps nécessaire.
- ✓ **Productive** : Essayer de l'assurer tout en produisant ou en pénalisant le moins possible de production.
- ✓ **Total** : Considérer tous les aspects et d'y associer tout le monde.

#### 3.4.3 Objectifs :

- La TPM est née à partir du constat selon lequel les investissements en machines de production sont généralement loin de fabriquer les quantités prévues lors de leur conception.
- La TPM propose des solutions à la fois de rentabilité optimale des équipements et l'adaptation des structures et des modes de gestion des usines.
- Les opérateurs sont chargés de tâches de maintenance de premier niveau (nettoyage, lubrification, ...) autrement dit les opérateurs sont responsables de leurs machines.

- Le service maintenance intervient comme spécialiste pour les tâches les plus complexes.
- Maximiser le TRG (Taux de Rendement Global) qui est le rapport entre le temps net de production et le temps d'ouverture.
- Optimiser les coûts d'exploitation des équipements durant leur durée de vie.
- Mobiliser l'ensemble du personnel de production autour de la qualité totale.
- Chercher les individus de l'entreprise qui vont nous permettre de :
  - ✓ Connaître le coût des aléas.
  - ✓ Connaître le temps consacré à tous les niveaux de maintenance (préventive ou curative).
- Déterminer avec précision les coûts de non qualité.

Comme on l'a déjà signalé, l'un des objectifs de la TPM est d'avoir de 17 à 0 pertes qui sont divisées en trois catégories :

(a) Celles dues au manque de fiabilité des équipements :

- ✓ Pannes ;
- ✓ Réglage ;
- ✓ Perte au démarrage ;
- ✓ Micro-arrêts ;
- ✓ Marche à vide ;
- ✓ Sous vitesse ;
- ✓ Rebus et retouche ;
- ✓ Arrêts programmés.

(b) Celles dues à la carence de l'organisation :

- ✓ Temps de changement de fabrication ;
- ✓ Activité opérateur ;
- ✓ Déplacement et manutention ;
- ✓ Organisation du poste ;
- ✓ Défauts de logistique ;
- ✓ Excès de mesure.

(c) Celles dues aux méthodes et procédés :

- ✓ Rendement des matériaux ;
- ✓ Rendement énergétique ;
- ✓ Surconsommation d'outillages, d'accessoires et de lubrifiants.

### 3.4.4 Les principes de la TPM :

1. Le niveau élevé de rendement des machines par la maintien d'un parfait état fonctionnel (pas de compromis avec l'état de référence).
2. Les enseignements tirés des améliorations du rendement sont systématiquement exploitées pour concevoir les machines de demain dans une démarche de progrès continu.
3. Le maintien de l'état de référence relève d'abord de responsabilité du personnel utilisateur de fabrication.
4. La valorisation de l'amélioration de l'existant par différence avec la productivité par l'investissement.
5. Le niveau élevé de rendement implique au-delà de l'entretien classique, la réduction drastique de toutes les causes de sous utilisation relevant de l'organisation directe et indirecte de l'emploi des équipements.

### 3.4.5 Les huit piliers de la TPM :

1. **La gestion autonome des équipements** : Respecter les conditions de base d'utilisation des équipements.
2. **L'amélioration au cas par cas** : Supprimer les causes de pertes de rendement dues à l'organisation.
3. **La maintenance planifiée** : Prévenir les défaillances naturelles.

#### **Critères de choix de la politique de maintenance :**

Le taux de défaillance des composants, souvent représentée par la courbe en baignoire, nous permet de distinguer 3 périodes :

1. **Infantile** due à une mauvaise qualité des composants ou une mauvaise qualité de montage. Cette période n'est pas concernée par la maintenance préventive. Mais il faut être conscient que chaque fois que l'on remplace un composant suite à une maintenance préventive ou corrective, on risque de se retrouver dans cette période.
2. **Vie utile** ou de pannes dites paralysés. Le taux d'avarie est constant, les pannes surviennent de façon aléatoire, imprévisible, d'où leur nom. Elles sont franches et subites et ne sont précédées d'aucun signe précurseur. Ce qui signifie qu'il n'est pas possible de prévoir la défaillance donc de faire de la maintenance préventive. C'est le cas typique du matériel électronique et des phénomènes de rupture.

Le remplacement systématique du composant n'apporterait aucune fiabilité supplémentaire et risquerait au contraire de nous faire revenir à la période infantile. Il n'y a donc pas de maintenance préventive possible.

3. **Vieillessement** (le taux d'avarie augmente avec la durée totale d'utilisation du matériel). Les phénomènes de vieillissement évoluent en général lentement et sont accompagnés de signes précurseurs. Cette période est caractéristique des phénomènes d'usure, de corrosion et de fatigue. Durant cette période la maintenance préventive peut être appliquée.
4. **Amélioration du savoir-faire et des connaissances** : Améliorer les connaissances et le savoir-faire des opérateurs et des techniciens de maintenance.
5. **Sécurité-conditions de travail et environnement** : Maîtriser la sécurité, les conditions de travail et le respect de l'environnement.
6. **Maîtriser la qualité** :
  - Disposer d'équipements qui ne subsistent que des détériorations naturelles.
  - Prévenir les défaillances naturelles.
  - Appliquer la TPM aux nouveaux produits et équipements.
  - Avoir des opérateurs de production et des techniciens de maintenance très compétents.
  - Avoir des fournisseurs qui se considèrent comme partenaires de la qualité de l'entreprise.
7. **Maîtrise et conception** : La TPM rejoint la notion d'ingénierie simultanée et vise à ne plus accepter de modifications du produit ou de l'équipement après la phase de pré-industrialisation.
8. **Application de la TPM dans les bureaux** : Les services techniques et administratifs doivent avoir pour objectifs de fournir à la production les informations et supports nécessaires à l'amélioration de sa compétitivité, tout en diminuant les tâches administratives.

### 3.4.6 Les principales étapes de la TPM :

*Le Japon Institute of Plant Management*, propose l'introduction de la TPM en 12 étapes [4] :

1. Prise de décision par la direction générale d'appliquer la TPM.
2. Compagne d'information technique : Cette deuxième étape a pour objectif de faire acquérir au personnel une connaissance commune et précise de :  
La nature générale de TPM, les enjeux et les objectifs, le déroulement général d'un programme type TPM, un langage commun.

3. Mise en place d'une structure de promotion de la TPM.
4. Diagnostic général sur les équipements : Egalement appelée nettoyage initial, cette étape consiste en fait en un constat minutieux de l'état de dégradation de tous les organes de la machine, état de dégradation se manifestant par des usures, des fuites, des salissures, ...etc. Il s'agit donc plus d'une inspection de la machine, au-delà du plaisir de la propreté.
5. Etablissement d'un plan de travail général (à moyen terme). La nature des différents travaux techniques et organisationnels découlant de l'implantation de TPM, les ressources nécessaires et la durée obligatoire interdisent l'improvisation et impliquent l'élaboration d'un programme directeur préalable.
6. Lancement des opérations prévues.
7. Amélioration de la disponibilité de chaque machine retenue : Cette étape se réalise sur la base de la participation des opérateurs et techniciens concernés, organisés en groupe de travail restreints.
8. Développement de la maintenance autonome : Cette étape a pour objectif de mettre en place les conditions de base nécessaires pour que la fabrication soit en mesure d'assurer une partie de la maintenance systématique des équipements qu'elle a à conduire.
9. Optimisation économique du nouveau service maintenance : La maintenance programmée a pour objectif de définir et d'appliquer les contenus techniques de maintenance non couverts par les contenus de la maintenance autonome, assurer le maintien de l'état des équipements et la gestion de leur évolution à moyen terme.
10. Formation complémentaire des opérateurs : Il s'agit ici de consolider et pérenniser les acquis par le perfectionnement des opérateurs de fabrication et de maintenance et des niveaux d'encadrement direct aux pratiques de maintenance et à la connaissance des équipements. La formation est l'outil privilégié.
11. Adaptation du système de gestion de la conception des équipements : C'est à ce stade, qu'il sera possible de passer aux modifications de conception des équipements existants en vue d'améliorer, soit les paramètres conditions du processus (débit, KHW, ...etc.), soit la maintenabilité ou fiabilité.
12. Quelles que soient la nature et la qualité des structures en place à la fin du programme initial, il sera capables de fédérer et de focaliser les différentes contributions vis-à-vis d'un objectif commun.

Par ailleurs, la consolidation permet de maintenir l'esprit de progrès continu propre à toute démarche que l'on souhaite pérenne.

C'est seulement dans cet esprit que la Totale Productive Maintenance pourra être maintenue et développée.



### 3.4.7 Le principe des 5S :

Un travail efficace de qualité nécessite un environnement propre de sécurité et de rigueur. Les 5S permettent de construire un environnement de travail fonctionnel, régi par des règles simples, précises et efficaces. Les 5S représentent les cinq premières lettres des mots japonais [9] :

- **Seiri :**

Trier : garder le strict nécessaire sur le poste, séparer l'utile de l'inutile, éliminer tout ce qui est inutile sur le poste de travail et son environnement.

- **Seiton :**

Arranger : réduire les recherches inutiles. Disposer les objets utiles de manière fonctionnelle, s'astreindre à remettre en place les objets, donner un nom et une place bien définie aux outils, réaliser des accessoires et supports permettant de trouver les outils rapidement et plus largement, définir les règles de rangement. Le seiton s'illustre par cette célèbre maxime :

*Une place pour chaque chose et chaque chose à sa place*

- **Seiso :**

Le nettoyage régulier. Dans un environnement propre, une fuite ou toute autre anomalie se détecte plus facilement et plus rapidement.

Après le premier grand nettoyage, étape obligé de l'introduction des 5S, il faut en assurer la continuité.

- **Seiketsu :**

Standardiser : respecter les 3S précédents.

Les 3 premiers S sont des actions à mener. Elles sont le plus souvent exécutées sous la contrainte (hiérarchique). Le seiketsu aide à combattre la tendance naturelle au laisser aller et le retour aux vieilles habitudes.

- **Shitsuke :**

Suivre et faire évoluer.

Finalement pour faire vivre les 4 premiers S, il faut surveiller régulièrement l'application des règles, les remettre en mémoire, et corriger les dérives. En instituant un système de suivi avec affichage d'indicateurs, les désormais 5S sont assurés de continuer à vivre, mais aussi de repousser graduellement leurs limites initiales dans une démarche d'amélioration continue.

### 3.4.8 Les indicateurs de performance :

Pour améliorer le rendement des installations, il faut :

- prolonger le temps de marche des installations c'est à dire réduire les temps d'arrêt.
- augmenter la production de bons produits et diminuer les défauts de fabrication c'est-à-dire amener des améliorations sur les installations pour diminuer les défauts de fabrication.

#### Taux de Rendement Global TRG :

Le rendement global des machines est l'indicateur de leur bonne santé.

Le TRG est le rapport entre la quantité de bons produits fabriqués et la quantité de produits que l'on aurait pu fabriquer dans les conditions idéales (conditions de fonctionnement sans aléas, sans perte d'efficacité).

Le taux de rendement (TRG) est obtenu par le produit de trois facteurs :

**TRG = Taux de marche calendaire × Taux d'allure × Taux de produits conformes**

- **Taux de marche calendaire :**

Le taux de marche calendaire est le pourcentage de temps où la ligne est effectivement en fonctionnement, comparé à son temps total d'ouverture. Le taux de marche calendaire tient compte des temps d'arrêts dus aux pannes, aux réglages, aux arrêts mineurs et aux démarrages.

Si d'autres causes d'arrêt existent, c'est ici qu'elles seront prises en compte.

Le taux de marche calendaire est calculé de la façon suivante :

1. **Calcul du " temps de charge " (ou " temps d'ouverture ") :** il s'agit du temps de fonctionnement quotidien, normalement prévu pour l'installation (la base du calcul pourra également être hebdomadaire ou mensuelle, choisie en fonction de la précision de mesure des temps) :

**Temps de charge = temps total ouvrable - temps des arrêts programmés.**

2. **Calcul du " temps de marche " :** il s'agit du temps pendant lequel l'installation a réellement fonctionné (et à l'allure normalement prévue) :

**Temps de marche = temps de charge - temps d'arrêts**

3. **Temps de marche calendaire :** c'est le rapport entre le temps de marche et le temps de charge :

**Taux de marche calendaire = temps de marche / temps de charge.**

- **Taux d'allure :**

Le taux d'allure est le rapport entre la vitesse réelle de fonctionnement choisie pour la ligne et la vitesse maximale :

**Taux d'allure = allure réelle / allure nominale.**

Pour simplifier la présentation, il est considéré que l'allure réelle, choisie par la production, est toujours la même pendant la période de calcul (jour, semaine ou mois) ;

Si plusieurs allures sont utilisées pendant cette période, elle sera divisée en sous-périodes ; les sous-périodes seront choisies de façon à ce qu'une seule allure soit utilisée pendant la sous-période ; le calcul présenté ici sera alors effectué pour chaque sous-période, puis ramené à la période complète par un barycentre (exemple pour une période divisée en deux sous-périodes A et B, de durées " temps A " et " temps B " ) :

- **Taux de produits conformes**

Le taux de produits conformes est le rapport entre le nombre de produits conformes réellement obtenus et le nombre théorique de produits qui auraient du sortir conformes, compte tenu des matières premières utilisées :

**Taux de produits conformes = Nb de produits conformes / Nb de produits théorique**

En fonction du type de fabrication, une quantité non-négligeable de produits rachetables pourra être fabriquée ;

Dans ce cas, pour un calcul exact du " taux de rendement " de la ligne, la période du calcul (jour, semaine ou mois) devra être choisie pour que la réparation des produits concernés soit également effectuée pendant la période de calcul.

Nous avons donc déterminé le taux de rendement par :

**TRG = Taux de marche calendaire × Taux d'allure × Taux de produits conformes.**

**Ordres de grandeur**

Le taux de rendement dépend du type de fabrication et du procédé ; il n'y a donc pas de taux de rendement standard applicable à toutes les installations.

Néanmoins, les ordres de grandeur suivants doivent être au moins obtenus :

- Taux de rendement TRG de 85% (composé des trois taux ci-dessous),
- Taux de marche calendaire de 85%,
- Taux d'allure de 75%,
- Taux de produits conformes de 95%.

Si une de ces valeurs n'est pas atteinte, une source de gains considérables est disponible et une démarche de type TPM est particulièrement indiquée.

Les principes de base pour le calcul du TR sont présentés ci-dessus ; des éléments supplémentaires rentrant dans le calcul théorique exact du TR ; assez complexes et d'une influence finalement assez faible sur le résultat, ont été volontairement omis ou simplifiés.

Seuls les principaux composants, influents dans le calcul du TR, ont été conservés ; cette approche permettra d'effectuer une mesure fiable et rapide du TR de vos installations.

**Exemple de calcul du TRG :**

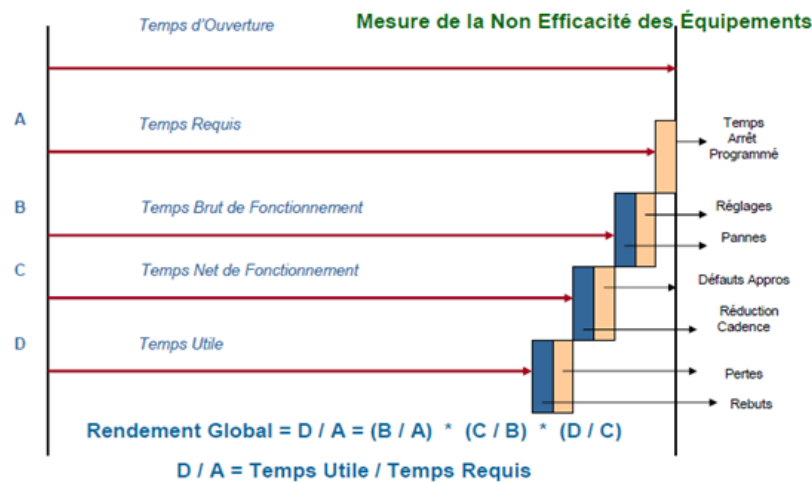


FIG. 3.5 – Taux de Rendement Global.

### 3.4.9 Synthèse sur la TPM :

La démarche TPM peut s'appliquer dans les entreprises de production de toutes tailles et de tous secteurs d'activités, à partir du moment où elles possèdent un outil de fabrication nécessitant des actions de maintenance.

La démarche TPM a pour objectif la rentabilité maximale des équipements ; elle cherchera donc à diminuer les pertes de rendement de l'outil de production.

Les causes de pertes et la conduite à tenir pour les réduire sont présentées dans le tableau suivant :

<b>Causes de pertes</b>	<b>Conduite à tenir</b>
Pannes	Amélioration de l'outil de production en supprimant les causes de pannes. Organisation de la maintenance préventive.
Réglages	Modification de l'outil de production pour rechercher des temps de réglages aussi courts que possible.
Arrêts mineurs	Modification de l'outil de production pour rechercher à supprimer les arrêts mineurs.
Ralentissements	Faire fonctionner la ligne à une allure aussi proche que possible de son allure maximale.
Défauts qualité	Tendre vers le " zéro défaut " : amélioration de l'outil de production, de l'organisation, des points de contrôles.
Démarrages	Modification de l'outil de production et de l'organisation pour obtenir des temps de démarrages aussi courts que possible.

TAB. 3.1 – Les causes de pertes et la conduite.

# Chapitre 4

## Application

### 4.1 Introduction

Notre application porte sur une chaîne de production d'huile (1 Litre) de l'usine Cevital. L'analyse de Pareto (appelée aussi analyse ABC) permet de déterminer les équipements qui engendrent le maximum d'arrêts. Par la suite, on passe à l'ajustement des temps d'arrêt et des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle des équipements révélés par l'analyse ABC, en vu de déterminer les indices de fiabilité de ces équipements (Souffleuse, Diviseur, Fardeleuse, Palettiseur et Remplisseuse).

Enfin, on passe à l'application de la méthode OMF et la TPM afin de choisir entre la maintenance préventive et la maintenance corrective et de pouvoir évaluer l'efficacité de la chaîne ainsi que les compétences du personnel.

### 4.2 Les étapes de conditionnement

Les différentes étapes sont schématisées dans la figure suivante :

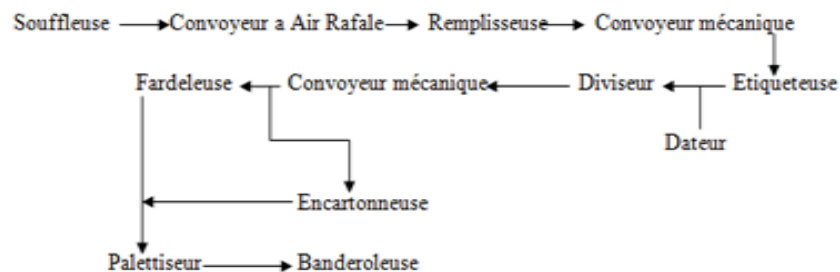


FIG. 4.1 – Les étapes de conditionnement.

la tâche de chaque machine est :

1. **Souffleuse** : Les souffleuses sont des machines destinées à la fabrication des bouteilles à partir des préformes qui ont une structure de tube, fabriquées dans l'unité plastique.
2. **Convoyeur à air rafale** : Les convoyeurs à air rafales sont des dispositifs destinés au transport des petites bouteilles en PET vides (un ou deux litres) de la souffleuse jusqu'à la sou-tireuse garantissant un air propre (remplisseuse) ; le transport est assuré par un soufflage d'air produit par les colonnes de ventilation équipées par des filtres.
3. **Remplisseuse** : Les remplisseuses sont les unités chargées du remplissage des bouteilles du produit fini (l'huile) dont la vitesse de remplissage peut varier. La remplisseuse est constituée essentiellement de la cuve qui est remplie d'huile à partir des bacs journaliers par les pompes de soutirage.
4. **Convoyeur mécanique** : Permet de transporter des objets divers d'un point à un autre d'usine.
5. **Étiqueteuse** : Les étiqueteuses sont destinées à coller des étiquettes enveloppantes sur des récipients cylindriques portant des informations sur le produit et le fabricant.
6. **Dateurs** : Ils servent à mentionner la date et l'heure de fabrication d'un produit.
7. **Déviateur de bouteille** : Ce sont des mécanismes destinés à répartir les bouteilles sur différents couloirs d'une manière homogène pour qu'elles soient regroupées dans des paquets enveloppés par la suite.
8. **Fardeuse** : La fardeuse est la machine qui reçoit les bouteilles et les enveloppe dans un film en silicone.
9. **Encartonneuse** : Met les bouteilles d'huiles en carton pour l'exportation.
10. **Palettiseur** : Ces machines sont conçues pour superposer sur une palette plusieurs étages de fardeaux.
11. **Banderoleuses** : Ces machines servent à envelopper la charge constituée de la palette et de plusieurs étages de fardeaux dans le but d'assurer la bonne tenue des bouteilles pour tout déplacement. La banderoleuse entoure la charge d'un film en silicone.

### 4.3 Analyse de Pareto

Nous avons considéré les données pour la période allant du 1/12/2014 au 12/05/2015.

- Les temps d'arrêts des équipements / minute.
- Les temps de bon fonctionnement / minute.

Ces données sont traitées automatiquement par le logiciel Access. Ce dernier enregistre les arrêts de la chaîne de production (temps d'arrêt) ainsi que leurs durées, comme il enregistre aussi les causes des arrêts. Nous remarquons qu'il y a un nombre important d'arrêts

dont les causes sont spécifiées (Technique, Hors technique, Qualité). Notons aussi l'existence d'un nombre très important de micros-arrêts (des arrêts de 1 à 5 mn). Nous n'avons considéré, dans ce travail, que les arrêts dus à des causes techniques.

Les résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau suivant :

$N^0$	Machine	Temps d'arrêt Mn	Temps d'arrêt %	Cum d'arrêt %	Nbre pannes	Nbre pannes %	Cum pannes %
<b>1</b>	Souffleuse	9285	47.67	47.67	632	44.19	44.19
<b>2</b>	Palettiseur	2826	14.51	62.18	285	19.93	64.12
<b>3</b>	Diviseur	2235	11.48	73.66	130	9.09	73.21
<b>4</b>	Remplisseuse	1817	9.33	82.99	129	9.02	82.23
<b>5</b>	Fardeleuse	1387	7.12	90.11	121	8.46	90.69
<b>6</b>	Convoyeur mécanique	643	3.30	93.41	31	2.16	92.85
<b>7</b>	Etiqueteuse	472	2.42	95.83	53	3.70	96.55
<b>8</b>	Dateur	457	2.35	98.18	32	2.23	98.78
<b>9</b>	Encartonneuse	248	1.27	99.45	7	0.48	99.26
<b>10</b>	Banderoleuse	82	0.42	99.87	4	0.27	99.53
<b>11</b>	Convoyeur à air rafale	23	0.11	100	6	0.47	100
<b>Totale</b>		19475	100		1430	100	

TAB. 4.1 – Résultats de l'analyse de Pareto.



### 4.3.1 Courbe et diagramme de Pareto

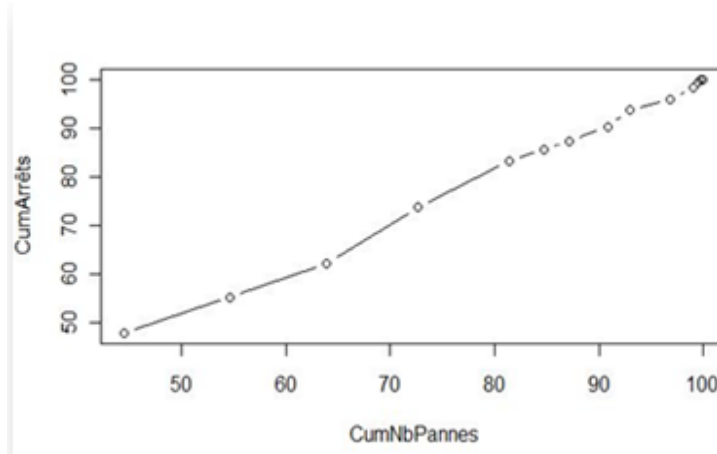


FIG. 4.2 – Courbe de Pareto.

### 4.3.2 Interprétation de l’analyse de Pareto

L’analyse de Pareto a révélé que 90.69% des pannes sont à l’origine de 90.2% des temps d’arrêts.

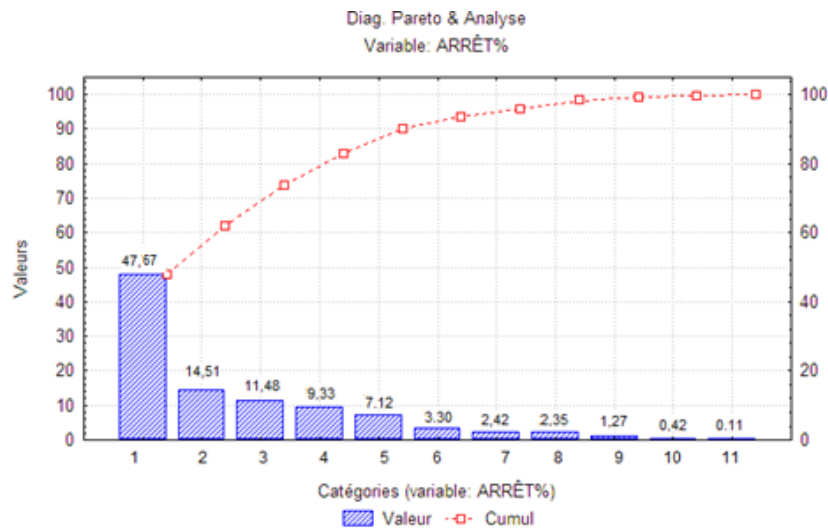


FIG. 4.3 – Diagramme de Pareto.

On constate que 44.19% des pannes sont à l'origine de 47.67% des temps d'arrêts uniquement pour la souffleuse.

L'analyse de Pareto nous a permis également de ressortir les équipements les plus fragiles. Le tableau qui suit représente les équipements que nous allons étudier dans ce travail.

$N^0$	Machine	Temps d'arrêt %	Nbre pannes %
1	Souffleuse	47.67	44.19
2	Palettiseur	14.51	19.93
3	Diviseur	11.48	9.09
4	Remplisseur	9.33	9.02
5	Fardeuse	7.12	8.46

TAB. 4.2 – Les équipements les plus fragiles.

## 4.4 Traitement statistique des données collectées

Nous avons considéré les données journalières allant du 01/12/2014 au 12/05/2015. Le traitement statistique de ces données a été effectué en utilisant le logiciel le STATISTICA (Version 5.1) et R (Version 3.0.3).

### 4.4.1 Ajustement des temps d'arrêt par la loi Exponentielle

A l'aide des tests de Khi-deux et Kolmogorov-Smirnov, nous avons ajusté la variable : temps d'arrêts (minute) par une loi Exponentielle de paramètre  $\theta$ .

1. Souffleuse :

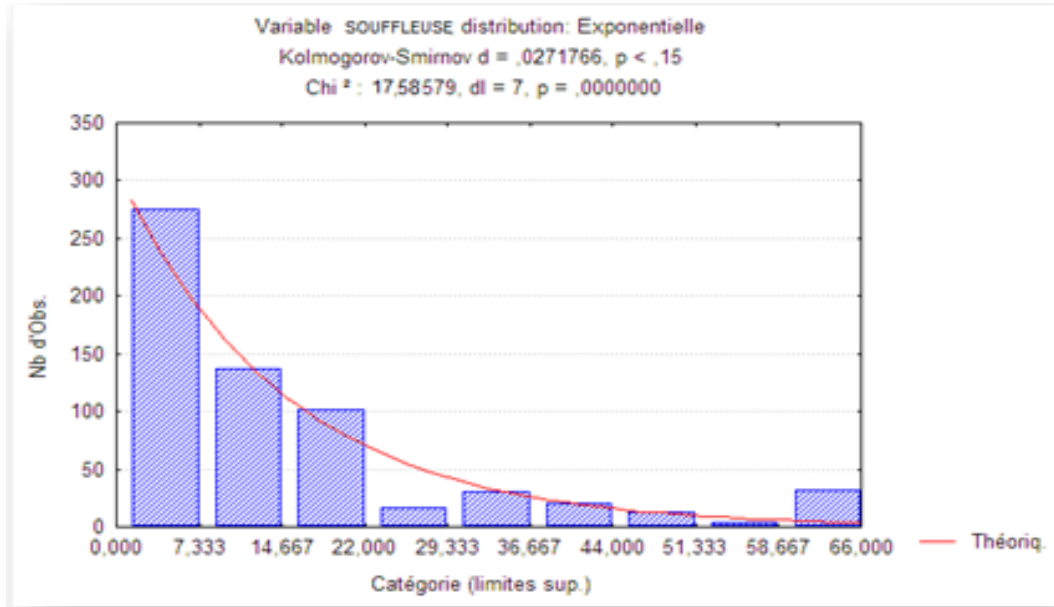


FIG. 4.4 – Ajustement des temps d’arrêts de la souffleuse par la loi Exponentielle.

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$\chi^2$ calculé	$\chi^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Souffleuse Dl=7	Exp	17.58	14.07	9	0.027	0.05	632	$\theta = 0.059$	$\chi^2$ re- jeté KS accepté

TAB. 4.3 – Résultats de l’ajustement de la variable temps d’arrêts de la souffleuse.

$\chi^2$  Calculé : Valeur empirique de la statistique de Khi-Deux.

$\chi^2$  Théorique : Valeur tabulée de la statistique de Khi-Deux au niveau de signification  $\alpha = 5\%$ .

KS calculé : Valeur empirique de la statistique de Kolmogorov-Smirnov.

KS Théorique : Valeur tabulée de la statistique au niveau de signification  $\alpha = 5\%$ .

**Interprétation :**

L'ajustement par la loi Exponentielle de l'équipement Souffleuse donne une statistique de Khi-deux égale à 17.58. Cette valeur est supérieure à la valeur lue dans la table du Khi-deux à savoir 14.07 pour un degré de liberté égale à 7 et un seuil de signification de 5%.

par ailleurs , le test de Kolmogorov-Smirnov donne une statistique égale à 0.027 qui est inférieure à 0.05, lue dans la table de KS au niveau de signification égal à 5%.

Par conséquent, le test de KS permet d'ajuster les temps d'arrêts par la loi Exponentielle , par contre le test de Khi-deux ne le permet pas.

2. Diviseur :

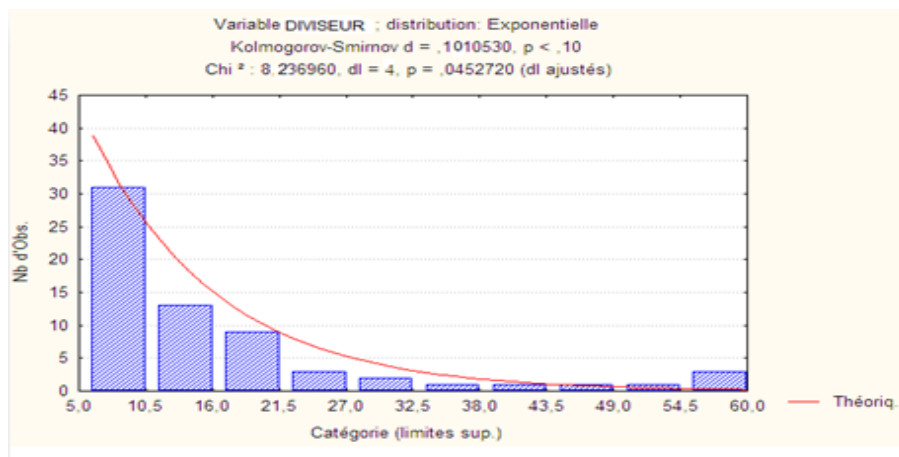


FIG. 4.5 – Ajustement des temps d’arrêts du diviseur par la loi Exponentielle du Diviseur

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Diviseur Dl=4	Exp	8.23	9.49	10	0.101	0.112	130	$\theta = 0.096$	$X^2$ accepté KS accepté

TAB. 4.4 – Résultats de l’ajustement de la variable temps d’arrêts du diviseur.

3. Fardeleuse :

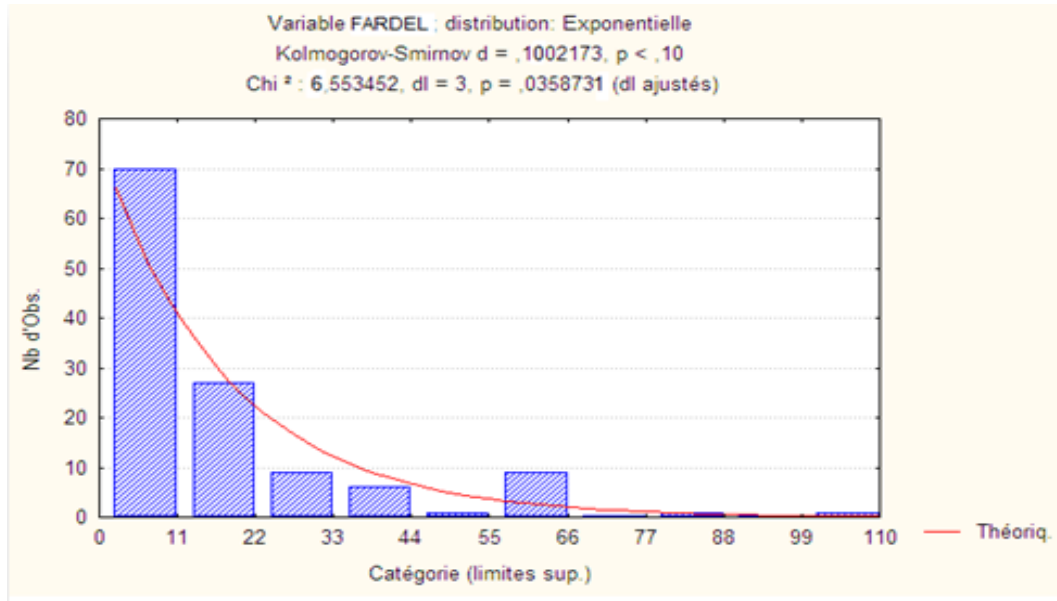


FIG. 4.6 – Ajustement des temps d’arrêts de la fardeleuse par la loi Exponentielle de la fardeleuse .

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Fardeleuse Dl=3	Exp	6.55	7.88	10	0.10	0.12	121	$\theta = 0.058$	$X^2$ accepté KS accepté

TAB. 4.5 – Résultats de l’ajustement de la variable temps d’arrêts du fardeleuse.

4. Palettiseur :

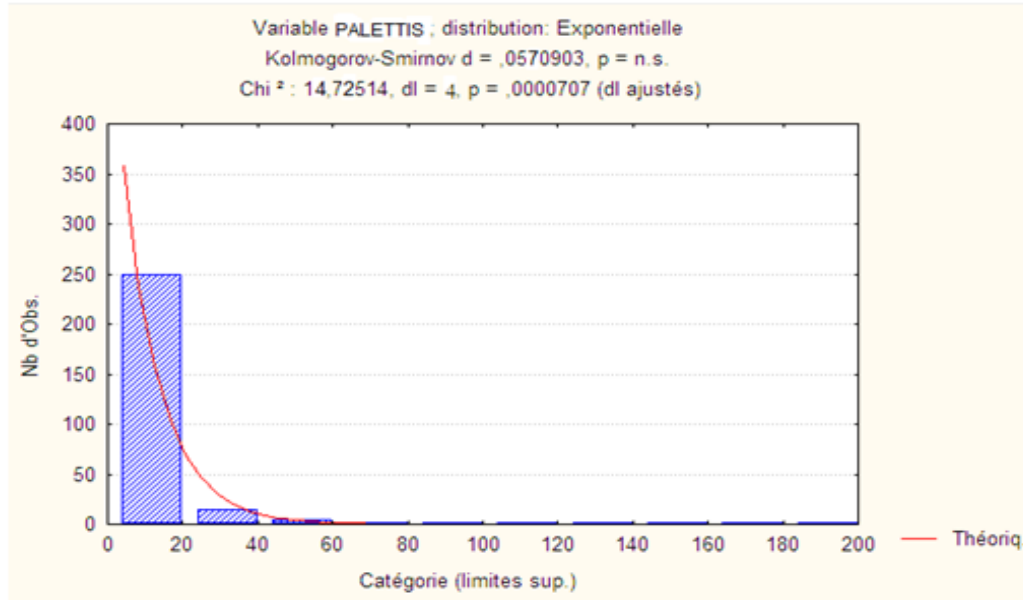


FIG. 4.7 – Ajustement des temps d’arrêts du palettiseur par la loi Exponentielle du palettiseur .

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Palettiseur Dl=4	Exp	14.72	9.49	10	0.057	0.078	285	$\theta = 0.097$	$X^2$ rejeté KS accepté

TAB. 4.6 – Résultats de l’ajustement de la variable temps d’arrêts de la Palettiseur.

5. Remplisseuse

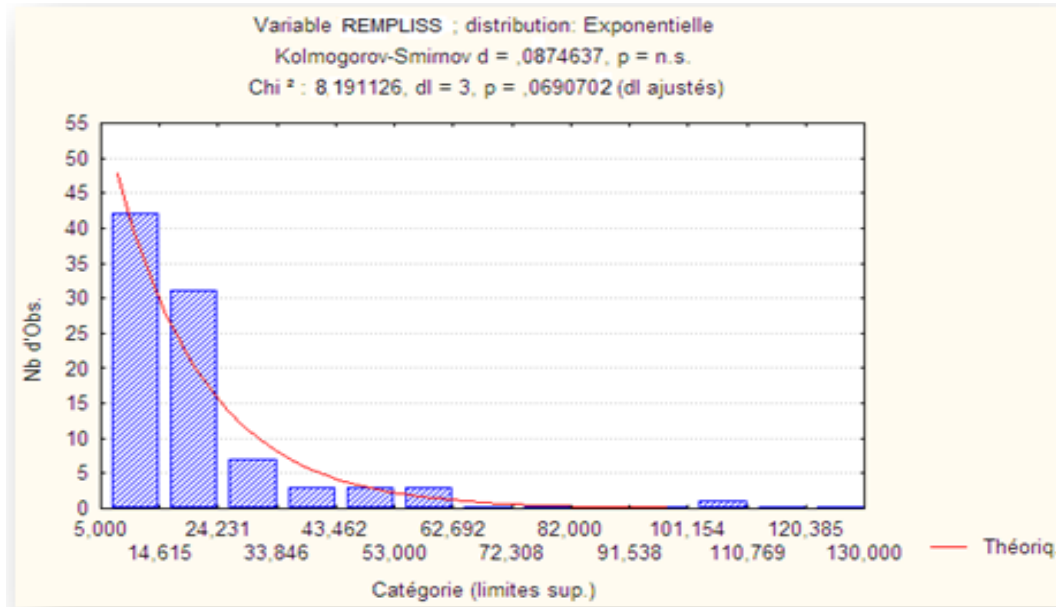


FIG. 4.8 – Ajustement des temps d’arrêts de la remplisseuse par la loi Exponentielle.

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Remplisseuse Dl=3	Exp	8.19	7.81	13	0.087	0.117	129	$\theta = 0.072$	$X^2$ re- jeté, KS accepté

TAB. 4.7 – Résultats de l’ajustement de la variable temps d’arrêts de la Remplisseuse.

**Interprétation des résultats :**

L'ajustement par la loi Exponentielle des équipements : Diviseur et fardeuse donnent des statistiques de Khi-deux inférieures aux valeurs lues dans la table du Khi-deux pour un seuil de signification de 5% ( voir tableaux 4.4 et 4.5 respectivement).

De même, le test de Kolmogorov-Smirnov donne des statistiques inférieures aux valeurs lues dans la table de KS au niveau de signification égal à 5%.

Par conséquent, les deux tests nous permettent d'ajuster les temps d'arrêts par la loi Exponentielle.

L'ajustement par la loi Exponentielle des équipements : Souffleuse, remplisseuse et palettiseur donnent des statistiques de Khi-deux supérieures aux valeurs lues dans la table du Khi-deux pour un seuil de signification de 5% (voir tableaux 4.3, 4.6 et 4.7 respectivement).

Par ailleurs, le test de Kolmogorov-Smirnov donne des statistiques inférieures aux valeurs lues dans la table de KS au niveau de signification égal à 5%.

Par conséquent, le test de KS permet d'ajuster les temps d'arrêts par la loi Exponentielle, par contre le test de Khi-deux ne le permet pas.



#### 4.4.2 Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle

Nous avons procédé à l'ajustement des temps de bon fonctionnement, des équipements révélés par l'analyse de Pareto, par la loi Exponentielle.

Les statistiques de khi-deux pour le diviseur et la fardeleuse sont inférieures aux valeurs lues dans la table du Khi-deux pour un seuil de signification de 5% ( voir tableaux 4.9 et 4.10 respectivement).

De même, le test de Kolmogorov-Smirnov donne des statistiques inférieures aux valeurs lues dans la table de KS au niveau de signification égal à 5%.

Par conséquent, les deux tests nous permettent d'ajuster les temps de bon fonctionnement de ces équipements par la loi Exponentielle.

L'ajustement par la loi Exponentielle de la souffleuse , du Palettiseur et la remplisseuse donnent des statistiques de Khi-deux supérieures aux valeurs lues dans la table du Khi-deux pour un seuil de signification de 5% ( voir le tableau 4.8, 4.11 et 4.12 respectivement).

Par ailleurs, le test de Kolmogorov-Smirnov donne des statistiques inférieures aux valeurs lues dans la table de KS au niveau de signification égal à 5%.

Par conséquent, le test de KS permet d'ajuster les temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle, par contre le test de Khi-deux ne le permet pas.

Nous avons présenté la fonction de fiabilité et le taux de défaillance de chaque équipement (voir figures 4.10, 4.11, 4.13, 4.14, 4.16, 4.17, 4.19, 4.20, 4.22 et 4.23 respectivement).

1. Souffleuse :

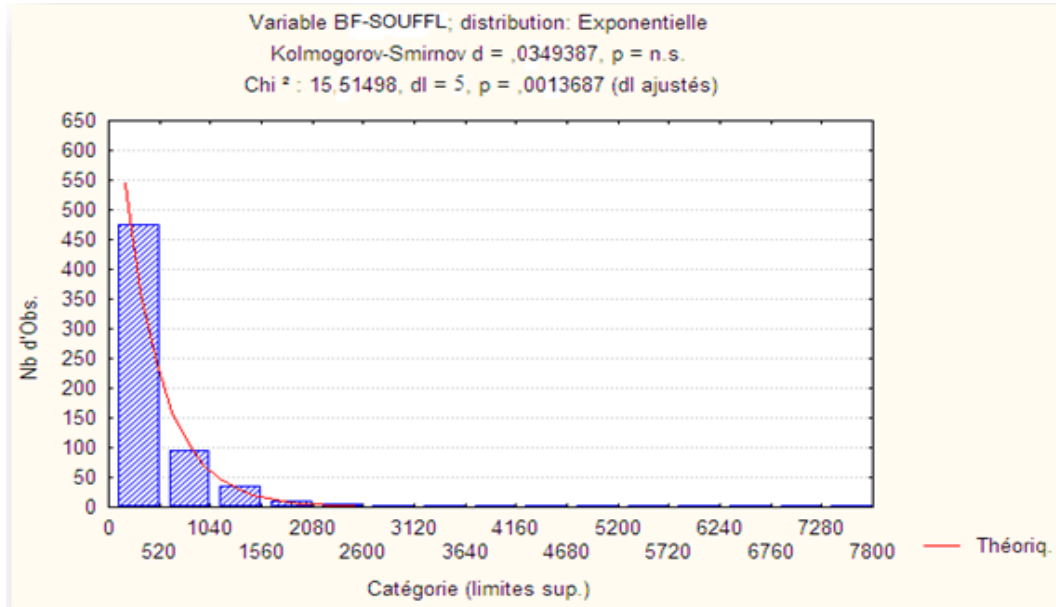


FIG. 4.9 – Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle.

Les résultats de l’ajustement sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Souffleuse Dl=5	Exp	15.51	11.07	15	0.034	0.05	667	$\theta =$ 0.0024	$X^2$ re- jeté KS accepté

TAB. 4.8 – Résultats de l’ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Exponentielle de la souffleuse.

Fonction de fiabilité :

$$R(x) = e^{-\theta x} = e^{-0.0024x}, \quad x \geq 0$$

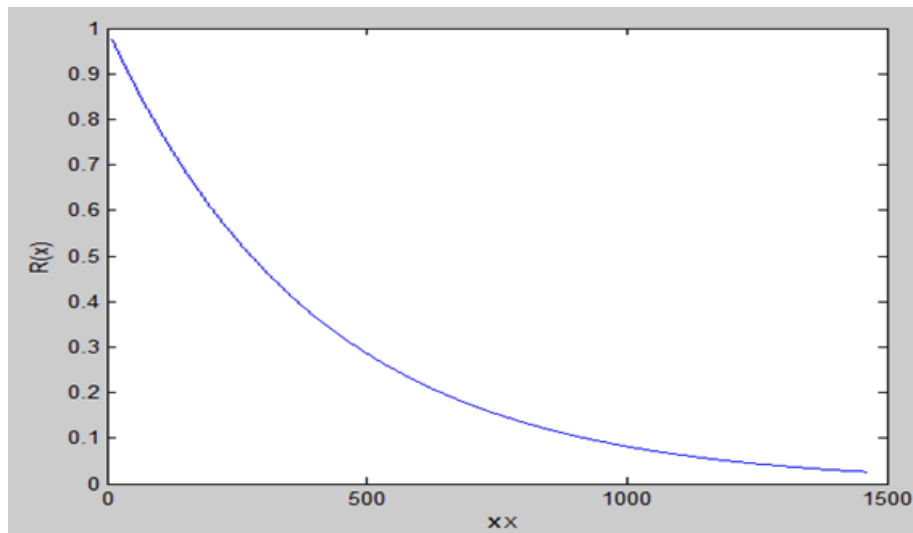


FIG. 4.10 – Fonction de fiabilité de la souffeuse.

Taux de défaillance :

$$\lambda(x) = \theta = 0.0024$$

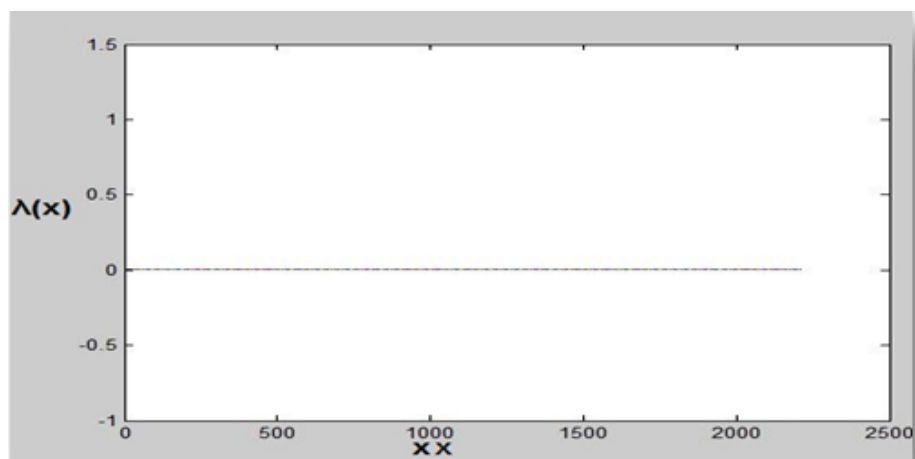


FIG. 4.11 – Taux de défaillance de la Souffleuse.

2. Diviseur

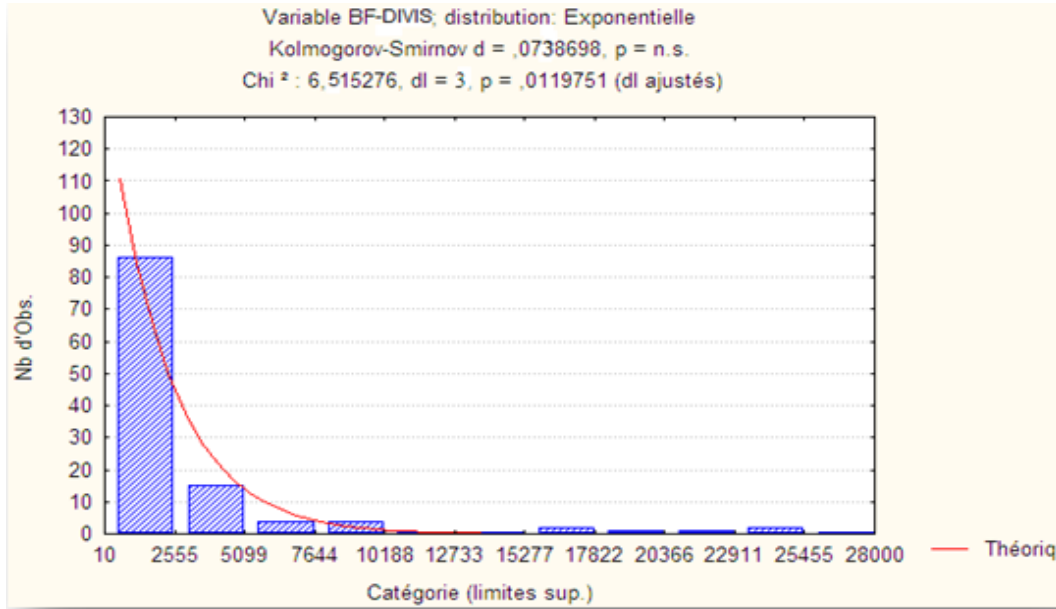


FIG. 4.12 – Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle.

Les résultats de l’ajustement sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Diviseur Dl=3	Exp	6.51	7.81	11	0.073	0.12	121	$\theta = 0.00042$	$X^2$ accepté KS accepté

TAB. 4.9 – Résultats de l’ajustement du variable bon fonctionnement par la loi Exponentielle du diviseur.

Fonction de fiabilité :

$$R(x) = e^{-\theta x} = e^{-0.00042x}, \quad x \geq 0$$

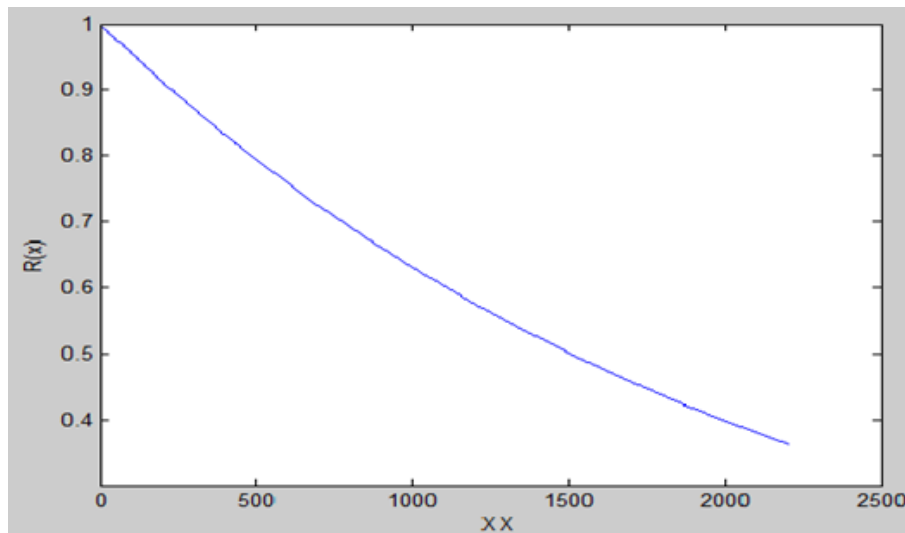


FIG. 4.13 – fonction de fiabilité du Diviseur.

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \theta = 0.00042$$

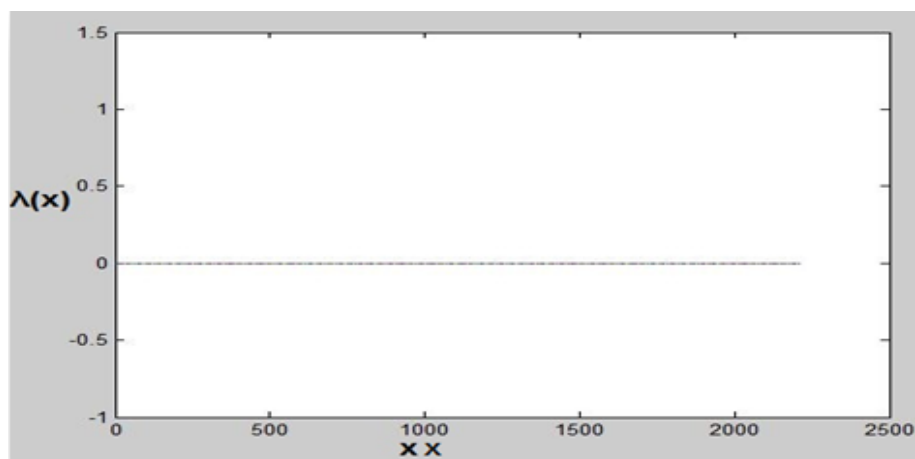


FIG. 4.14 – Taux de défaillance du Diviseur.

3. Fardeleuse :

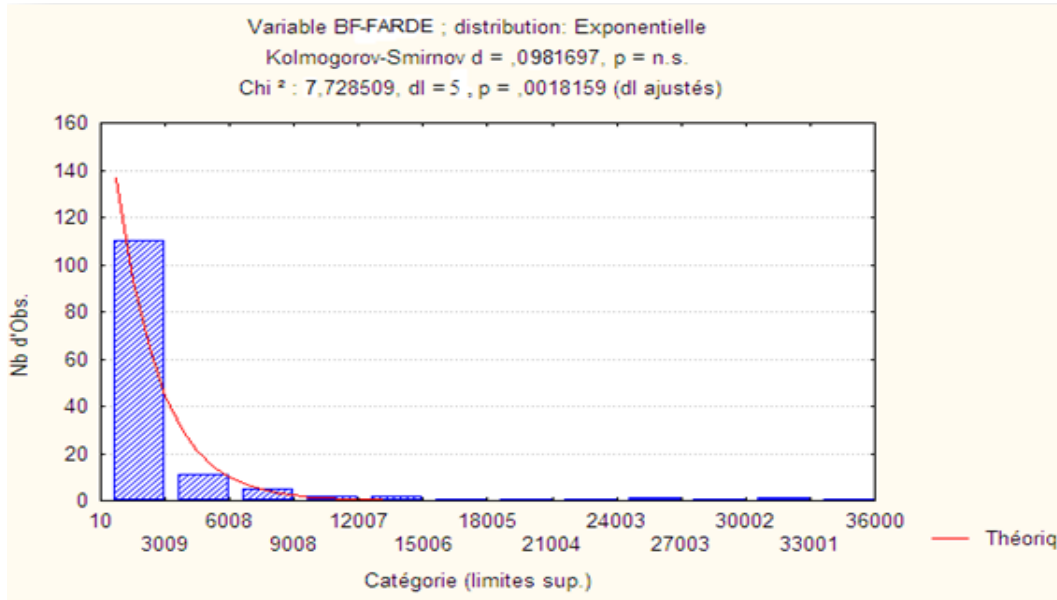


FIG. 4.15 – Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle.

Les résultats de l’ajustement sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Fardeleuse Dl=5	Exp	7.72	11.07	12	0.098	0.112	136	$\theta =$ 0.00045	$X^2$ ac- cepté KS accepté

TAB. 4.10 – Résultats de l’ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Exponentielle de la fardeleuse.

Fonction de fiabilité :

$$R(x) = e^{-\theta x} = e^{-0.00045x}, \quad x \geq 0$$

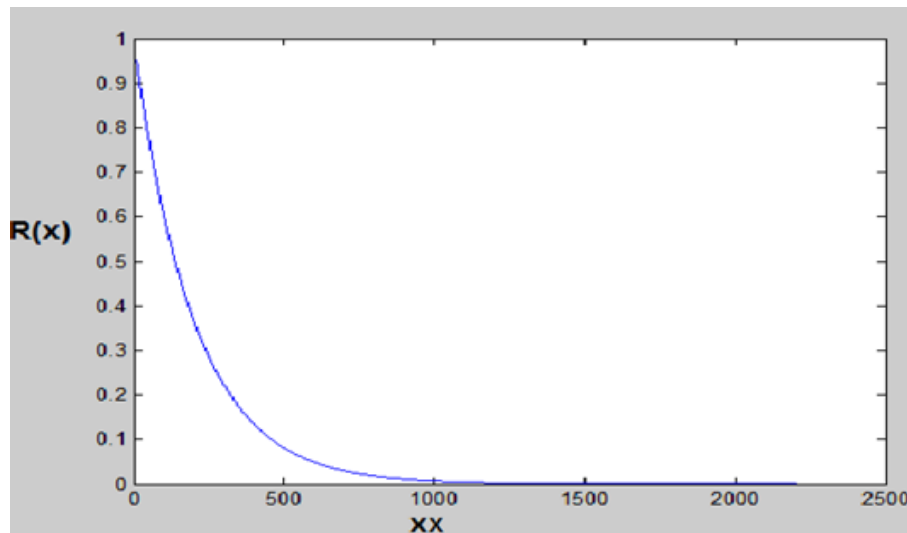


FIG. 4.16 – Fonction de fiabilité de la Fardeleuse.

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \theta = 0.00045$$

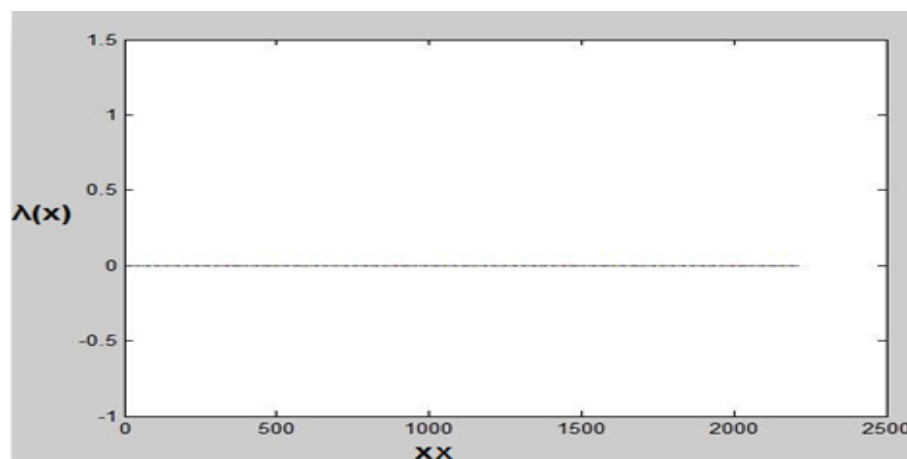


FIG. 4.17 – Taux de défaillance de la Fardeleuse.

4. Palettiseur :

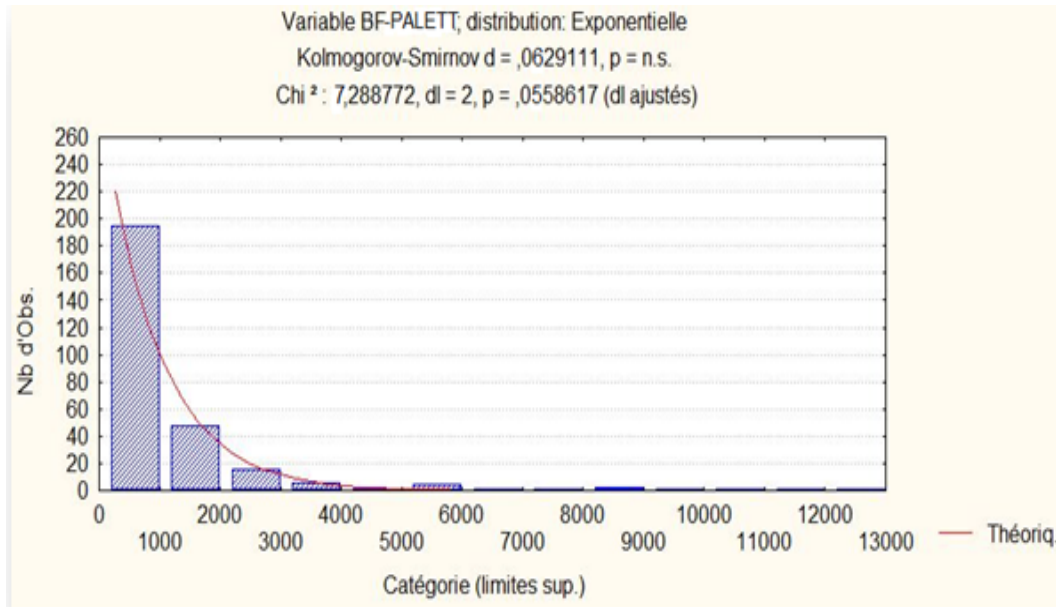


FIG. 4.18 – Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle.

Les résultats de l’ajustement sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Palettiseur Dl=2	Exp	7.28	5.99	13	0.062	0.08	283	$\theta = 0.0013$	$X^2$ rejeté, KS accepté

TAB. 4.11 – Résultats de l’ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Exponentielle de la Palettiseur.



Fonction de fiabilité :

$$R(x) = e^{-\theta x} = e^{-0.0013x}, \quad x \geq 0$$

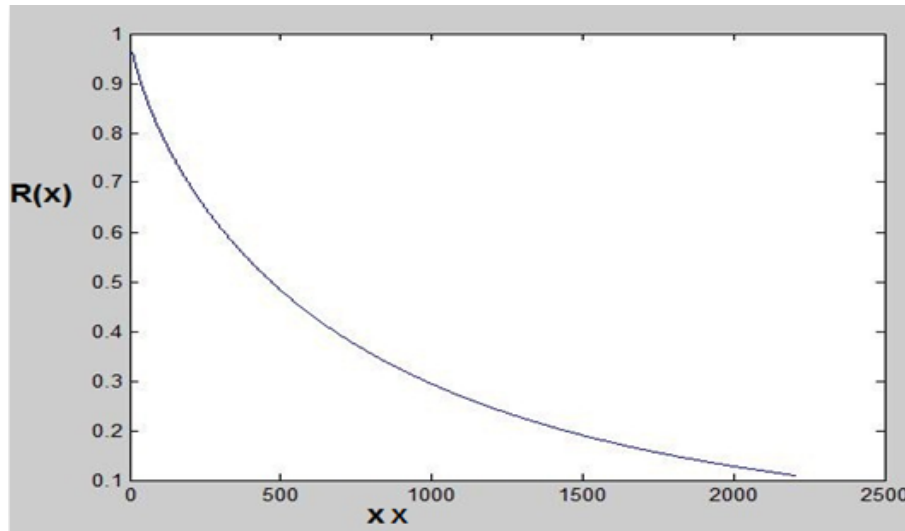


FIG. 4.19 – Fonction de fiabilité du Palettiseur.

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \theta = 0.0013$$

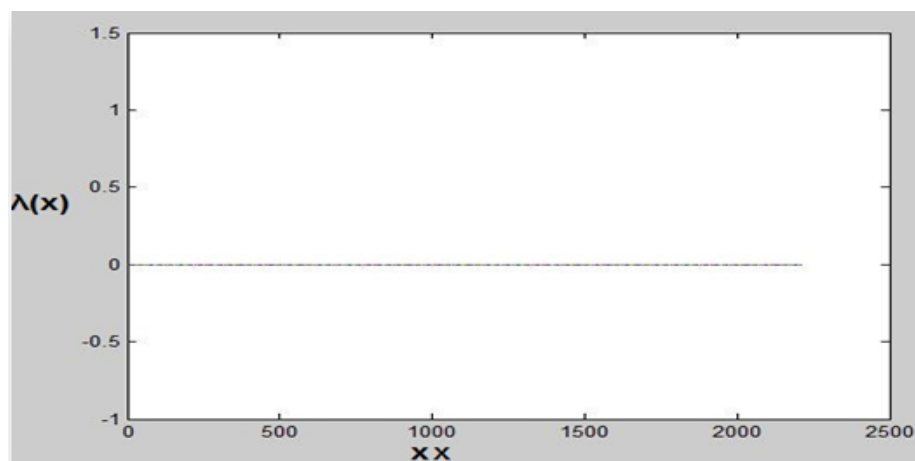


FIG. 4.20 – Taux de défaillance du Palettiseur.

5. Remplisseuse :

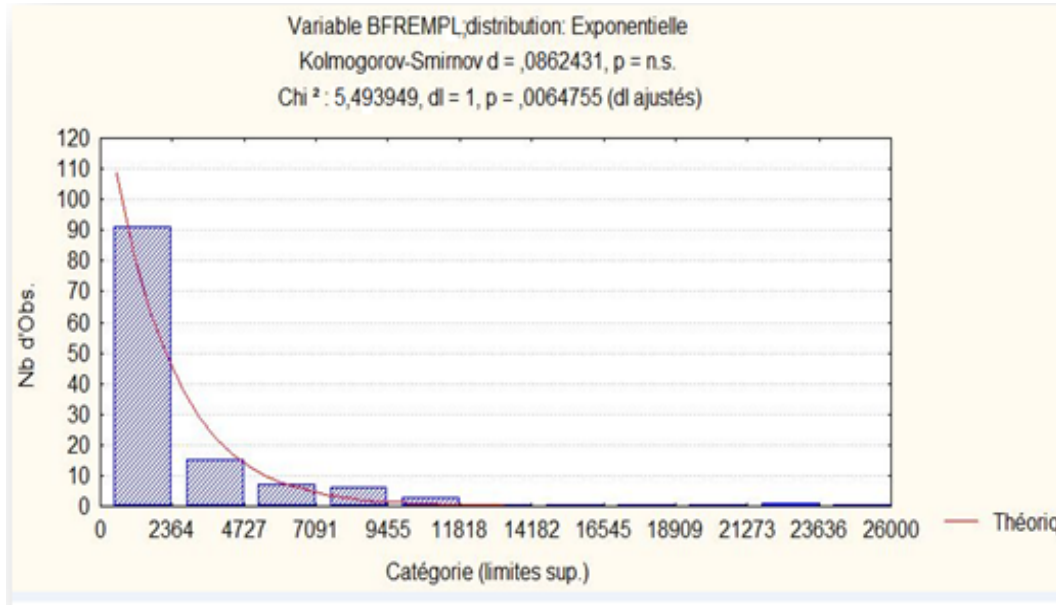


FIG. 4.21 – Ajustement des temps de bon fonctionnement par la loi Exponentielle.

Les résultats de l’ajustement sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	Loi	$X^2$ calculé	$X^2$ théorique	Nbre de classe	KS Calculé	KS théor	Taille échanti	Paramètre	Décision
Remplisseuse Dl=1	Exp	5.49	3.84	11	0.086	0.12	121	$\theta = 0.004$	$X^2$ rejeté, KS accepté

TAB. 4.12 – Résultats de l’ajustement de la variable bon fonctionnement par la loi Exponentielle de la Remplisseuse.

Fonction de fiabilité :

$$R(x) = e^{-\theta x} = e^{-0.004x}, \quad x \geq 0$$

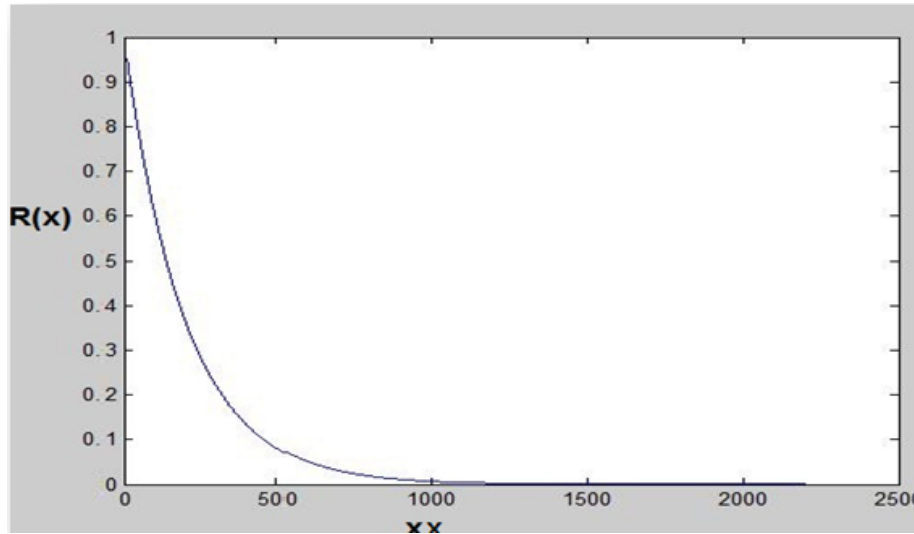


FIG. 4.22 – fonction de fiabilité de la Remplisseuse.

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \theta = 0.004$$

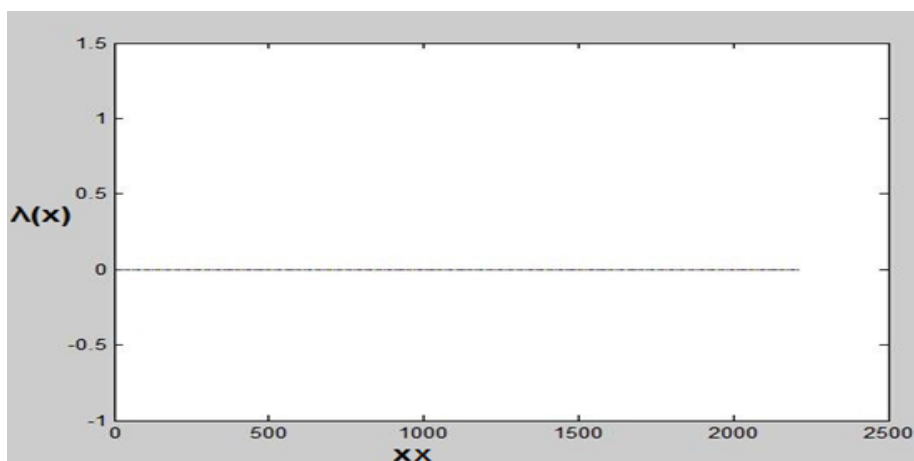


FIG. 4.23 – Taux de défaillance de la Remplisseuse.

## 4.4.3 Indices de fiabilité :

	Souffleuse	Diviseur	Fardeleuse	Palettiseur	Remplisseuse
Moyenne des temps d'arrêts (MDT)	16,95 min	10,41 min	17,24 min	10,31 min	13,88 min
Moyenne des temps de bon fonctionnement (MUT)	416,17min	2380,95 min	2222,22 min	769,23 min	250 min
Moyenne des temps entre défaillances (MTBF)	433,12 min	2391,36 min	2239,46 min	779,53 min	263,88 min
Disponibilité (A)	96 %	99 %	99 %	98 %	95 %

TAB. 4.13 – Indices de fiabilité.

Telles que :

- $MDT = E(X) = \frac{1}{\theta}$
- $MUT = E(Y) = \frac{1}{\theta}$
- $MTBF = MDT + MUT$
- $A = \frac{MUT}{MUT+MDT}$

Interprétation des résultats :

- ✓ La moyenne des temps d'arrêts (MDT) de toutes les machines est petite, ce qui signifie que les machines ne subissent pas de sérieuses pannes.
- ✓ La moyenne des temps de bon fonctionnement (MUT) de la souffleuse et de la remplisseuse est petite par rapport à celle du diviseur, de la fardeleuse et du Palettiseur car ces deux équipements effectuent les plus grandes tâches, de plus leurs composants sont hétérogènes.
- ✓ La moyenne des temps entre défaillances (MTBF) de la souffleuse et de la remplisseuse est petite par rapport à celle du diviseur, de la fardeleuse et du Palettiseur car leurs moyennes des temps de bon fonctionnement (MUT) sont petites et ceci revient à la difficulté des tâches effectuées par ces équipements.

## 4.5 Evaluation des coûts de maintenance

Les coûts impliqués dans une politique de maintenance peuvent être dissociés aux coûts compressibles (coûts de l'entretien préventive) et incompressibles (coûts de défiance en service). Dans la première catégorie interviennent le prix des pièces de rechange et de la main d'œuvre. En ce qui concerne la deuxième catégorie, une seule variable est prise en compte : le coût de l'indisponibilité lié aux actions de maintenance à effectuer. Ces coûts peuvent être estimés comme suit :

1. Coûts des défaillances ( $C_d$ ) : Ils s'obtiennent à partir de :

- Pertes de production  $P_p$  qui est évalué par :

$$P_p = T_a \times C_h,$$

où

$T_a$  : Temps d'arrêt. Dans notre étude on l'a évalué à l'aide du personnel.

$C_h$  : Coût horaire. Dans notre cas on l'a évalué par le produit de la valeur ajoutée (15DA) multiplié par le nombre des bouteilles d'huile produites pendant une heure (170 en moyenne).

D'où :

$$P_p = T_a \times 2550$$

- Perte de matières premières  $P_m$  est négligeable ;
- Energie consommée  $P_e$  : Elle est évaluée au maximum par

$$P_e = T_a \times 550$$

coût associé à la perte de l'énergie consommée le coût de défaillance est :

$$C_d = P_e + P_m + P_p$$

2. Coût de l'entretien préventif  $C_p$ . On le calcule à partir de :

- Coût de main d'œuvre  $C_s$ , qui est obtenu de la comptabilité analytique, il est évalué par 290 DA/h pour les électriciens et de 240DA/h pour les mécaniciens ;
- Coût de pièce de rechange  $C_m$ .

Le coût de l'entretien  $C_p$  est alors :

$$C_p = C_s \times T_a + C_m.$$

Le tableau suivant présente les différents coûts des machines concernés pour le mois avril :

Nom de la machine	$T_a(h)$	$C_s$	$C_s \times T_a$	$C_p(DA)$	$P_p$	$C_d(DA)$	$r = \frac{C_d}{C_p}$
<b>Souffleuse</b>	5,65	530	2994,5	37035,34	14407,55	17515,05	0,472
<b>Diviseur</b>	1,25	240	300	3921,46	3187,5	3875	0,988
<b>Fardeuse</b>	1,44	240	345,6	4872,12	3672	4464	0,916
<b>Palettiseur</b>	2,36	240	566,4	7982,89	6018	7316	0,915
<b>Remplisseuse</b>	6,15	530	3259,5	39647,35	15682,5	19065	0,481

TAB. 4.14 – Les coûts de la maintenance.

#### Interprétation des résultats :

A partir des résultats trouvés, on remarque que  $C_p > C_d$  pour toutes les machines ce qui signifie que la maintenance la plus avantageuse pour chaque machine est la maintenance corrective.

## 4.6 Calcul des taux de rendement global (TRG) de chaque mois :

Décembre :

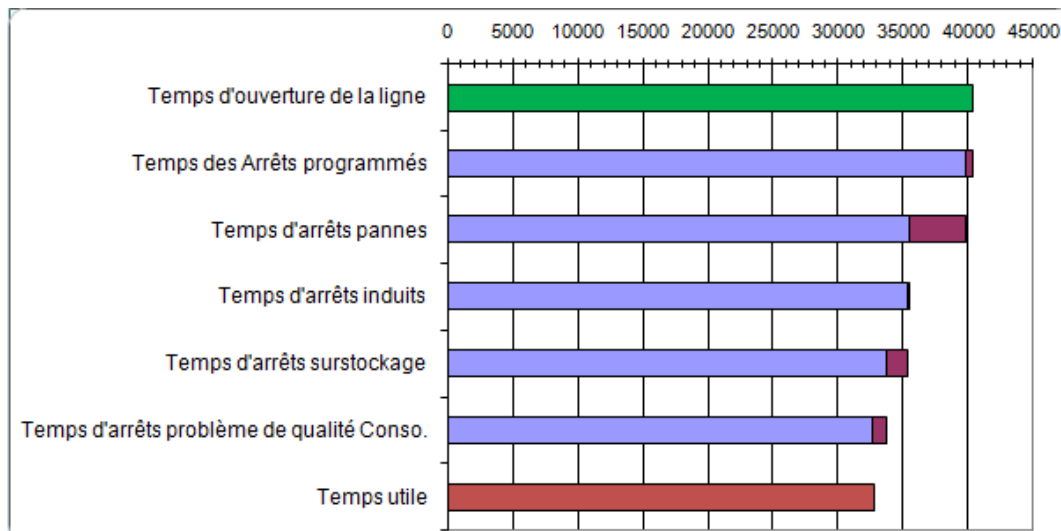


FIG. 4.24 – Représentation des temps du mois de décembre.

$$\text{TRG} = (\text{taux de marche calendaire}) * (\text{taux d'allure}) * (\text{taux de produits conforme})$$

<b>Taux de rendement TRG</b>	84.6%
<b>Taux de marche calendaire</b>	97%
<b>Taux d'allure</b>	89%
<b>Taux de produits conformes</b>	98%

TAB. 4.15 – Taux de mois de décembre.

Janvier :

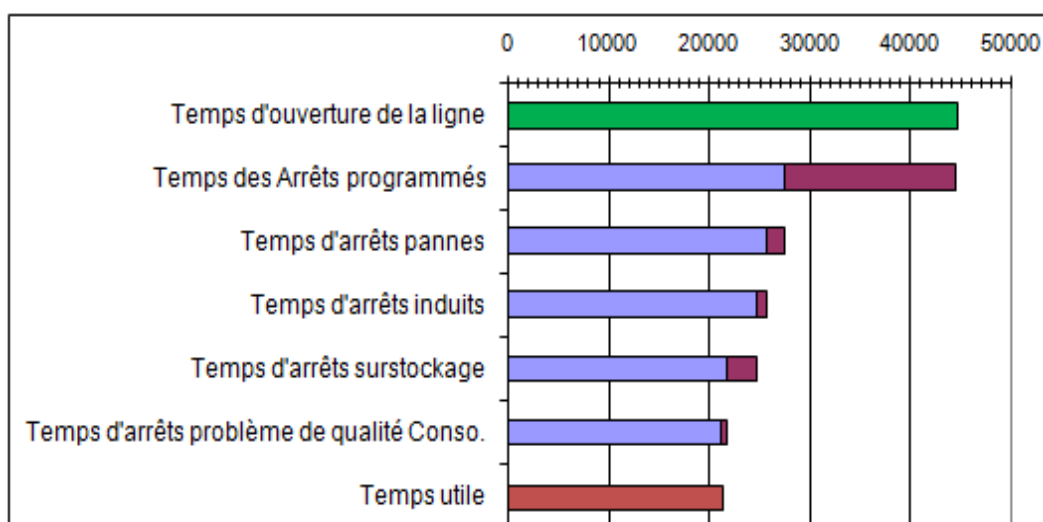


FIG. 4.25 – Représentation des temps du mois de janvier.

<b>Taux de rendement TRG</b>	75.3%
<b>Taux de marche calendaire</b>	91%
<b>Taux d'allure</b>	90%
<b>Taux de produits conformes</b>	92%

TAB. 4.16 – Taux de mois de janvier.

Février :

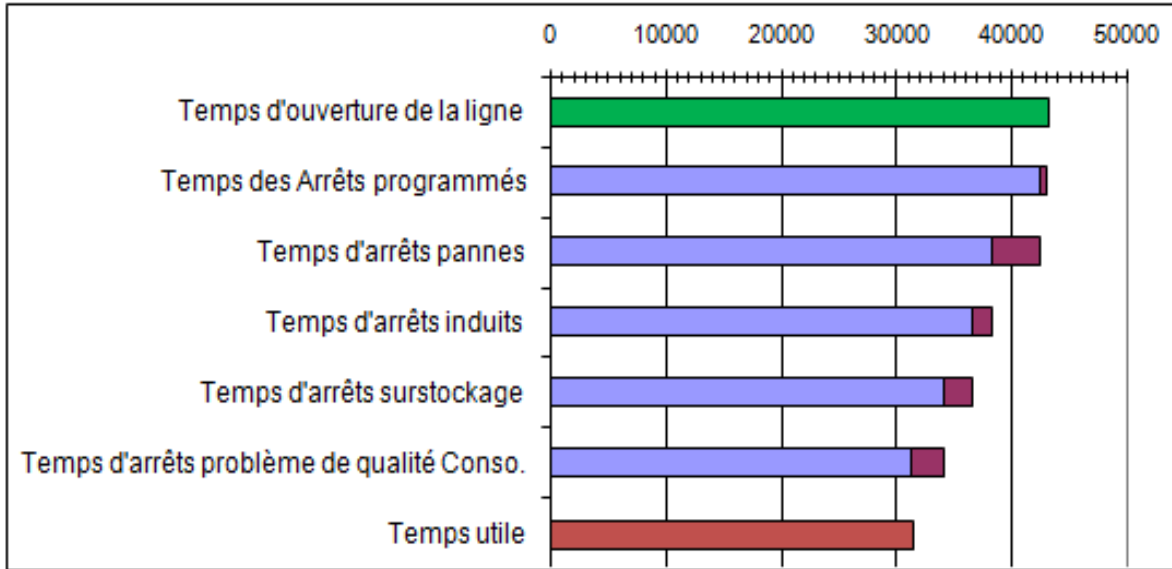


FIG. 4.26 – Représentation des temps du mois de février.

<b>Taux de rendement TRG</b>	81.2%
<b>Taux de marche calendaire</b>	92%
<b>Taux d'allure</b>	91%
<b>Taux de produits conformes</b>	97%

TAB. 4.17 – Taux de mois de février.



Mars :

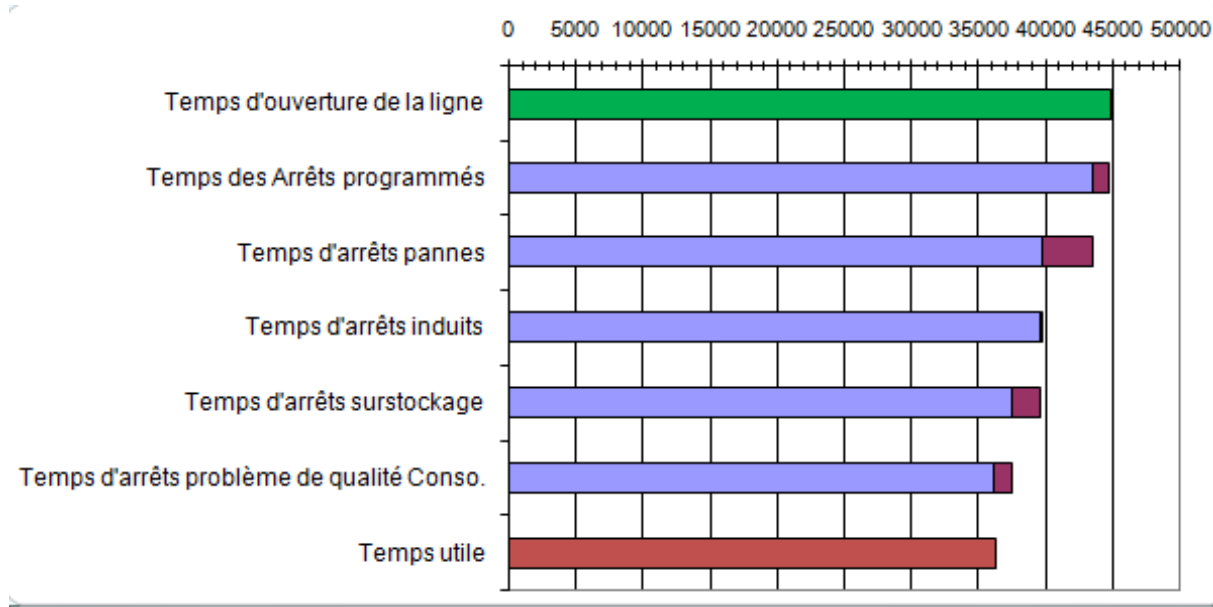


FIG. 4.27 – Représentation des temps du mois de mars.

<b>Taux de rendement TRG</b>	89.33%
<b>Taux de marche calendaire</b>	94 %
<b>Taux d'allure</b>	96%
<b>Taux de produits conformes</b>	99%

TAB. 4.18 – Taux de mois de mars.

Avril :

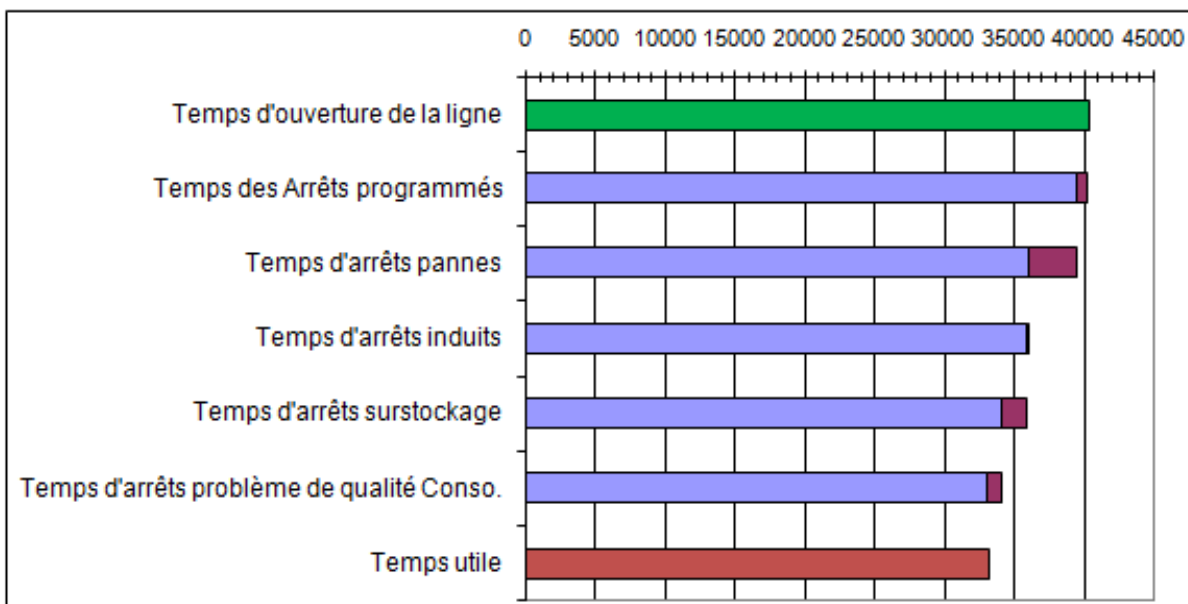


FIG. 4.28 – Représentation des temps du mois d'avril.

<b>Taux de rendement TRG</b>	85.68%
<b>Taux de marche calendaire</b>	97%
<b>Taux d'allure</b>	92%
<b>Taux de produits conformes</b>	96%

TAB. 4.19 – Taux de mois d'avril.

### Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus par le calcul des taux des rendements (TRG) des 5 mois passés on constate que :

- ✓ Pour les mois de décembre, février, mars et avril les TRG sont près de 85% ce qui signifie que les équipements sont fiables et la démarche suivie par le personnel est efficace car ces derniers sont spécialisés dans le domaine.
- ✓ Pour le mois de janvier, le TRG est inférieure à la valeur inférieure (85%) cette situation est survenue suite à des temps d'arrêts programmés prolongés. Ces derniers sont dus à l'installation d'équipements plus sophistiqués pour lequel le personnel n'a pas eu encore des formations.

# Conclusion générale

On s'intéresse dans ce mémoire aux méthodes d'optimisation de la maintenance.

Après avoir introduit les notions de base de la théorie de fiabilité, nous avons présenté le concept de maintenance ainsi que les différentes politiques de maintenance. Nous avons abordé, ensuite, les principales méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons appliqué la méthode d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF) et la méthode Total Productive Maintenance (TPM) sur des données relatives à une chaîne de Production d'huile (1 Litre).

L'analyse de Pareto a permis de dégager les équipements les plus fragiles. Après l'ajustement des temps d'arrêt et du temps de bon fonctionnement par la loi exponentielle de chacune de ces machines, nous sommes passés au calcul des indices de fiabilité où a retenu les taux de disponibilité de chaque équipement.

L'OMF nous a permis de choisir la maintenance corrective au profit de la maintenance préventive en se basant sur les coûts des défaillances. Nous sommes arrivés à la même conclusion en appliquant la TPM du moment que tous les équipements retenus par l'analyse ABC sont en période de maturité. Les taux de rendement (TRG) qui tournent autour de 85% nous renseignent sur l'efficacité de la démarche suivie par le personnel et la fiabilité des équipements.

Néanmoins, le personnel de l'entreprise doit, à moyen terme, appliquer l'OMF et la TPM, en se basant sur les données du retour d'expérience, et réviser le mode de gestion de la chaîne de production en cas de besoin.

# Bibliographie

- [1] Afnor, *Norme Européenne*. Terminologie de la Maintenance (NF EN 13306), Juin 2001.
- [2] A. Aïssani, *Modèles Stochastiques de la théorie de fiabilité*. O.P.U, 1992.
- [3] D. Aïssani, *Cours de modélisation*. Département de Recherche Opérationnelle et Informatique, Université de Bejaia 2010,.
- [4] X. Boraux, *TPM en quelques mots*. E.R.I.C.S Associes, Décembre 2003.
- [5] F. Bouhamou, N. Okaour, *Analyse du retour d'expérience pour l'optimisation de la maintenance au niveau du parc d'engins de l'entreprise portuaire de Bejaïa*. Mémoire de fin d'études, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Bejaia 1998.
- [6] A. Despujoils, *Analyse du retour d'expérience pour l'optimisation de la maintenance* . Division Recherche et Développement d'électricité de France, 2009.
- [7] H. Guesnon *Optimisation de la maintenance dans les grands ensembles industriels*. Journal of Quality in Maintenance Engineering,1999.
- [8] M.T. Hides,C.J. Bamber,J.M.Sharp , *Farctors affecting implementation of total productive maintenance*. 1<sup>er</sup> Salon International de la maintenance Alger, pp. 1-19, 1991.
- [9] C. Hohmann, *TPM, Total Productive Maintenance*. 2001.
- [10] H. Kaffel, *La maintenance distribuée : Concepts, évaluation, et mise en œuvre*. Thèse de Ph.D en génie mécanique Université de Laval Québec, Octobre 2001.
- [11] R. Laggoune. *Les Modèles de Maintenance basés sur la Distribution des durées de Vie*. Cours, Université de Bejaia, 08 Septembre 2008.
- [12] A. Lannoy. *Retour d'expérience technique*. (SE1041) traité sécurité et gestion des risques, 2003.

- 
- [13] C. Letot, G. Fleurquin, P. Dehombreux. *"Reiliabilitix", un Outil d'Optimisation de la Maintenance basé sur la fiabilité*. Thèse de Doctorat, Université de Mons, Faculté Polytechnique de Mons Service de Génie Mécanique and Pole Risques, 2009.
- [14] J. C. Ligeron, P. Lionnet. *La fiabilité en exploitation, organisation et traitement des données*. Ed. Techniques et documentation (Lavoisier), 1993.
- [15] P. Lionnet. *La maintenance, mathématique et méthodes*. Ed. Techniques et documentation (Lavoisier), 1988.
- [16] P. Lionnet. *Optimisation d'une politique de maintenance*. Ed. Techniques et documentation (Lavoisier), 1993.
- [17] Nakajima. *Total Productive Maintenance*. Japan Institute of plant maintenance.
- [18] F.Olivier. *Notes de cours de Processus Aléatoires*. page14,2005.
- [19] H. Procaccia, L. Piepszownik. *Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne*. Ed. Eyrolle, 1992.
- [20] A. Riali, A. Talbi. *Ingénierie de la maintenance industrielle*. Doctorants, Laboratoire de Productique, Energétique et Développement Durable, Ecole Supérieure de Technologie.
- [21] V. Zille. *Modélisation et Evaluation des Stratégie de Maintenance sur des Système Multi-Composants*. Thèse de Doctorat Université de Troyes, Institut Charles Delaunay, 28 Janvier 2009.

## **Résumé**

Dans le domaine de l'industrie, l'optimisation de la maintenance est basée sur la connaissance de la fiabilité des équipements et des politiques de maintenance adaptées. Les applications de ces politiques ont montré une grande amélioration au niveau de la performance triangulaire des systèmes industriels (coût, qualité, et délai). Dans ce mémoire, nous avons appliqué les deux méthodes les plus prometteuses de l'optimisation de la maintenance, la TPM (Total Productive Maintenance) et l'OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) qui visent principalement à réduire les coûts de la maintenance. En utilisant la courbe ABC on a pu sélectionner les équipements à prendre en considération, dans notre cas le nombre d'équipements est égale à 5. Nous avons appliqué la loi exponentielle pour l'ajustement des temps d'arrêt et de bon fonctionnement de ces derniers. L'évaluation des coûts de maintenance nous a permis de trouver qu'il faut assurer une maintenance corrective pour éliminer toutes les causes entraînant l'arrêt de la chaîne de production d'huile de l'usine « Cevital ». Enfin nous avons calculé les taux de rendement des 5 machines afin d'avoir une idée sur l'efficacité du personnel et des performances de la chaîne de production.

**Mots-clés :** Optimisation de la maintenance ; fiabilité des équipements ; politiques de maintenance ; Total Productive Maintenance ; Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité.

### **Abstract:**

In the field of industry, maintenance optimization is based on knowledge of the reliability of equipment and appropriate maintenance policies. The applications of these policies showed a great improvement in the triangular performance industrial systems (cost, quality and time). In this thesis, we applied the two most promising methods of optimizing maintenance, TPM (Total Productive Maintenance) and OMF (Optimization of the Reliability Maintenance) aimed primarily at reducing the costs of maintenance. Using the ABC curve was able to select the equipment to be considered, in our case the number of devices is equal to 5. We applied exponential for adjustment downtime and proper functioning of these. The evaluation of maintenance costs has allowed us to find the need to ensure corrective maintenance to eliminate all the causes leading to discontinuation of the oil production chain from the factory "Cevital".

Finally we calculated the rate of return 5 machines in order to have an idea about staff efficiency and performance of the production chain.

