الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

Application de la fiabilité dans la maintenance prédictive des équipements industriels

« Etude de cas »

Présenté par :

BEDJAOUI TOUHAMI

REDAOUNIA ANOUAR

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
…….....	…….	IMSI	**Président**
AOUIMER YAMINA	MCB	IMSI	**Encadreur**
…….....	…….	IMSI	**Examinateur**

Année 2024/2025

Résumé :
La maintenance basée sur la fiabilité est une approche proactive de gestion de la maintenance visant à prévenir les défaillances et à maximiser la disponibilité des équipements. Au lieu de suivre un calendrier préétabli, cette approche se fonde sur les données de fiabilité et les informations en temps réel pour prendre des décisions de maintenance préventive. L'objectif de notre travail est d'étudier la maintenance du groupe électrogène. Nous calculons les paramètres de la distribution de Weibull à l'aide du logiciel Minitab, puis les testons à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. Nous examinons également la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité du groupe électrogène.

Mots clés :
Fiabilité, Groupe électrogène, Weibull, Maintenabilité, Disponibilité.

ملخص:
الصيانة المعتمدة على الموثوقية هي نهج استباقي لإدارة الصيانة يهدف إلى منع الأعطال وزيادة توفر المعدات إلى أقصى حد. بدلاً من اتباع جدول محدد مسبقاً، يعتمد هذا النهج على بيانات الموثوقية والمعلومات في الوقت الفعلي لاتخاذ قرارات الصيانة الوقائية. هدف عملنا هو دراسة صيانة المجموعة الكهربائية (مولد كهربائي). نحسب معلمات توزيع ويبل باستخدام برنامجMinitab ، ثم نختبرها باستخدام اختبار Kolmogorov-Smirnov. كما ندرس أيضًا موثوقية المجموعة الكهربائية وقابليتها للصيانة وتوفرها.

الكلمات المفتاحية:
الموثوقية، المجموعة الكهربائية، ويبل، القابلية للصيانة، التوفر.

Abstract:
Reliability-centered maintenance is a proactive approach to maintenance management that aims to prevent failures and maximize equipment availability. Instead of following a predetermined schedule, this approach relies on reliability data and real-time information to make preventive maintenance decisions. The objective of our work is to study the maintenance of the generator set. We calculate the parameters of the Weibull distribution using Minitab software, and then test them using the Kolmogorov–Smirnov test. We also examine the reliability, maintainability, and availability of the generator set.

Keywords:
Reliability, Generator set, Weibull, Maintainability, Availability.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :
Mes très chers parents qui ont m'aider par ses invocations dans tous moment, dans le bonheur et le malheur ;
Tous mes sœurs ; toute ma famille ;
Tous mes voisins.
Mon Binôme Touhami qui m'a supporté le long de toutes ces années d'études.
Toutes mes chères amies.
Tout les professeurs qui nous ont aidé à en arriver jusqu'au là.
A tous mes amis de promotion d'électromécanique.

ANOUAR *.....*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

Ma Chère Mère رحمها الله

Mon pére bien-aimé pour son amour, ses sacrifices sa présence constant à mes côtés, et seconde père RACHID

À mes frères : Zoubir, Slimane, Mamdouh, Walid, Anouar zaki et Younes, et à mes sœurs Sondos et Imane, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur affection tout au long de ce parcours.

À ma tante et seconde mère, Hafsia, pour son amour, son éducation et ses prières silencieuses qui m'ont accompagné chaque jour. A Yamouna, l'épouse de mon père, pour son respect, sa gentillesse et sa bonne conduite

Mon Binôme ANOUAR qui m'a supporté le long de toutes ces années d'études.

Toutes mes chères amies. Tous les professeurs qui nous ont aidé à en arriver jusqu'au là. A tous mes amis de promotion

TOUHAMI*….*

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu, Le Tout-Puissant, qui nous a accordé le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires pour surmonter toutes les difficultés et les obstacles rencontrés tout au long de notre parcours académique.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Madame AOUIMER Yamina, notre encadreuse, pour son accompagnement, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre mémoire.

Nos remerciements vont aussi à l'entreprise Henkel Algérie, pour nous avoir accueillis au sein de leur structure et nous avoir offert l'opportunité d'effectuer ce stage dans des conditions favorables à l'apprentissage.

Un remerciement particulier à Monsieur Abdelhafid Ghoulam, ingénieur au sein de l'entreprise, pour son aide précieuse, sa disponibilité et ses conseils techniques durant toute la période de stage.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Introduction générale ……..……..11
Chapitre I 12
Généralité de maintenance 12
Chapitre II 22
La maintenance basée sur la fiabilité 22
II.1 Introduction 23
II.2 La maintenance basée sur la fiabilité 23
II.2.1 Historique de la MBF 23
II.2.2 Définition de la MBF 24
II.2.3 Objectifs de la MBF 25
II.3 La fiabilité 26
II.3.1 Définition selon AFNOR 26
II.3.2 Modèle mathématique pour la fiabilité 26
II.4 Défaillance 27
II.4.1 Définition de la défaillance 27
II.4.2 Types de défaillance 27
II.4.3 Classification des défaillances 27
II.4.4 Taux de défaillance 28
II.5 Indicateurs de maintenance 29
II.6.1 Les indicateurs clés de performance « KPI maintenance » 30
II.6.2 Les indicateurs de résultat 30
Le calcul de la fiabilité avec la MTBF 30
II.6 Les lois de fiabilité : 31
II.6.1 Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle 31
II.6.2 La loi de Weibull : 31
II.6.3 Méthode de Pareto « ABC » OU « 20/80 » 33
II.7 L'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité 35
II.8 Les problématiques industrielles et les applications possibles 36
II.9 Conclusion 37
Chapitre III 38
Présentation de l'entreprise et du groupe électrogène 38
III.1.Introduction 39
III.2.Présentation de l'entreprise 40
III.2.1 Introduction 40

III.3.2 Organisation de l'entreprise : 42
III.2.2 Processus de production 42
III.2.3 L'électricité dans l'usine 46
III.2.3.1 Transformateurs abaisseurs 30 kV / 380 V 46
III.2.3.3 Moteurs pas à pas 48
III.2.3.4 Armoires électriques 48
III.2.3.5 Variateurs de vitesse 48
III.3.Les groupes électrogènes 48
III.3.1 But de la génération électrique autonome 49
III.3.2 Les caractéristiques des groupes électrogènes: 49
III.3.3 Classification des groupes électrogènes 50
III.3.4 Les pannes possibles 52
Conclusion 54
Chapitre IV 55
Analyse de la fiabilité du groupe électrogène 55
IV.1 Introduction 56
IV.2.1 Calcul temps de bon fonctionnement : 57
IV.2.2 Classement de TBF calcul F (ti) : 58
IV.3 Estimation des paramètres de la loi WeiBull *(η, β, γ)* : 58
IV.3.1 Présentation générale de MINITAB 59
IV.3.2 L'environnement de MINITAB 59
IV.3.3 Représentation graphique des données : 61
IV.3.4 Etude de la loi de WeiBull : 62
IV.3.5 Test de Kolmogorov-Smirnov: 67
IV.4 Calcul de la fiabilité R (ti), la fonction de répartition F (ti), le taux de défaillance λ (ti), la densité de probabilité f (ti) 67
IV.4.1 Calcul de la fiabilité du groupe électrogène 68
IV.4.2 Calcul de R(t), F(t), λ(t) : 68
IV.4.2.1 La fiabilité 68
IV.4.2.2 La fonction de répartition : 69
IV.4.2.3 Taux de défaillance 70
IV.4.2.4 Densité de probabilité de défaillance 71
IV.4.3 Etude de maintenabilité 72
IV.4.4 Etude de disponibilité instantanée 74
IV.5 Conclusion : 75
Conclusion Générale 77

Liste des Figures

Figure II.1. Courbe de baignoire 24
Figure II.3. Diagramme des temps moyens 30
Figure II.4. Principales propriétés de la distribution exponentielle 31
Figure II.5 Courbe en forme de baignoire avec la fiabilité de Weibull et la distribution exponentielle 33
Figure II.6. Diagramme de Pareto "ABC" 34
Figure II.7. Mise en place d'une boucle d'amélioration et d'un retour d'expérience 35
Figure II.8. Méthode d'optimisation basée sur la fiabilité 36
Figure III.1. Composition principale d'un groupe électrogène (moteur, alternateur, tableau électrique) 40
Figure III.2. Organigramme hiérarchique de l'unité de Chelghoum Laïd 42
Figure III.3. Schéma de tuyauterie montrant la conduite Slurry en position haute et l'air chaud en position basse 43
Figure III.4. Le suivie de système dans la salle de contrôle 43
Figure III.5. Pompe haute pression PHP 44
Figure III.6. : La tour d'atomisation dans le procédé de fabrication des détergents 44
Figure III.7. Machine VOLPACK utilisée pour le conditionnement des détergents 45
Figure III.8. Machine de fermeture de cartons par bande adhésive 46
Figure III.9. Transformateur de distribution alimentant les moteurs asynchrones 47
Figure III.10. Armoire électrique regroupant les équipements de commande et de protection 48
Figure 4.1. Ouverture d'une feuille de travail 60
Figure 4.2. Examen d'une feuille de travail 60
Figure 4.3. Représentation graphiques des données (diagrammes de valeurs individuelles) 61
Figure 4.4. Représentation graphiques des données (Histogrammes) 62
Figure 4.5. Représentation graphiques des données (paramètres d'ajustement des Histogrammes) 62
Figure 4.6. Analyse de répartition 63
Figure 4.7. Choix de la première variable C1 63
Figure 4.8. Choix de la deuxième variable C2. 64
Figure 4.9. *Estimation des temps* 65
Figure 4.10. Choix des résultats 65
Figure 4.11. Choix des graphes 66
Figure 4.13. Papier de WeiBull en logiciel Minitab 67
Figure 4.14. La Courbe De la Fonction Fiabilité 69
Figure 4.15. La courbe du taux de défaillance 70

Figure 4.16. La courbe du taux de défaillance 70
Figure 4.17. La Courbe de la densité de probabilité de défaillance 71
Figure 4.18. *La courbe de la maintenabilité* 73
Figure 4.19. Disponibilité instantanée..... 75

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les pannes possibles..... 52
Tableau 1 : Historique des Pannes et Interventions – Groupe Électrogèn 57
Tableau 3 : Classement de TBF calcul F (ti)..... 58
Tableau 4: Les différentes valeurs utilisées pour la distribution de WeiBull..... 67
Tableau 5 : Calcul de la fiabilité..... 68
Tableau 6 : Fonction de répartition F(t) 69
Tableau 7 : Calcul du taux de défaillance 70
Tableau 8 : Calcul de la fonction de la densité de probabilité..... 71
Tableau 9 : Etude de maintenabilité 73
Tableau 10 : Disponibilité instantanée 74

Liste des Abréviations

AFNOR : Agence Française de NORmalisation.

MTBF : Mean Time Between Failure (temps moyen entre deux défaillances)

MTTF : Mean Time To first Failure (temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance)

MBF : La maintenance basée sur la fiabilité

MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de bon fonctionnement après réparation

MDT (Mean Down Time) : durée moyenne de défaillance comprenant la détection de la panne, la durée d'intervention, le temps de la réparation et le temps de remise en service.

MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

TBF : Temps de bon fonctionnement

TTR : Moyenne des temps de réparation

$\boldsymbol{\mu}$**:** Taux de réparation

$\boldsymbol{\eta}$ **:** Paramètre d'échelle

$\boldsymbol{\beta}$ **:** Paramètre de forme γ : Paramètre de position

R (t) **:** la fiabilité

$\boldsymbol{\lambda}$**:** taux de défaillance

$\boldsymbol{f(t)}$**:** Densité de probabilité de défaillance

M(t) **:** la maintenabilité

D(t) **:** la disponibilité

Introduction Générale

La maintenance occupe une place stratégique dans le fonctionnement des entreprises industrielles, car elle influe directement sur la performance, la qualité de production et la maîtrise des coûts. Elle contribue à prolonger la durée de vie des équipements, à préserver les actifs techniques et à garantir un niveau de sécurité satisfaisant. Avec l'automatisation croissante et la complexité accrue des systèmes, il devient indispensable d'adopter une approche structurée, efficace et adaptée à chaque contexte.

Dans de nombreux cas, les plans de maintenance fournis par les fabricants sont standardisés et ne tiennent pas toujours compte des contraintes réelles d'exploitation, ce qui peut limiter leur efficacité. C'est pourquoi les entreprises adoptent de plus en plus des stratégies fondées sur la fiabilité, visant à anticiper les défaillances et à optimiser les interventions tout en maintenant un bon équilibre entre coûts, sécurité et disponibilité.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette perspective. Il porte sur une étude de maintenance basée sur la fiabilité d'un équipement industriel**,** à travers un cas concret : le groupe électrogène de l'entreprise Henkel Algérie**,** qui dispose de deux unités de production implantées à Réghaïa (Centre) et Chelghoum El Aïd (Est). L'objectif est d'évaluer, à travers des outils d'analyse adaptés, la fiabilité de cet équipement clé dans le but d'en améliorer la disponibilité et de réduire les risques de pannes.

Par ailleurs, il est important de bien distinguer les notions de maintenance traditionnelle et moderne, afin d'identifier les méthodes les plus pertinentes pour chaque environnement industriel. Une démarche bien construite de maintenance préventive permet en effet de diminuer les arrêts imprévus, d'assurer la continuité de la production, et de contribuer à la sécurité des installations et du personnel.

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- Le **premier chapitre** présente les concepts généraux de la maintenance industrielle et ses principales approches de gestion.
- Le **deuxième chapitre** développe les bases théoriques liées à la fiabilité, notamment le modèle de bon fonctionnement (MBF) et les lois mathématiques associées.
- Le **troisième chapitre** décrit l'entreprise **Henkel Algérie** et les caractéristiques techniques du **groupe électrogène** étudié.
- Enfin, le **quatrième chapitre** expose une **application pratique,** à travers une étude de cas réelle visant à analyser et valider la fiabilité du groupe électrogène.

Chapitre I
Généralité de maintenance

I.1 introduction

Aujourd'hui, la maintenance ne se limite pas à la réparation et à la prévention des pannes ; elle englobe également la capacité à prévenir les pannes. Elle est plus qu'une simple technique d'intervention efficace sur le fonctionnement, elle est devenue une stratégie d'anticipation et d'organisation.

I.2 Historiques de la Maintenance

Bien avant la révolution industrielle dans la seconde moitié du 18eme siècle, la maintenance consistait en des activités des artisans tels que les menuisiers, les forgerons, les soudeurs, les maçons, etc. dans la réparation des bâtiments, des machines primitives et des moyens de transport de l'époque [1]. Comme il n'y avait pas de concepts tels que « pièces de rechange » ou autre concepts relatifs à la maintenance de jours, les défaillances étaient en général réparées par la fabrication de nouvelles pièces ou la réparation de l'ancienne. Par ailleurs, la réparation était très à l'ordre du jour et les structures de base étaient-elles mêmes soit réparables, soit d'une très grande durabilité, ou les deux à la fois.

En l'absence de méthodes pour le calcul de la fatigue et autres concepts liés à la dégradation, la conception et la réparation étaient fortement intégrées, en ce sens que pour remplacer une pièce défaillante jugée pas assez efficace par le propriétaire, ce dernier exigeait une autre plus robuste. Toutes ces pratiques étaient liées à l'évolution lente et au faible coût de ces services de l'époque. Ces pratiques ont progressivement évolués à partir de la révolution industrielle. En 1785, Thomas Jefferson a noté que les pièces des canons étaient fabriquées de façon adéquate et assez rapidement pour qu'on envisage de les changes au besoin [1].

Le concept, lent à l'époque, de pièces de rechange, s'est progressivement accéléré. Cette accélération est fortement accentuée par la complexité croissante des machines à « maintenir ». Le travail de l'agent de maintenance s'est alors progressivement dirigé vers plus d'aptitudes au diagnostic. Un autre facteur important de ce changement était le contrôle de qualité, puis l'automatisation dans les systèmes manufacturiers ; ceci a rendu le remplacement des pièces, et plus tard des unités entières, plus rapides et faciles que les réparations dans beaucoup de cas.

Les approches pour la gestion de la maintenance ont ainsi considérablement évoluées au cours du vingtième siècle. Jusqu'en 1940, seule la maintenance corrective était pratiquée et elle était considérée comme un coût inévitable [2]. Les agents spécialisés de maintenance (réparateurs) sont là pour la remise en état des équipements seulement une fois que ceux-ci sont tombés en panne. La maintenance n'était pas envisagée à la conception, et ses impacts sur les performances des systèmes n'étaient pas non plus reconnus. Les applications de la recherche opérationnelle à l'industrie (notamment l'industrie militaire) pendant la deuxième guerre mondiale ont conduit à une large pratique de la maintenance préventive [3] [4].

Les Allemands, dans leurs efforts de guerre étaient de ceux qui ont fortement poussé à l'exigence de plus en plus de fiabilité, et partant accordent de plus en plus d'importance stratégique à la maintenance. La maintenance périodique était initialement destinée à améliorer la sûreté plutôt qu'à accroître la disponibilité ou à réduire les coûts. Depuis les années 1950, les modèles de recherche opérationnelle sont apparus de façon croissante dans l'étude et l'optimisation des politiques de maintenance. Cette évolution peut être observée à travers les nombreux travaux publiés sur la maintenance et qui sont regroupés et analysés dans plusieurs travaux de synthèse et états de l'art [5].

Ces différents travaux, sur lesquels nous reviendrons, présentent des modèles qui traitent des effets de différentes politiques de maintenance et de la sélection optimale des paramètres de ces politiques. Mais l'impact réel des actions de maintenance sur la performance des activités n'est abordé que dans les années 1970 où des approches plus intégrées de la maintenance ont évolué aussi bien dans le domaine public que privé. L'acquisition de moyens de défense de plus en plus coûteux conduisit alors les autorités américaines à requérir des approches de « coût globale du cycle de vie » (LCC - Life Cycle Costing), le coût de la maintenance devenant alors un composant très important de ce coût du cycle de vie [2].

Le lien direct entre la fiabilité et la maintenabilité est alors reconnu et le terme "R&M" (Reliability - Maintainability) devient très largement utilisé en parlant des systèmes de défense. Ce concept est aussi adopté dans les industries et services civiles.

La maintenance basée sur la fiabilité (RCM - Reliability Centered Maintenance) apparaît alors dans l'aviation civile aux États-Unis. Au même moment, les japonais développent la maintenance productive totale (TPM - Total Productive Maintenance) [6].

Ces deux pratiques, considèrent la maintenance dans le contexte large des activités économiques et prennent en compte les liens étroits entre les défaillances des composants et leurs impacts sur la performance des activités. Ces deux pratiques opèrent sur des horizons à court et moyen terme. Ces considérations nécessitent des modèles de prédiction efficaces pour accéder aux conditions de divers éléments des systèmes et à leur comportement sous différentes stratégies de maintenance.

Des insuffisances dans ces pratiques sont devenues apparentes dans les années 1990. Il apparut de plus en plus que la maintenance ne devrait pas être vue que dans un contexte opérationnel en considérant les défaillances des équipements et leurs conséquences. Elle devait tenir compte aussi bien des retombées économiques que des normes nationales et internationales de plus en plus exigeantes. Ainsi, l'évolution de la maintenance et des outils pour son management ont donné à la maintenance diverses pratiques au sein de l'entreprise.

I.3 Définition de la maintenance

Selon la norme AFNOR NF-X 60 000, la maintenance est « l'ensemble des activités ayant pour objectif de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié de fonctionnement pour établir une fonction requise ».

Le document d'introduction à la maintenance vient compléter la définition de l'AFNOR en précisant que :

« Le document d'introduction à la maintenance vient compléter la définition de l'AFNOR».

Notons que les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques : l'action technique est encadrée, piloté par des actions de gestion (économie et administration) et de management, ce qui implique une large polyvalence. On remarque dans cette terminologie la notion suivante :

- Maintenir : contient la notion de « surveillance » et « prévention » sur bien en fonctionnement normal.
- Rétablir : contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.
- État spécifié ou service déterminé : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- Coût optimal : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité [7].

I.4 Le rôle de maintenance

Pendant longtemps, la maintenance était perçue davantage comme une contrainte inévitable que comme un ensemble d'activités essentielles visant à maintenir ou à rétablir un équipement dans un état spécifié, permettant ainsi :

Une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (notamment dans le cas de la production) ;

La fourniture d'un service dans les meilleures conditions de confort et de coût (par exemple, dans les services en général, mais surtout dans les transports et les hôpitaux).

Cependant, avec le progrès technologique et l'évolution de la gestion d'entreprise, la maintenance est devenue une fonction importante de l'entreprise, jouant un rôle crucial dans la réalisation de ses objectifs. Aujourd'hui, la maintenance est l'affaire de tous et doit être omniprésente dans les entreprises et les services. Elle est devenue un enjeu économique majeur pour les pays cherchant à disposer d'outils de production performants et disponibles.

Si l'entretien se limitait autrefois à des interventions ponctuelles, la maintenance est désormais bien plus que cela. C'est d'abord un état d'esprit, une manière de penser, puis une discipline nouvelle dotée de moyens permettant d'intervenir dans de meilleures conditions et d'appliquer différentes méthodes pour optimiser le coût global. La maintenance vise à éviter les pannes et les temps d'arrêt qu'elles entraînent. Elle ne doit pas être considérée comme une fonction secondaire et doit bénéficier de toute l'attention nécessaire.

La modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de la maintenance. Cette évolution se traduit par un changement profond pour les entreprises (remplacement de la fonction d'entretien par la fonction de maintenance) et par une évolution des mentalités. Cette mutation

nécessite la mise en place de nouvelles structures, de nouveaux moyens et, pour le personnel, un état d'esprit axé sur la maintenance. [8].

I.5. Objectifs de la maintenance :

L'objectif premier est de maintenir la disponibilité des équipements de production tout en minimisant les pannes, car celles-ci engendrent des coûts de maintenance, des pertes liées à l'indisponibilité des équipements et des risques pour la sécurité des biens et des personnes. La maintenance vise également à améliorer la sécurité, à intégrer de nouveaux équipements, à organiser les activités de maintenance et à encadrer les équipes d'intervention [9].

I.6 La stratégie de maintenance

La stratégie de maintenance est une approche de gestion utilisée pour atteindre les objectifs de maintenance.Les choix stratégiques en matière de maintenance visent plusieurs objectifs, notamment :

Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance efficaces.

Élaborer et optimiser les plans de maintenance.

Organiser les équipes de maintenance de manière efficace.

Décider d'internaliser ou d'externaliser partiellement ou totalement les activités de maintenance.

Gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.

Évaluer l'impact économique des investissements visant à moderniser ou améliorer la productivité et la maintenabilité de l'outil de production. [10].

I.7 Les niveaux de maintenance

Niveaux 1 : Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc.

Niveaux 2 : Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventives, telles que graissage ou contrôle du bon fonctionnement.

Niveaux 3 : Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général, réalignement des appareils de mesure.

Niveaux 4 : Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

Niveaux 5 : Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations confiées à un atelier central ou à une unité extérieure [11].

I.8 Concepts de maintenances

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

a. Les événements à l'origine de l'action : Ces éléments sont les déclencheurs des actions de maintenance, qu'il s'agisse d'un calendrier préétabli, d'un diagnostic automatique, d'une alerte de capteur, d'une mesure d'usure ou d'une défaillance.

b. Les méthodes de maintenance : Ces stratégies sont appliquées en fonction de la nature de l'événement déclencheur. On distingue trois principaux types de méthodes de maintenance : la maintenance préventive planifiée, la maintenance préventive conditionnelle et la maintenance corrective.

c. Les opérations de maintenance : Ce sont les tâches pratiques réalisées lors d'une opération de maintenance, comme l'inspection, le contrôle, le dépannage, la réparation, etc.

d. Les activités connexes : Il s'agit de toutes les autres actions associées à la maintenance, comme l'amélioration des pratiques de maintenance, la rénovation, la reconstruction, la modernisation, les nouveaux projets et les mesures de sécurité. [12].

I.9 Classification des types de maintenance Les méthodes de classification de la maintenance peuvent être regroupées en deux principales catégories : la maintenance corrective et la maintenance préventive, comme illustré sur la (figure 1) [13].

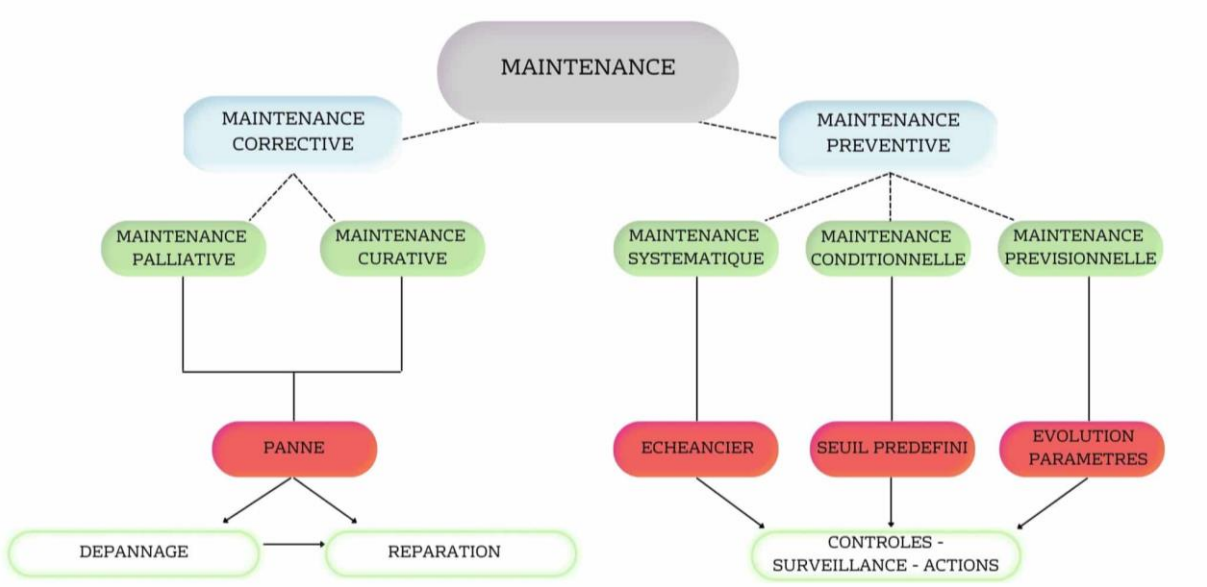


Figure I.1. *Classification des types de la maintenance* [13]

I.9. 1 Maintenance corrective [13]

La maintenance corrective désigne l'ensemble des interventions réalisées après la défaillance ou la détérioration d'un bien afin de lui permettre d'accomplir temporairement une fonction requise. Ces interventions comprennent la localisation de la défaillance, son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, ainsi que le contrôle du bon fonctionnement. Cette forme de maintenance met en lumière cinq concepts clés :

Temporairement : la maintenance palliative est temporaire, tandis que la maintenance curative est permanente.

Localisation : identification de l'équipement, du module ou du composant défaillant.

Diagnostic : identification de la fonction perdue, de la nature de la panne et de sa ou ses causes.

Remise en état avec ou sans modification : la réparation peut-elle inclure des améliorations ? Pour la maintenance palliative, la réponse est non, alors que pour la maintenance curative, elle peut être affirmative.

Contrôle : tests de bon fonctionnement pour vérifier l'efficacité de l'intervention.

I.9. 1.1 Les types de maintenance corrective

Il existe deux formes de maintenance corrective : la maintenance curative et la maintenance palliative.

Maintenance curative :

La maintenance curative consiste à intervenir sur un équipement, un système ou un processus après qu'une défaillance ou un dysfonctionnement ait été constaté, dans le but de le réparer et de le remettre en état de fonctionnement normal.

Maintenance palliative

La maintenance palliative consiste à réaliser des actions temporaires pour maintenir ou rétablir partiellement le fonctionnement d'un équipement ou d'un système, sans pour autant résoudre définitivement le problème. Son objectif est de prolonger la durée de vie de l'équipement jusqu'à ce qu'une intervention plus complète puisse être effectuée

I.9.2.Maintenance préventive

La maintenance préventive consiste à réaliser des actions planifiées de maintenance sur un équipement ou un système afin d'éviter les défaillances avant qu'elles ne surviennent. Elle vise à prévenir les pannes et à garantir le bon fonctionnement continu de l'équipement.

I.9. 2.1 Les objectifs de la maintenance préventive

Augmenter la durée de vie des matériels.

Diminuer la probabilité des défaillances en service.

Diminuer les temps d’arrêt en cas de révision ou de panne.

Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.

Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.

Éviter les consommations anormales d’énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.

Améliorer les conditions de travail du personnel de production.

Diminuer le budget de maintenance.

Supprimer les causes d’accidents graves

I.9. 2.2.Les types de la maintenance préventive

Maintenance systématique :

Les activités de maintenance systématique sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage

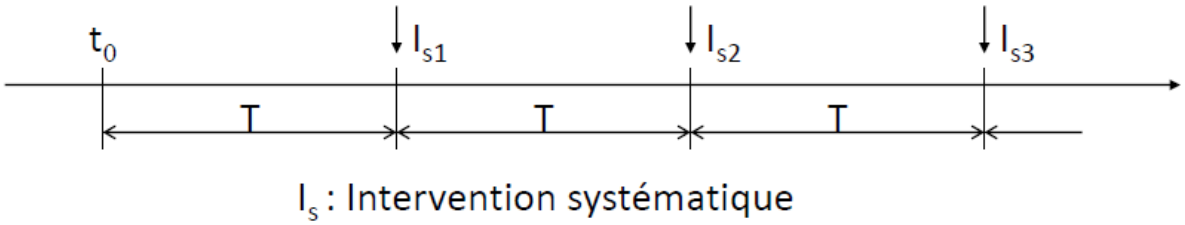


Figure I.2. *Maintenance systématique réalisée à intervalles constants* [13]

L'intervalle T peut-être exprimé en:

Temps

Nombre de cycles

Distance

Tonnage

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

Cette méthode nécessite de connaître :

Le comportement du matériel

Les modes de dégradation

Le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries

Maintenance conditionnelle

Les interventions de maintenance conditionnelle sont déclenchées en fonction de critères prédéfinis qui reflètent l'état de dégradation du bien ou du service.

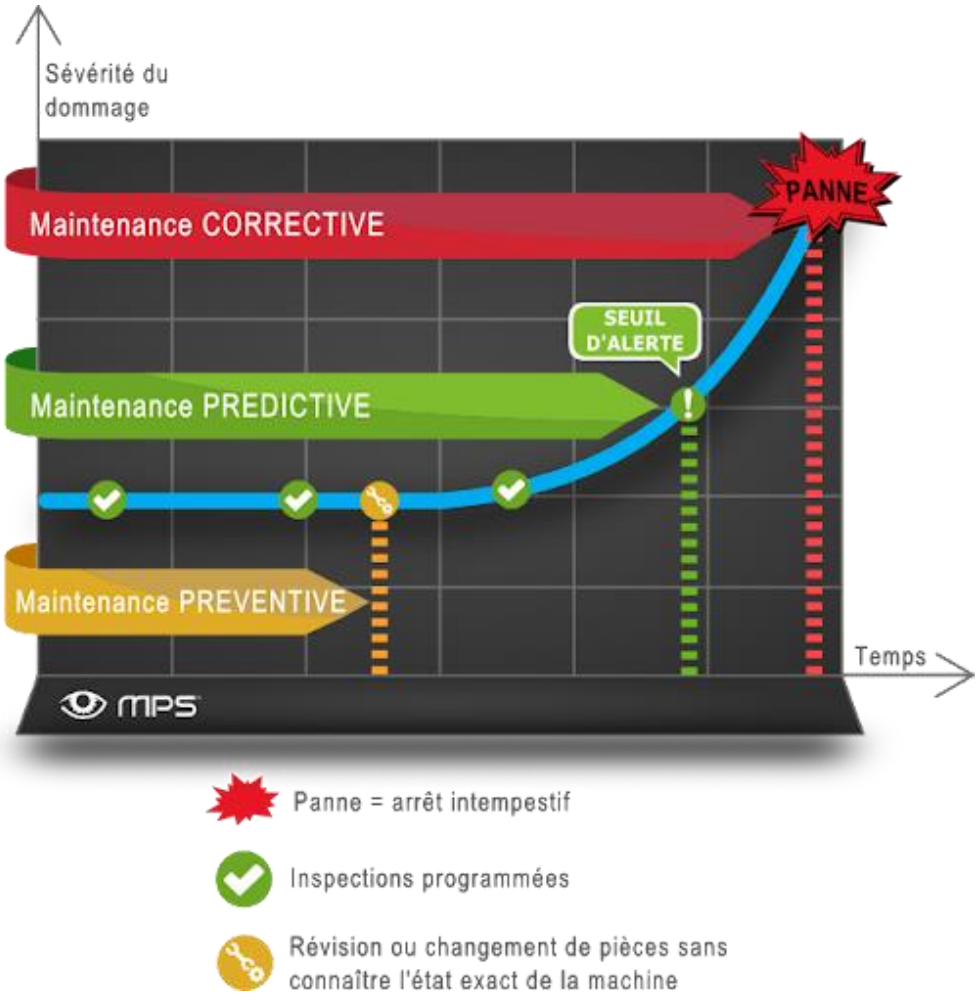


Figure I.3. *Maintenance préventive conditionnelle* [13]

Maintenance prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle (ou maintenance prédictive) est un type de maintenance qui suit l'état de santé, le statut et les performances d'un actif en temps réel. La maintenance prévisionnelle vise à réduire les pannes coûteuses et inattendues. Elle donne au fabricant la possibilité de planifier la maintenance en fonction de son calendrier de production.

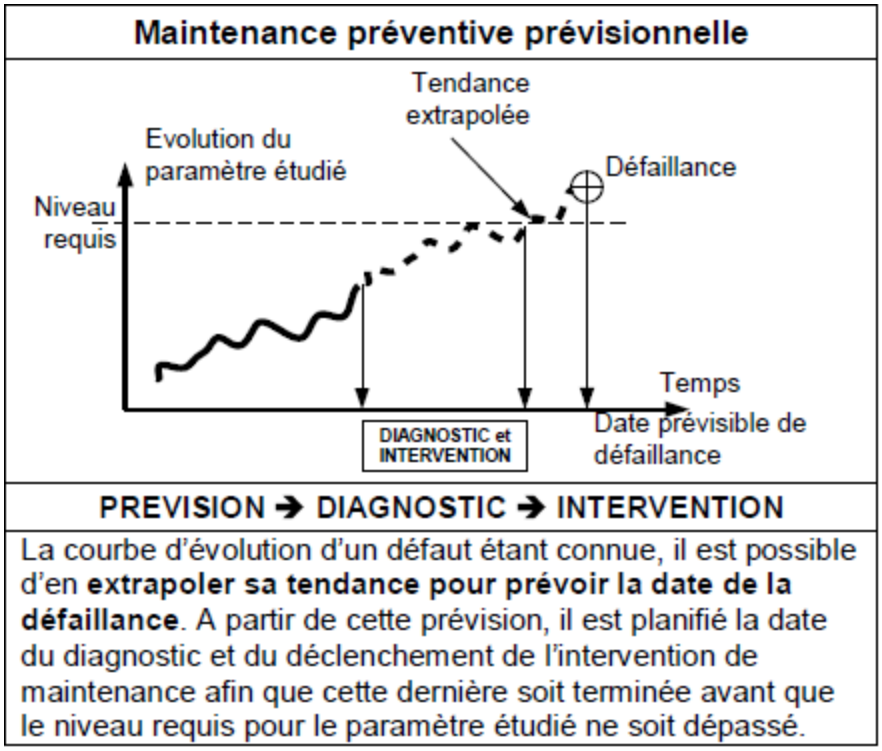


Figure I.4. *Maintenance préventive prévisionnelle* [13]

I.10 Conclusion

La maintenance générale est essentielle pour garantir le bon fonctionnement, la longévité et la fiabilité des équipements, systèmes et infrastructures. Elle comprend des activités telles que la maintenance préventive et corrective, qui visent à éviter les pannes, à optimiser les performances et à réduire les interruptions de service. Grâce à une stratégie claire, à des programmes de maintenance bien définis et à l'utilisation de technologies modernes, les organisations peuvent améliorer leur productivité, leur efficacité opérationnelle et leur rentabilité, tout en prolongeant la durée de vie de leurs actifs et en assurant la satisfaction des utilisateurs.

Chapitre II
La maintenance basée sur la fiabilité

II.1 Introduction

Les principes de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) ont été introduits en aéronautique à la fin des années 1960 aux Etats-Unis sous le nom de Maintenance MSG-1 (Maintenance Steering Group). La MSG-1 a été mise au point pour l'avion Boeing 747 par des groupes de travail comprenant le constructeur, les compagnies aériennes et les autorités de certification.

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) est un véritable outil de conception de la maintenance préventive ; en conciliant les doubles enjeux disponibilité/coût global de possession des installations. Parmi les outils ou méthodes qu'elle utilise, les grilles d'analyse de mode de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC).

Cette technique apporte une connaissance approfondie du fonctionnement et des interactions d'un système, par l'analyse systématique des relations causes-effets. Elle occupe une place importante dans l'optimisation de la fonction maintenance.

Dans le présent chapitre, On présente la maintenance basé sur la fiabilité et sa relation avec la performance industrielle, la fiabilité, ses fonctions et ses lois, la défaillance et son Optimisation ainsi que leurs applications possibles dans l'industrie.

II.2 La maintenance basée sur la fiabilité

II.2.1 Historique de la MBF [14]

C'est principalement entre 1960 et 1980 que se sont développées les nouvelles philosophies de maintenance dans l'aviation. Dans les années 60, les programmes d'entretien étaient fondés sur des périodicités fixes de remplacement de composants calculées empiriquement.

Pour rendre plus intelligent les programmes, le « Maintenance Steering Group » a été formé avec des experts opérateurs et concepteurs d'aéronefs. Il en a résulté la méthodologie MSG, laquelle est devenue MSG-2 après expérience.

MSG-2 a comme philosophie : que peut-on faire pour empêcher un composant de tomber en panne ?

En 1978, la Marine américaine a mandaté un groupe d'ingénieurs à étudier le comportement en fiabilité des composants d'avions. Depuis longtemps la théorie de la fiabilité utilise la courbe en forme de baignoire **(**figure II.1) comme le modèle de référence. On leur étude démontre que 4% des composants suivent cette règle, ce sont les composants qui s'usent tels que les roulements à billes. D'autres modes de comportement sont alors développés. Fait le plus remarquable, 68% des composants ont une courbe montrant des problèmes de jeunesse au début, mais par la suite un taux de défaillance stable, par exemple les composants électroniques, les logiciels.

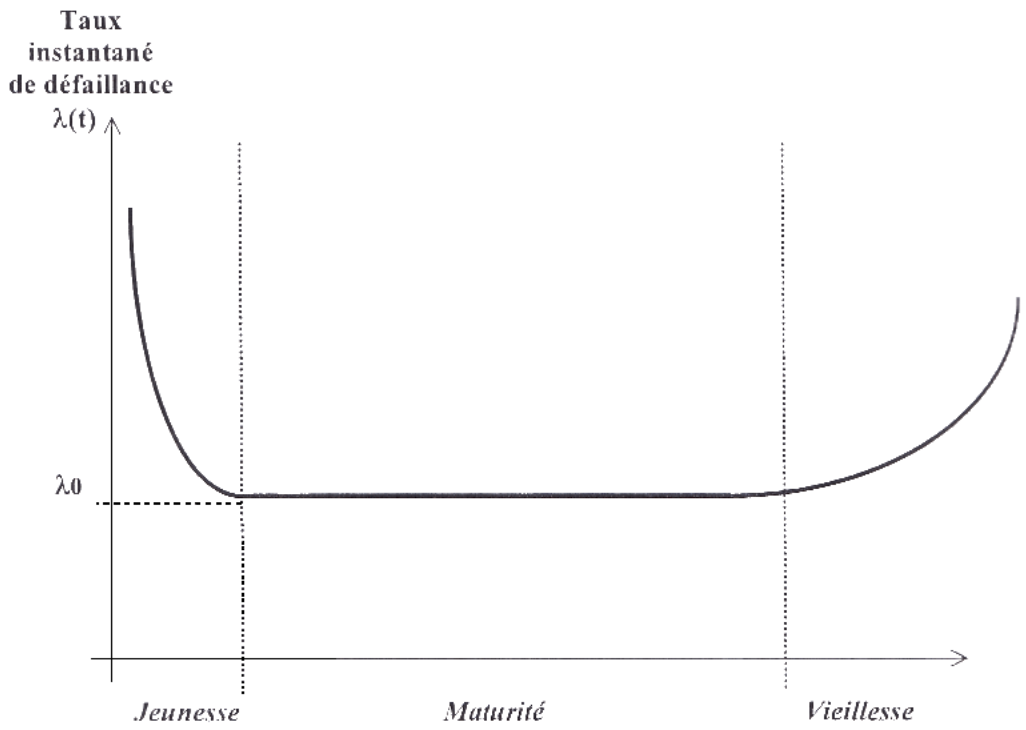


Figure II.1. *Courbe de baignoire* [15]

Une méthodologie d'établissement de programmes de maintenance appelée **MBF (maintenance basée sur la fiabilité)** a alors été mise au point.

L'augmentation importante des coûts de carburant et l'amélioration de la fiabilité des nouveaux composants ont exercé une pression pour réviser encore l'approche pour donner plus d'importance aux réductions de coûts. C'est devenu MSG-3, laquelle a utilisé l'approche logique de la MBF.

II.2.2 Définition de la MBF

Pour minimiser l'impact des arrêts sur la production et traiter rapidement les problèmes des arrêts accidentels de la machine de production qui sont considérés comme une source de perturbation et de perte de productivité, les activités de maintenance doivent être intégrées à la gestion de production. Il s'agit d'une technique de maintenance applicable sur les équipements et les machines de production, cette technique s'appelle "Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)", qu'est de planifier l'exécution des autres tâches de maintenance, en altérant le moins possible le plan de production, et tout en respectant au mieux la périodicité de maintenance des équipements.

La Maintenance Basée sur la Fiabilité est une application pour élaborer un plan de maintenance « analyse de défaillance plus un plan de maintenance élaboré »

Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des Opérations d'entretien destinées à accroitre la fiabilité ou pallier des défaillances.

Plus généralement, elle fait partie d'un ensemble d'actions effectuées pour que l'entreprise puisse prospérer. En effet, les installations industrielles sont perturbées, tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements qui affectent les couts de production, la qualité des produits et des services, la disponibilité, la sureté, la sécurité des personnes...

II.2.3 Objectifs de la MBF [16]

La maintenance basée sur la fiabilité a pour but :

- D'élaborer un programme de maintenance préventive optimisé, ayant pour but la sûreté de fonctionnement et des moyens de production, en tenant compte des aspects économiques.
- L'amélioration de l'organisation de la maintenance, ceci malgré le manque de ressources générales. C'est la marche nécessaire pour aller vers la certification de l'entreprise.
- La conservation des données de maintenance et de production (base de données) est également un objectif non négligeable de cette méthode. Il est très important que le programme de maintenance préventives s'approche d'un niveau optimal afin de minimiser les risques de défaillance, tout en conservant une capacité de service maximale des moyens de production et en dégageant des facteurs de gains dans les entreprises. Cette optimisation doit donc s'appuyer sur une optimisation technique (obtention du plan de maintenance technique (PMT)) suivi d'une évolution économique tenant compte des contraintes organisationnelles et conduisant un plan de maintenance optimisé (PMO) ; la mise en œuvre de cette étape pourra conduire très souvent à une diminution des coûts de maintenance à performance égale.
- La modification des équipements dans le temps, le vieillissement des installations et matériels, induisent un besoin complémentaire de définition des plans de maintenance rendant dépassées les préconisations des constructeurs. Le but de chacun est l'obtention d'un outil de production sûr de fonctionnement à un coût raisonnable. La MBF entre tout naturellement dans la partie « logistique de maintenance » de la notion de la sûreté de fonctionnement. C'est pourquoi la MBF s'appuie sur une méthodologie d'élaboration d'un programme de maintenance préventive pour les équipements (en exploitation) au moyen d'une approche logique, structurée, pragmatique et sûre.
- Un certain nombre d'apports de la démarche MBF peuvent être évoqués dès à présent, ils sont souvent difficiles à quantifier et sont évidemment fonction du type d'industrie et des

moyens mis en œuvre pour mettre en place la MBF. La maintenance peut être vue sous les trois aspects organisationnels, techniques et humains, les bénéfices attendus se décomposent selon ces trois aspects. La mise en place d'un plan de maintenance optimisé dans l'entreprise qui s'appuie sur la démarche MBF provoque une diminution du nombre de tâches de maintenance préventives qui sont supprimées ou remplacées par de la maintenance corrective :

- La maintenance conditionnelle augmente.
- Le besoin en pièce détachées diminue.
- Le remplacement est mieux justifié.

➢ Une remise en cause de certaines solutions de conception peut aussi être recommandée.

II.3 La fiabilité

La fiabilité est l'une des composantes essentielles de la qualité d'un produit et elle est retenue en tant que critère fondamental pour leur élaboration. Elle est prise en considération dès le stade de la conception.

II.3.1 Définition selon AFNOR [17]

La définition adoptée par la plupart des spécialistes s'énonce en ces termes : « la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation prévues et pour une période de temps déterminée ». Aussi, la notion de fiabilité correspond à la confiance de l'usager dans l'appareil qu'il utilise ou qui lui est proposé.

La notion de temps peut prendre la forme :

- De nombre de cycles effectués : machine automatique.
- De distance parcourue : matériel roulant.
- De tonnage produit : équipement de production

II.3.2 Modèle mathématique pour la fiabilité [18]

II.3.2.1 Fonction de fiabilité R(t)

La durée de vie d'un système est une variable aléatoire notée. La fiabilité du système (ou probabilité de bon fonctionnement) au temps t est donnée par :

$$\boldsymbol{R(t) = Prob(T > t)} \qquad \textbf{(II.1)}$$

Où est l'instant d'apparition de la première défaillance et 0, t- est la durée de fonctionnement de **l'équipement.**

II.3.2.2 Probabilité de défaillances F(t)

C'est la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps, [0, t].

Elle est définie par la relation :

$$\boldsymbol{F(t) = 1 - R(t) = Prob(T \leq t)} \quad \textbf{(II.2)}$$

Qu'on peut aussi écrire sous la forme suivante :

$$\boldsymbol{F(t) + R(t) = 1} \quad \textbf{(II.3)}$$

II.3.2.3 Densité de probabilité de défaillance f(t)

La densité de probabilité de défaillance est la probabilité de voir le système cesser de fonctionner entre t et t+dt. Elle est définie par :

$$\boldsymbol{f(t) = \lim_{dt \to \infty} \left(\frac{prob(t<T<t+dt}{dt} \right)} \quad \textbf{(II.4a)}$$

$$\boldsymbol{f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}} \quad \textbf{(II.4b)}$$

II.4 **Défaillance** [19]

II.4.1 Définition de la défaillance

C'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

On dira qu'une entité connait une défaillance lorsqu'elle n'est plus en mesure de remplir sa (ou ses) fonctions par extension on considère par fois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité a une fonction requise : les tolérances associés doivent alors être définis.

II.4.2 Types de défaillance

Un équipage d'opération n'est pas souvent en mesure de rapporter une défaillance comme tel. Il constate plutôt une condition d'opération insatisfaisante, un symptôme. Cette condition peut toutefois être conforme aux normes ou être une réelle défaillance. Sachant qu'une défaillance se définit par une condition insatisfaisante, il y a deux types de défaillances :

- **Défaillance fonctionnelle :** une défaillance fonctionnelle est l'inhabilité d'un article (ou de l'équipement qui le contient) à rencontrer un niveau de performance spécifique.
- **Défaillance potentielle :** une défaillance potentielle est une condition physique identifiable indiquant qu'une défaillance fonctionnelle est imminente. Le seuil de la défaillance potentielle est fonction de l'intervalle entre les inspections.

II.4.3 Classification des défaillances [19]

II.6.3.1 Classification en fonction de la rapidité de manifestation :

- **Défaillance progressive :**

Défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité.

- **Défaillance soudaine :**

C’est la défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui n’aurait pas pu être prévue par un examen ou surveillance antérieurs.

II.6.3.2 Classification en fonction de leur amplitude :

- **Défaillance partielle :**

C’est la défaillance résultante de déviation d’une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées mais telle qu’elle n’entraine pas une disparation complète de la fonction requise.

- **Défaillance complète** :

C’est la défaillance résultante de déviation d’une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu’elle entraine une disparition complète de la fonction requise.

II.6.3.3 Classification en fonction des causes :

- **Défaillance première :**

Défaillance d’une entité dont la cause directe ou indirecte n’est pas la défaillance d’une autre entité. Généralement une réparation d’une entité est nécessaire pour le remettre en état de fonctionnement.

- **Défaillance seconde :**

Il s'agit d'une situation où une entité tombe en panne en raison de la défaillance directe ou indirecte d'une autre entité qui n'a pas été correctement évaluée et dimensionnée. En général, il est nécessaire de réparer cette entité pour la remettre en état de fonctionnement. Les défaillances d'autres entités, les conditions environnementales spécifiques et les erreurs humaines peuvent également être à l'origine de cette situation.

- **Défaillance de commande :**

Défaillance d’une entité dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d’autre entité et pour laquelle cette entité a été qualifiée et dimensionnée.

Généralement une réparation d’une entité n’est pas nécessaire pour le remettre en état de fonctionnement. On est présence d’une telle défaillance lorsque l’entité change l’état à la suite de l’émission de signaux de commande ou de contrôle intempestive.

II.4.4 Taux de défaillance [20]

Il représente la probabilité de défaillance d’un système entre deux instants **t** et **t+dt**, sachant que le système considéré est en fonctionnement (l’instant t). Il s’agit donc d’une densité de probabilité conditionnelle de défaillance.

D’après le théorème des probabilités conditionnelles cette probabilité est égale à :

$$\lambda = \frac{F(t+dt)-F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1-F(t)} \qquad \textbf{(II.5)}$$

D’une manière générale, le taux de défaillance d’une variable aléatoire représentant la durée de vie d’un matériel a la forme suivante (dite en baignoire)

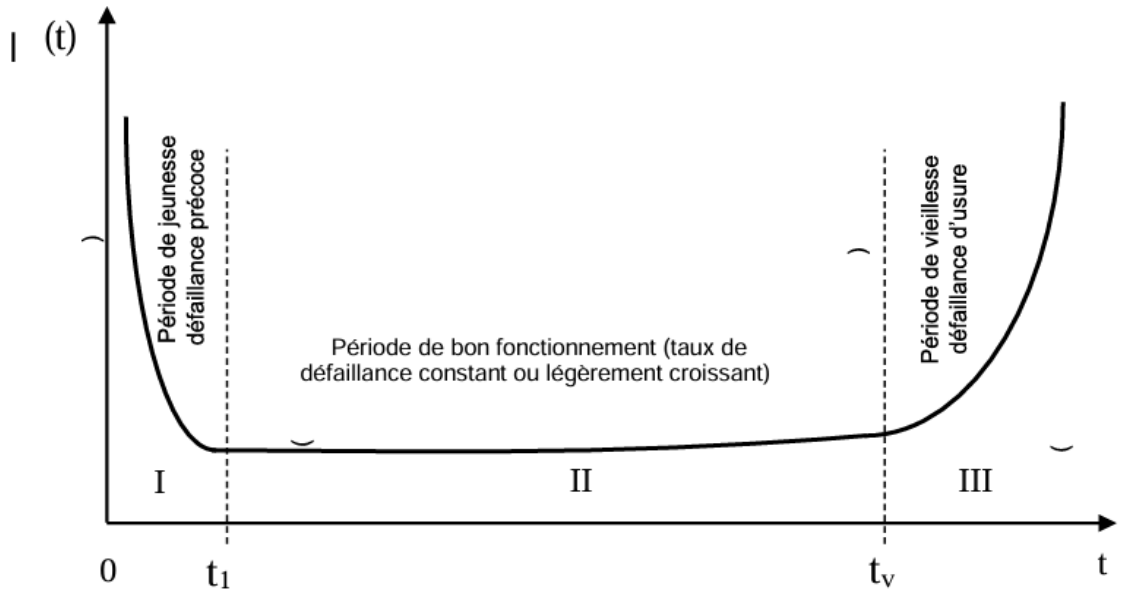


Figure II.2 . *Allure du taux de défaillance en fonction du temps (courbe en baignoire)*

- **Zone de défaillances de jeunesse I** : défaillances de réglages et de mise au point. la période des « maladies infantiles ». On a un taux de défaillance décroissant. Dans la pratique et afin que cette période se produise avant la vente du matériel, le fabricant procèdera à un rodage de son matériel.
- **Zone de défaillances aléatoires II** : défaillances accidentelles ne dépendant pas de l’âge du système. C’est la période de bon fonctionnement. Les défaillances surviennent de manière aléatoire et ne peuvent être prévues par un examen technologique du matériel.
- **Zone de défaillances d’usure III** : les défaillances dépendent du temps, le processus de détérioration pour cause d’usure est commencé. Elle est constatée par un examen technologique simple.

II.5 Indicateurs de maintenance [21]

Un **indicateur de maintenance** est primordial pour toute entreprise équipée de biens dont le bon fonctionnement impacte l’activité et les résultats (l’industrie tout particulièrement).

La sélection et la **mise en place d'indicateurs de maintenance** répondent aux objectifs spécifiques de l'entreprise, ils doivent donc être consciencieusement collectés, via des capteurs ou des interventions humaines, et analysés pour être transformés en actions à prévoir, selon les propres besoins (augmentation de la production, de la qualité, bien-être et sécurité des employés, etc.).

On peut répertorier les indicateurs de maintenance en deux grandes familles :

II.6.1 Les indicateurs clés de performance « KPI maintenance »

On distingue :

- La disponibilité des équipements.
- Leurs fiabilités.
- Leurs rendements.
- Leurs efficiences.
- Le temps moyen entre les pannes.
- L'efficience du service maintenance.

II.6.2 Les indicateurs de résultat

Relatifs notamment au respect du budget de maintenance et à la gestion des stocks.

Le calcul de la fiabilité avec la MTBF

La MTBF est l'un des indicateurs permettant d'appréhender la fiabilité d'un équipement, avec le taux de défaillance, ou taux de panne.

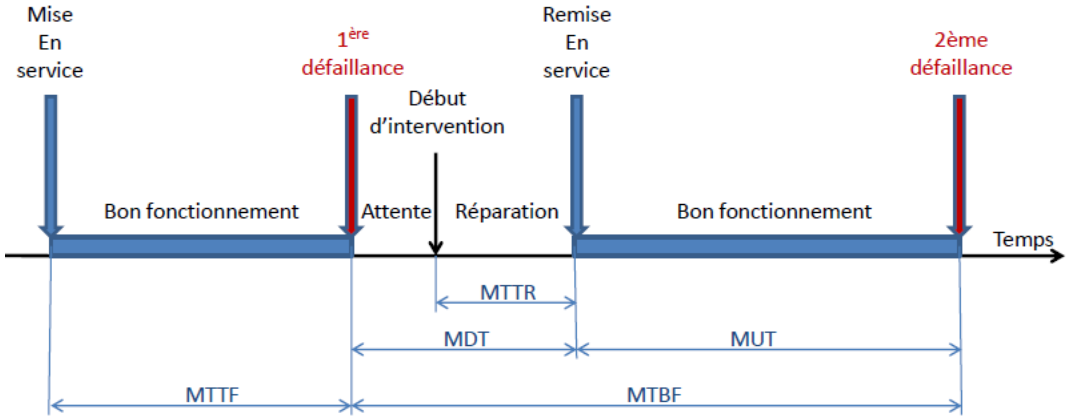


Figure II.3. *Diagramme des temps moyens*

- MTTF ou MTFF (Mean Time To First Failure) : temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance.

- MTBF (Mean Time Between Failure) : temps moyen de bon fonctionnement entre deux défaillances d'un système réparable.

- MDT (Mean Down Time) : durée moyenne de défaillance comprenant la détection de la panne, la durée d'intervention, le temps de la réparation et le temps de remise en service.

- MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

- MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de bon fonctionnement après réparation.

II.6 Les lois de fiabilité [22]

II.6.1 Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle

Cette loi repose sur l'hypothèse « λ =constante » ; dans ce cas les défaillances aléatoires émergent sous l'action de cause diverse et indépendante par position à la période suivante, dite de vieillesse, pendant laquelle un ou plusieurs modes de défaillance prédominante apparaissent (fatigue, corrosion, etc.). L'électronique se prête bien à l'utilisation de la loi exponentielle, dès lors que les composants sont déverminés.la plupart des analyses des défaillances prévisionnelles de fiabilité et de maintenabilité repose sur les hypothèses exponentielles.

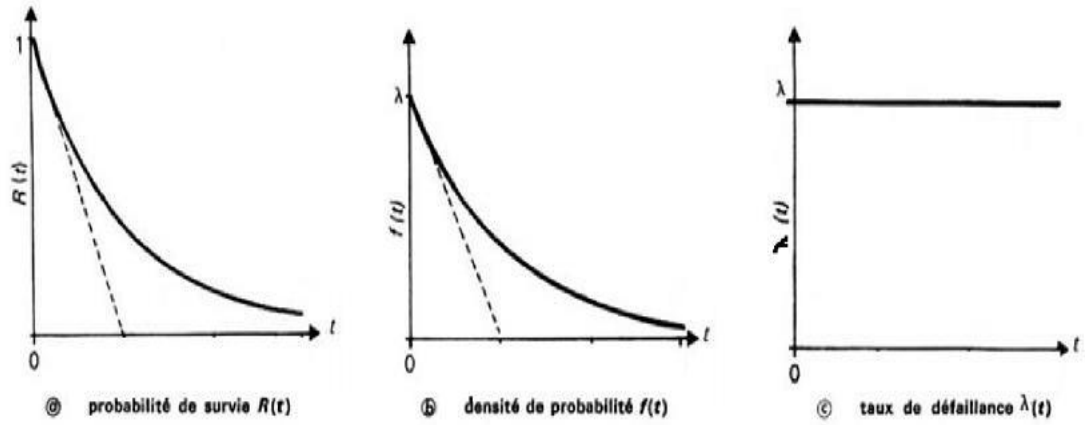


Figure II.4. ***Principales propriétés de la distribution exponentielle***

II.6.2 La loi de Weibull :

Les modèles de variabilité des données sont appelés distributions. À partir de la bonne distribution, nous pouvons estimer la probabilité attendue d'obtenir un résultat particulier lors d'un test ou d'une utilisation par un client. Le choix du modèle approprié pour la variabilité de mesure est l'objectif principal de la statistique. Une distribution peut être présentée sous forme de fonction de densité de probabilité (FDP) ou de fonction de distribution cumulative (FDC).

Les distributions possibles de valeur extrême est appelée la distribution de Weibull. C'est l'une des solutions les plus largement utilisées pour modéliser la variation des choses, en particulier pour les données de durée de vie (données d'âge à défaillance) et de fiabilité.

La méthode de Weibull fonctionne avec des échantillons extrêmement petits, même deux ou trois défaillances pour une analyse d'ingénierie. Cette caractéristique est importante dans les problèmes de sécurité aérospatiale et dans les tests de développement avec de petits échantillons. La distribution de Weibull est largement utilisée dans l'analyse de la fiabilité et des données de durée de vie en raison de sa polyvalence. Selon les valeurs des paramètres, la distribution de Weibull peut être utilisée pour modéliser une variété de comportements de durée de vie.

Fondamentalement, l'analyse de Weibull est effectuée pour estimer la prédiction de la durée de vie du bien. La fonction de fiabilité de la distribution est simplement de 1 moins la FDC.

La fonction de fiabilité pour la distribution de Weibull à trois paramètres est ensuite donnée par :

$$\boldsymbol{R(t) = e^{-(\frac{t-\gamma}{\eta})^{\beta}}} \qquad \textbf{(II.6)}$$

Le paramètre d'échelle, η (eta), définit où se trouve la majeure partie de la distribution. Le paramètre de forme, β (béta), définit la forme de la distribution, et le paramètre de localisation, γ (gamma), définit la position de la distribution dans le temps. Notez que t est le temps, une variable.

Pour une distribution à deux paramètres, le paramètre de localisation γ devient 0. La fonction de fiabilité devient alors :

$$\boldsymbol{R(t) = e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}}} \qquad \textbf{(II.7)}$$

Lorsque β = 1, le taux de défaillance est constant, et la distribution de Weibull est égale à la distribution exponentielle :

$$\boldsymbol{R(t) = e^{t-\lambda}} \qquad \textbf{(II.8)}$$

Où λ = 1/η = taux de défaillance. La figure I.4 montre une courbe en forme de baignoire avec la formule de fiabilité de Weibull et avec β < 1, mortalité précoce ; β = 1, régime de taux de défaillance constant (qui correspond à la durée de vie utile de actif) ; et β > 1, forte augmentation, également appelée phase d'usure.

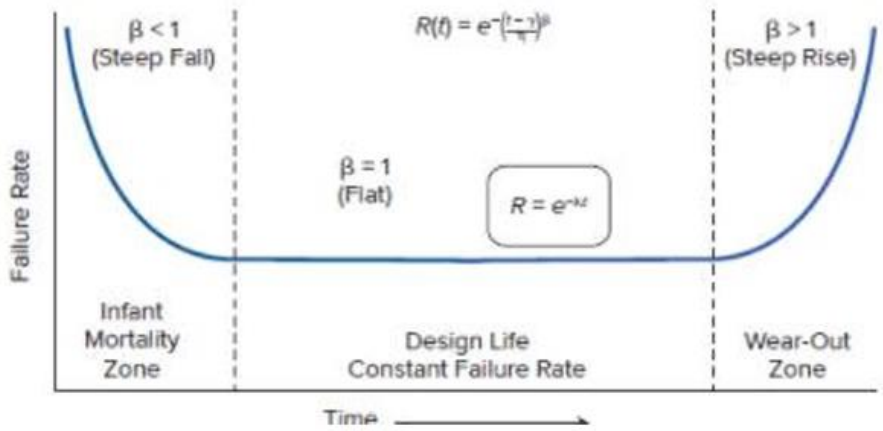


Figure II.5 *Courbe en forme de baignoire avec la fiabilité de Weibull et la distribution exponentielle*

II.6.3 Méthode de Pareto « ABC » OU « 20/80 »

Le diagramme de Pareto est un outil statistique qui permet d'identifier l'importance relative de chaque catégorie dans une liste d'enregistrements, en comparant leur fréquence d'apparition. Un diagramme de Pareto est mis en évidence lorsque 20 % des catégories produisent 80 % du nombre total d'effets.

En maintenance, le principe de Pareto est utilisé pour identifier les équipements ou les composants qui sont responsables de la majorité des temps d'arrêt ou des coûts de maintenance. Il est basé sur l'observation que souvent, un petit nombre de défaillances sont responsables de la majorité des temps d'arrêt ou des coûts de maintenance. En appliquant le principe de Pareto, les gestionnaires de maintenance peuvent concentrer leurs efforts et leurs ressources sur les équipements ou les composants qui ont le plus grand impact sur la production ou les coûts de maintenance, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance globaux.

Le diagramme de Pareto est également appelé :

- Méthode "ABC".
- Règle des 80/20.

II.6.3.1 L’objectif de digramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un moyen simple de classer les phénomènes par ordre d’importance. Parmi les objectifs on cite :

- Faire apparaitre les causes essentielles du phénomène.
- Hiérarchiser les causes du problème.

- Évaluer les effets d'une solution.
- Mieux cibler les actions à mettre en œuvre.

II.6.3.2 L'objectif de l'analyse ABC :

L'analyse ABC est une analyse permettant :

- D'établir la proportionnalité ou l'importance de chaque élément étudié dans l'ensemble des éléments.
- De trier et donc de classer les éléments les uns par rapport aux autres.
- De tirer les enseignements de cette proportionnalité.
- De vérifier la concentration grâce à l'indice de concentration de Gini.
- De déterminer l'importance relative de causes ou d'autres critères.
- De les classer par ordre d'importance.
- De dégager les axes prioritaires.

La courbe « ABC », quant à elle, découpe la courbe de Pareto en trois segments A, B et C :

- "A" représente 75 à 80% de l'ensemble.
- "A" + "B" représente 90 à 95% de l'ensemble.
- "A" + "B" + "C" représente 100% de l'ensemble.

Ainsi, lorsque les causes correspondant au segment "A" sont traitées, 75 à 80% des problèmes sont supprimés. Par cet outil, les priorités d'action sont donc rapidement visualisées.

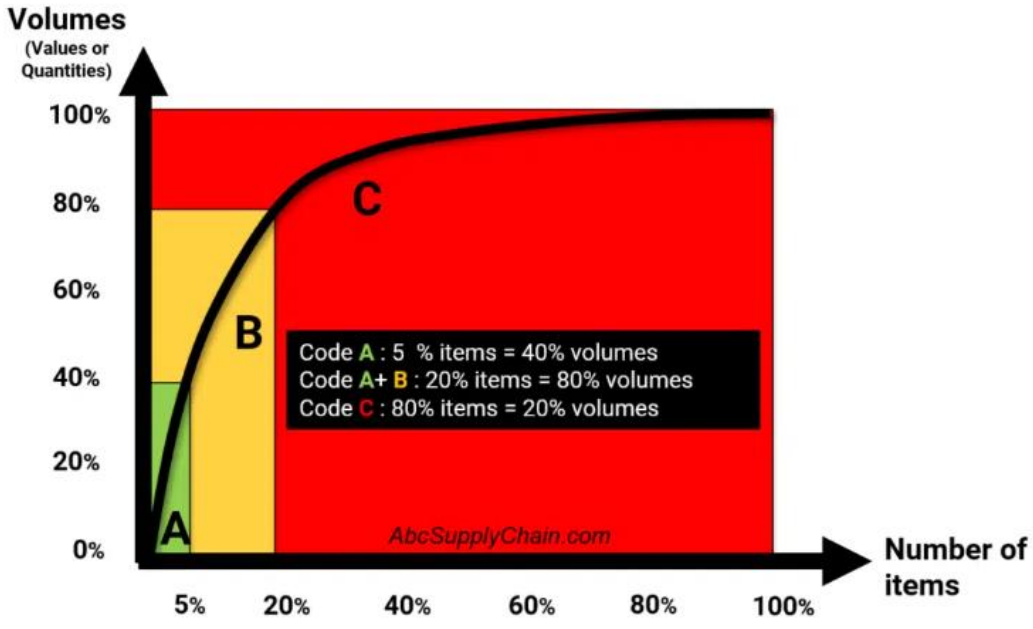


Figure II.6. *Diagramme de Pareto "ABC"*

II.7 L'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité [23]

La méthode d'optimisation de la maintenance basée sur la Fiabilité constitue une approche globale d'aide à la décision pour déterminer les actions de maintenance préventive permettant de maitriser les coûts et le niveau requis de disponibilité d'une installation ou d'un système, et plus largement, pour garantir un niveau de sureté de fonctionnement. C'est une démarche rationnelle qui vise à limiter au mieux les conséquences des défaillances d'origine matérielle, sur le fonctionnement de l'installation.

L'étude des systèmes et des matériels permet de déterminer :

- Ou les actions préventives sont nécessaires (sur quels matériels).
- Quand (avec quelle fréquence) on doit les réaliser.
- Quelles sont les actions à effectuer.

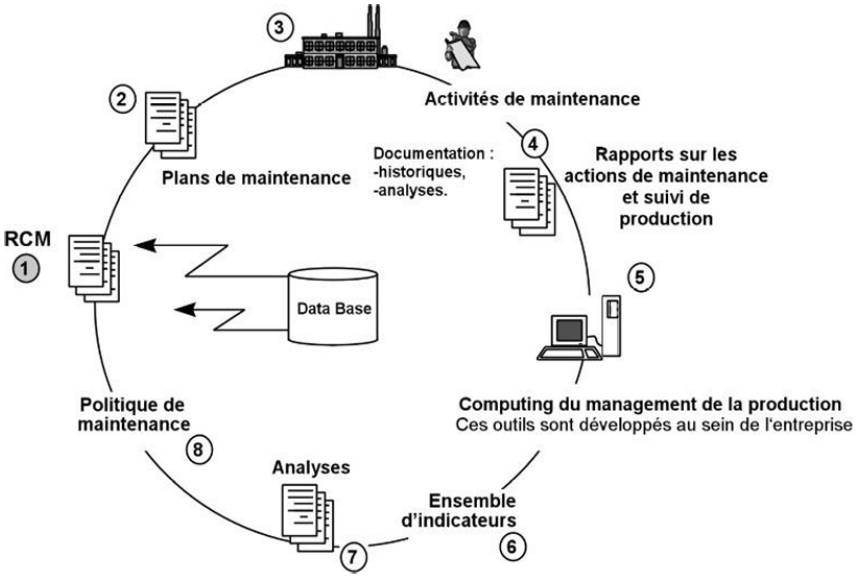


Figure II.7. *Mise en place d'une boucle d'amélioration et d'un retour d'expérience*

Les objectifs de la maintenance basée sur la fiabilité sont la maîtrise des coûts et l'optimisation économique de la maintenance, suivant le principe : « exercer l'effort au bon endroit », la mise en œuvre d'une méthode structurée et rationnelle, analyse de chaque mode de défaillance fonctionnelle et l'utilisation du retour d'expériences pour réajuster les programmes de maintenance et leur pertinence. L'objectif de la MBF est de proposer une méthode structurée permettant d'établir un plan de maintenance sélectif à partir de la criticité des équipements, puis de leurs défaillances identifiées et cela à partir d'une démarche participative.

L'objectif principal de la maintenance basé sur la fiabilité est l'amélioration de la disponibilité des équipements sélectionnés comme critique ;

Améliorer la disponibilité implique la réduction des défaillances techniques par la mise en place d'un plan préventif « allant à l'essentiel », mais aussi la réduction des durées de pertes de production par une nouvelle répartition des tâches entre production et maintenance. D'autres objectifs sont recherchés comme la maîtrise des coûts par l'optimisation du plan de maintenance préventive, en faisant porter l'effort de prévention « au bon endroit au bon moment », donc par élimination de tâches préventives constatées improductives. La mise en œuvre d'une démarche structurée, par analyse systématique de chaque mode de défaillance qui permet de justifier les décisions prises et la mise en œuvre d'une démarche participative au niveau des groupes de travail MBF ou au niveau des tâches réparties entre production et maintenance. La méthode s'appuie sur une démarche de type AMDEC et des matrices de criticité pour hiérarchiser les équipements, puis les causes de défaillances. L'utilisation ultérieure d'arbre de décisions permet de déterminer les actions à entreprendre dans le cadre d'un plan de maintenance préventive, ce qui permet par la suite à une étude type OMF.

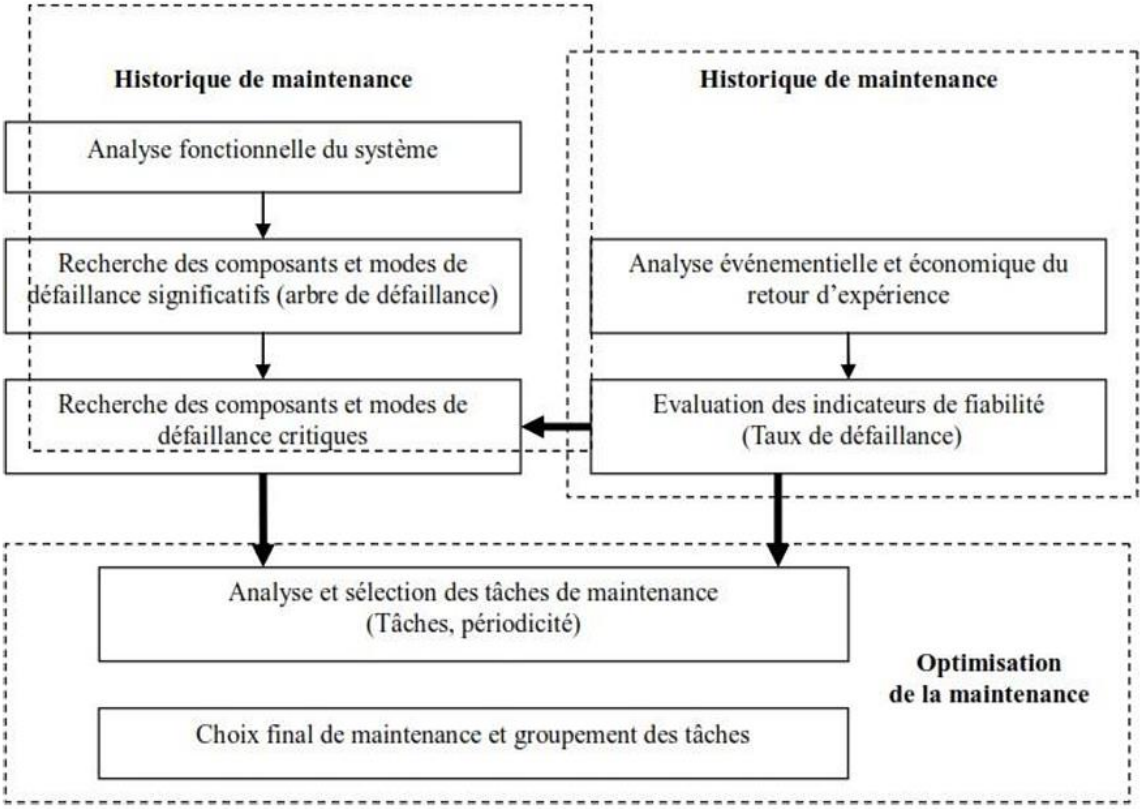


Figure II.8. *Méthode d'optimisation basée sur la fiabilité*

II.8 Les problématiques industrielles et les applications possibles

Les stratégies de maintenance issues de la démarche OMF sont complexes dans la mesure où elles peuvent être composées de tâches de maintenance diverses, et peuvent ne pas reposer sur

une structure simple. D'autre part, les systèmes maintenus par ces programmes sont des systèmes multi composants, avec des dépendances entre les matériels, et la présence de plusieurs mécanismes de dégradation et modes de défaillance éventuellement en compétition pour concourir à leur défaillance.

Ces difficultés peuvent être des obstacles à l'évaluation quantitative des stratégies de maintenance.

Elles doivent être affrontées pour pouvoir répondre aux problématiques industrielles actuelles.

L'application des études d'optimisation de maintenance basée sur la fiabilité (OMF) passe par plusieurs étapes :

- L'analyse fonctionnelle (représentations du fonctionnement des systèmes étudiés) ;
- L'analyse de dysfonctionnement des systèmes (modes de défaillance des équipements)
- L'analyse du retour d'expérience (données pour établir les choix de maintenance)
- L'analyse des dysfonctionnements des équipements (fournir les informations nécessaires à l'évaluation de la criticité des modes de défaillances)
- La sélection des tâches de maintenance (proposition des tâches élémentaires justifiées pour couvrir les modes de défaillance et écrire le programme de maintenance préventive).

II.9 Conclusion

Lorsqu'un équipement a été utilisé pendant une longue durée correspondante à sa durée de vie, celui-ci atteint un certain degré d'usure qui compromit son état fonctionnel, à cet effet des dispositions doivent être prises pour qu'on puisse encore l'utiliser pour la production. Au cours de ce travail de restauration, les parties critiques de l'équipement ayant besoin de réparation doivent être remises en état ou remplacées de façon à rendre l'équipement plus sûr et minimiser ultérieurement le travail d'entretien.

La MBF est une approche stratégique qui vise à optimiser la gestion des actifs et à garantir leur fiabilité et leur disponibilité. En se basant sur des données de fiabilité, des modèles statistiques et des outils d'analyse, la MBF permet d'anticiper les défaillances, de planifier les activités de maintenance de manière proactive et de maximiser la durée de vie des équipements. Grâce à cette approche, les organisations peuvent réduire les temps d'arrêt non planifiés, les coûts de maintenance et les impacts négatifs sur la productivité.

Chapitre III

Présentation de l’entreprise et du groupe électrogène

1. Introduction

Un **groupe électrogène** est un équipement électromécanique conçu pour produire de l'électricité de manière autonome en convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est largement utilisé dans de nombreux domaines tels que l'industrie, le bâtiment, les hôpitaux, les centres de données, et même dans les zones isolées dépourvues d'accès au réseau électrique.

Le fonctionnement d'un groupe électrogène repose sur le **principe de l'induction électromagnétique**, où un alternateur, entraîné par un moteur thermique (essence, diesel, gaz), génère une tension électrique exploitable. Les groupes électrogènes peuvent être classés en différentes catégories selon plusieurs critères, notamment la source d'énergie, le mode d'utilisation et la puissance délivrée :

- **Groupes électrogènes portables** : Généralement de faible puissance, ils sont destinés à des usages ponctuels comme l'alimentation d'outils ou de petits appareils dans les chantiers ou les foyers.
- **Groupes électrogènes industriels** : De puissance plus élevée, ils sont conçus pour alimenter des bâtiments entiers ou des installations industrielles critiques en cas de coupure de courant. Ils peuvent fonctionner de manière **secours** (démarrage automatique en cas de panne réseau) ou **continue** (source principale d'énergie dans les zones non raccordées).

Parmi ces derniers, les **groupes électrogènes diesel** sont les plus couramment utilisés dans les environnements industriels pour leur robustesse, leur autonomie, et leur fiabilité en conditions sévères.

Les groupes électrogènes sont essentiels dans de nombreuses applications industrielles et commerciales, notamment dans :

- La continuité de service dans les hôpitaux et les laboratoires,
- L'alimentation des serveurs dans les « data centers »,
- Le maintien de la production dans les usines,
- L'éclairage de chantiers ou d'événements temporaires.

Ils présentent plusieurs avantages : **autonomie énergétique, flexibilité d'installation**, et **réduction des pertes de production** en cas de défaillance du réseau électrique. Toutefois, leur utilisation peut nécessiter une maintenance rigoureuse, ainsi que des dispositifs de sécurité pour surveiller les paramètres comme la température du moteur, le niveau d'huile ou la tension de sortie.

En résumé, les groupes électrogènes jouent un rôle crucial dans la sécurité énergétique des installations industrielles et commerciales. Ils garantissent une alimentation fiable, notamment dans les situations d'urgence, et sont indispensables à de nombreux secteurs stratégiques.

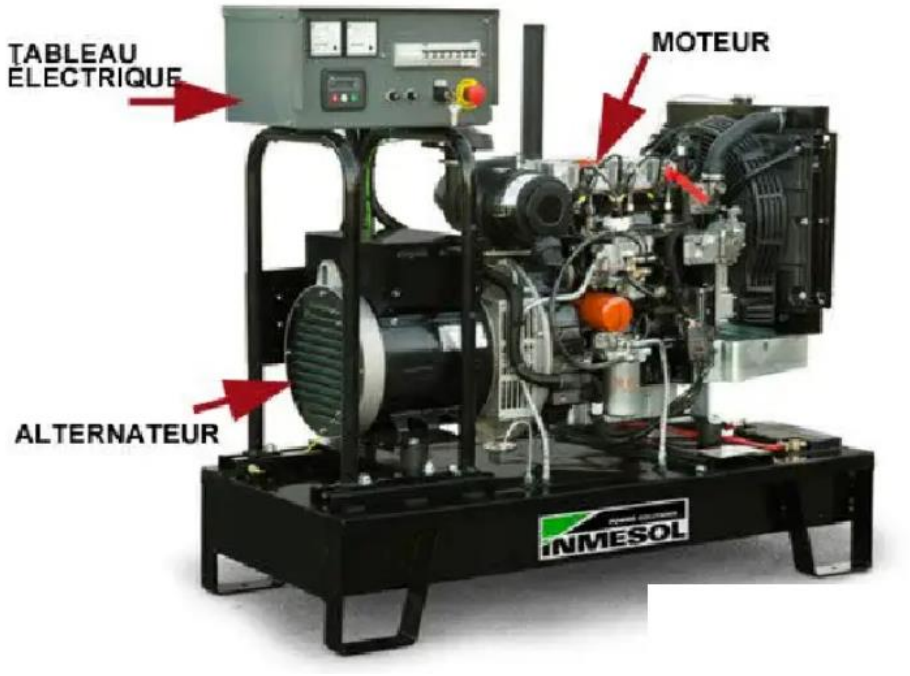


Figure III.1. Composition principale d'un groupe électrogène (moteur, alternateur, tableau électrique)

2. Présentation de l'entreprise

2.1 Introduction

Le groupe **HENKEL** est présent dans 125 pays, répartis sur les cinq continents. Il emploie plus de **50 000** personnes, avec une implantation industrielle dans 75 pays. Le groupe HENKEL a fait ses preuves sur différents marchés.

Le groupe HENKEL est présent dans trois secteurs d'activités :

- **DETERGENTS ET PRODUITS D'ENTRETIEN :** 1ern Allemagne, 2ème en Europe.

Le groupe et les marques de produits HENKEL les plus connus et les plus appréciés, dont beaucoup sont distribués dans le monde, comprennent : le linge, la vaisselle, l'entretien de la maison.

Le portefeuille produit du groupe HENKEL comprend : détergents universels, lessives spéciales, adoucissants et détachants, produits pour lave-vaisselle, produits d'entretien, produits à récurer, produits de soin pour sols et moquettes, nettoyants bain et toilettes, nettoyants vitres,

nettoyants cuisines et autres produits d'entretien spécialisés. Marques Dial, Purex, Renuzit, Armour.

- **COSMETIQUES :** 1er en Allemagne, 4ème en Europe.

Les nombreux produits de marque développés, fabriqués et commercialisés dans le monde, dans le secteur cosmétiques, connus sur le marché sous la marque Schwarzcopf & HENKEL, se décomposent en un certain nombre de gammes de produits. Des articles de marque pour professionnels du secteur de la coiffure, c'est à dire Schwarzcopf professionnel, complètent leur gamme.

Cette gamme de produit HENKEL comprend : shampooings et après-shampooings, colorations, produits de styling et de permanente, savons, produits pour le bain et la douche, déodorants, crèmes pour la peau, produits de soin de la peau, produits d'hygiène buccodentaire, parfums et fragrances, produits pour salons de coiffure. Marques Dial : Coast, Tone, Pure & Natural. .

- **COLLES, ADHESIFS ET PRODUITS D'ETANCHEITE :** leader mondial.

L'activité Colles et Adhésifs de HENKEL constitue une seule division responsable de ses activités dans le monde entier : adhésifs pour professionnels et adhésifs grand public.

Dans ce secteur, le groupe offre une large gamme de marque de produits pour la maison, le bureau et pour le marché du bricolage domestique. Pour les professionnels, elle fournit des adhésifs et des produits d'étanchéité pour la construction, la pose de sols, la toiture, la rénovation et le mobilier pour quelques-uns.

Le chiffre d'affaires de HENKEL pour les secteurs de détergents et d'entretien sont de 35% de l'ensemble des ventes, viennent ensuite le secteur des cosmétiques et des colles et mastiques industriels qui représente chacun approximativement 25% du chiffre d'affaires du groupe HENKEL. Étanchéité, il représente 15% du chiffre d'affaires

Quant au secteur des colles adhésifs et étanchéité, il représente 15% du chiffre d'affaires global. La société HENKEL Algérie est une société par action (SPA), qui dispose de deux unités de production situées à Réghaia (Centre), Chelghoum El Laid (Est)

- HENKEL Algérie emploie près de 1200 salariés
- L'Entreprise Nationale des Détergents et des Produits d'entretien (ENAD) a été créée en 1988 après la restructuration de la société nationale des industriels chimiques (SNIC) qui existe depuis 1967.

- Un accord de joint-venture a été signé en mai 2000 entre ENAD et le groupe Henkel, ce qui a conduit à la création de : Henkel-ENAD Algérie En 2005 la société devient 100 % Henkel :
- L'unité de production de Chelghoum laid s'intéresse essentiellement à la production des produits poudres Multi usages et machines (le chat, ISIS,....)
- Et celle à Réghaia produit se spécialise en produits liquides (lave-sol, Bref...)

3.2 Organisation de l'entreprise :

L'organisation hiérarchique au sein de l'unité de Chelghoum Laïd peut être résumée par l'organigramme suivant :

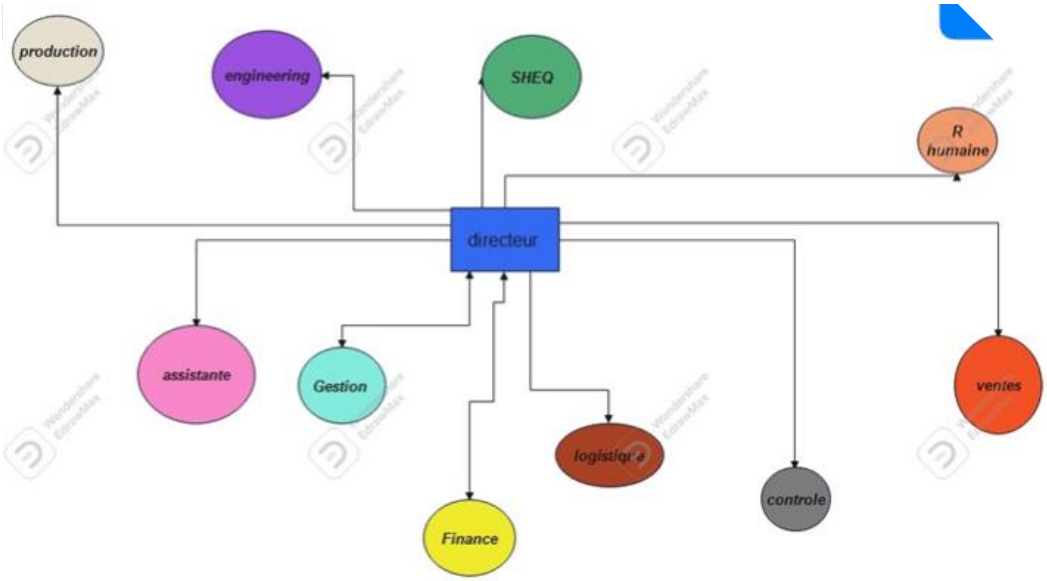


Figure III.2. Organigramme hiérarchique de l'unité de Chelghoum Laïd

2.2 Processus de production

Le détergent est fabriqué à partir d'une matière visqueuse qui s'appelle le Slurry, c'est un mélange liquide de matières premières solides : Carbonates ; Sulfates ; CMC et liquides ABO ; HEDPNa4 ; Silicate ; La matière active (l'eau + Acide Sulfurique + NaOH) avec la refonte (recyclage et réutilisation de la poudre fine du détergent).

Le Slurry (Mélange liquide) passe ensuite par l'étape du séchage, dans la chambre d'atomisation le liquide est arrosé (pulvérisation) ou il rencontre l'air chaud qui fait sécher les gouttelettes et les transforme en grains chauffées et montées sous une haute pression jusqu'à des hauts étages.

La figure suivante présente le dessin de la conduite Slurry installée en hauteur, à l'emplacement généralement réservé à l'air chaud, tandis que la conduite d'air chaud se trouve dans la position initialement prévue pour le Slurry.

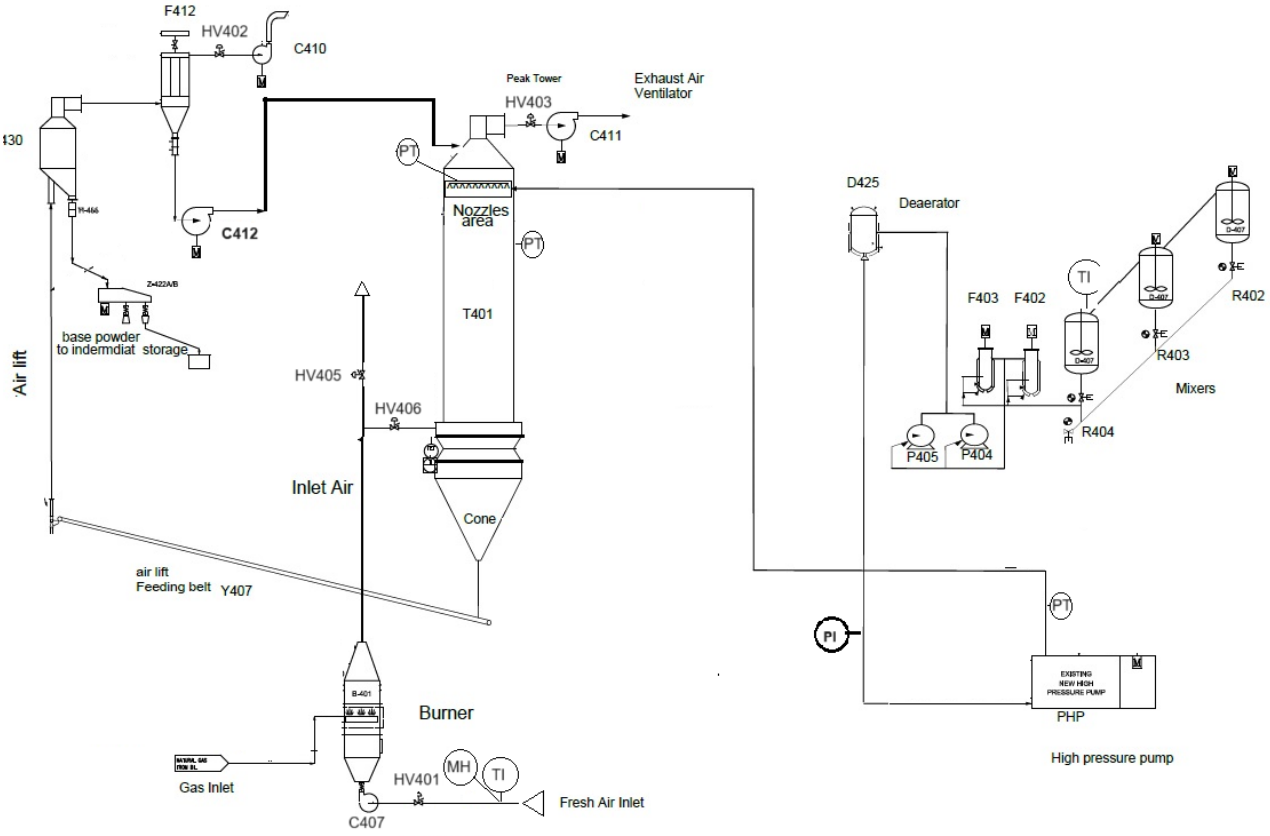


Figure III.3. Schéma de tuyauterie montrant la conduite Slurry en position haute et l'air chaud en position basse

Cela représente le principe de base pour la fabrication du détergent, il y aura d'autres étapes après cette opération, on résume la production dans les étapes suivantes :

- ✓ Le système Dosex assure le pesage et la préparation des ingrédients conformément aux doses et à la formule préétablies, avec un suivi en temps réel via la salle de commande.



Figure III.4. Le suivie de système dans la salle de contrôle

- ✓ Préparation, Homogénéisation (Mélangé 3 fois pour assurer l'homogénéité et souplesse du mélange)



Figure III.5. *Pompe haute pression PHP*

- ✓ Filtrage, Pompage (Du Slurry vers la tour d'atomisation)

Le séchage est au niveau de la tour d'atomisation : qui est un équipement clé utilisé pour transformer un mélange liquide de base en poudre détergente. Le principe de l'atomisation consiste à pulvériser la solution sous forme de fines gouttelettes dans un courant d'air chaud ; l'eau s'évapore instantanément, laissant une poudre sèche qui est ensuite récupérée à la base de la tour.



Figure III.6. : *La tour d'atomisation dans le procédé de fabrication des détergents*

- ✓ Transport pneumatique (air lift) de la poudre
- ✓ Tamisage (Elimination des grands grains)
- ✓ Stockage dans plusieurs silos
- ✓ Poste d'addition (Addition des éléments actifs : force bleue, les enzymes…)
- ✓ Aromatisation
- ✓ Conditionnement : il y'a plusieurs types de conditionnement

La figure suivante montre la machine VOLPACK, qui est une ensacheuse automatique formant, remplissant et scellant des sachets souples à partir d'un rouleau de film plastique. Dans l'industrie des détergents, elle permet de conditionner des produits liquides ou en poudre de manière rapide, hygiénique et efficace, tout en assurant une étanchéité optimale.



Figure III.7. *Machine VOLPACK utilisée pour le conditionnement des détergents*

La figure suivante représente une machine d'emballage automatique de cartons, plus précisément une fermeuse de caisses (ou formeuse/colleuse de cartons).



Figure III.8. *Machine de fermeture de cartons par bande adhésive*

2.3 L'électricité dans l'usine

L'alimentation électrique de l'usine repose sur plusieurs équipements essentiels assurant un fonctionnement continu et sécurisé :

2.3.1 Transformateurs abaisseurs 30 kV / 380 V

L'usine dispose de **quatre transformateurs électriques abaisseurs** de **30 kV à 380 V,** indispensables pour adapter la tension du réseau aux besoins internes de production. Un **transformateur électrique** est un **convertisseur** qui permet de **modifier les valeurs de tension et d'intensité** du courant alternatif, tout en conservant **la même fréquence et la même forme d'onde.**

Ces transformateurs assurent ainsi un approvisionnement électrique fiable et stable pour l'ensemble des installations industrielles.

En cas de coupure, le relais est assuré par un groupe électrogène, garantissant l'alimentation des moteurs indispensables au processus.

2.3.2 Groupe électrogène de secours

En cas de défaillance du réseau, un groupe électrogène industriel prend automatiquement le relais pour assurer la continuité du service, notamment sur les machines critiques comme les moteurs asynchrones utilisés pour l'homogénéisation, le pompage ou le transport pneumatique du produit.

- **Marque** : Perkins

- **Modèle** : 1106A-70TG1
- **Puissance** : 150 kVA (120 kW)
- **Type de moteur** : Diesel, 6 cylindres
- **Alternateur** : Leroy-Somer
- **Fréquence** : 50 Hz
- **Tension de sortie** : 400/230 V
- **Refroidissement** : Par eau
- **Autonomie** : Environ 8 heures avec réservoir standard

  Ce groupe électrogène est utilisé soit en secours lors de pannes, soit en fonctionnement continu pour alimenter les installations critiques de l'usine.

2.3.3 Moteurs asynchrones

Ces moteurs sont alimentés soit par le réseau principal, soit par le groupe électrogène en secours. Leur fonctionnement dépend donc directement de la stabilité de l'alimentation électrique. Les **moteurs asynchrones** sont largement utilisés dans les machines de production de l'usine. Il s'agit de **machines électriques à courant alternatif** caractérisées par **l'absence**



Figure III.9. *Transformateur de distribution alimentant les moteurs asynchrones*

de connexion directe entre le stator et le rotor. Leur **rotor en cage d'écureuil** leur vaut également l'appellation de **machines à cage,** en raison de leur structure robuste et simple.

Le **terme "asynchrone"** reflète le fait que la **vitesse de rotation du rotor** n'est **pas exactement égale** à la fréquence du courant alternatif alimentant le stator.

Ces moteurs sont **alimentés par un réseau triphasé** et peuvent être configurés selon deux types de **couplage** : **étoile** ou **triangle,** en fonction des besoins en puissance. Leur fiabilité et leur adaptation aux environnements industriels en font un composant essentiel des équipements de production.

2.3.3 Moteurs pas à pas

Un **moteur pas à pas** est également utilisé dans l'usine, **notamment dans les machines de conditionnement en sachets** comme les équipements de type **VOLPACK**. Ce type de moteur permet un **contrôle précis et progressif des mouvements,** ce qui est essentiel pour les opérations de dosage, de remplissage et de scellage dans le processus d'emballage.

2.3.4 Armoires électriques

Les armoires regroupent les équipements de commande : contacteurs, relais thermiques, temporisateurs, ainsi que les dispositifs de démarrage des moteurs (étoile-triangle).



Figure III.10. *Armoire électrique regroupant les équipements de commande et de protection*

2.3.5 Variateurs de vitesse

Présents dans les armoires, ils permettent de faire varier la vitesse de rotation des moteurs en ajustant fréquence et tension, selon les besoins du processus de production.

3. Les groupes électrogènes

Un groupe électrogène peut être considéré comme l'équivalent pour l'électricité de ce qu'est une source d'énergie autonome pour un système isolé. Il désigne toute machine électromécanique conçue pour produire de l'énergie électrique à partir d'une source d'énergie mécanique, généralement fournie par un moteur thermique. Ces équipements existent sous différentes formes et puissances, en fonction de leurs conditions d'utilisation spécifiques et des exigences en termes de puissance électrique, de fréquence et de tension.

3.1 But de la génération électrique autonome

La production autonome d'électricité est souvent nécessaire pour alimenter des installations en l'absence d'un réseau électrique fiable ou en cas de coupure. Cette opération permet de garantir la continuité de l'alimentation dans des lieux isolés, de sécuriser des systèmes sensibles comme les hôpitaux ou les centres de données, ou encore d'alimenter temporairement des équipements lors de travaux, de chantiers ou d'événements.

3.2 Les caractéristiques des groupes électrogènes

Les caractéristiques d'un groupe électrogène varient selon son type, son usage et ses spécifications techniques. Voici les principales caractéristiques que l'on peut retrouver sur un groupe électrogène :

1. **Type de moteur :**
   • Moteur diesel : Robuste, économique à long terme, utilisé pour les applications industrielles ou en secours.
   • Moteur essence : Plus léger, démarrage rapide, adapté aux petits besoins et à un usage occasionnel.
   • Moteur à gaz : Moins polluant, souvent utilisé dans les installations fixes.
2. **Puissance électrique délivrée :**
   • Puissance nominale : Puissance continue que le groupe peut fournir, mesurée en kilowatts (kW) ou en kilovoltampères (kVA).
   • Puissance maximale : Puissance que le groupe peut fournir en pointe pendant une courte durée.
3. **Tension et fréquence :**
   • Tension de sortie : Monophasée (230 V) ou triphasée (400 V) selon l'application.
   • Fréquence : 50 Hz ou 60 Hz selon les normes du pays.
4. **Autonomie :**
   • Capacité du réservoir : Volume de carburant contenu dans le réservoir, exprimé en litres.

• Temps de fonctionnement : Durée de fonctionnement en continu sans ravitaillement, en fonction de la charge.

5. **Système de démarrage :**
   • Démarrage manuel : Par lanceur ou manivelle.
   • Démarrage électrique : Par clé ou bouton.
   • Démarrage automatique (ATS) : Permet une mise en marche automatique lors d'une coupure de courant.
6. **Refroidissement :**
   • Refroidissement à air : Système simple utilisé dans les petits groupes.
   • Refroidissement à eau : Plus efficace pour les puissances élevées.
7. **Niveau sonore :**
   • Groupes ouverts : Plus bruyants, souvent utilisés à l'extérieur ou en zone industrielle.
   • Groupes insonorisés (coffrets ou canopées) : Réduction importante du bruit, adaptés aux zones urbaines ou sensibles.
8. **Mobilité :**
   • Portables : Faciles à transporter, sur roues ou à main.
   • Fixes : Installés de manière permanente dans des locaux techniques.
9. **Systèmes de régulation :**
   • Régulateur de tension : Stabilise la tension de sortie.
   • Régulateur de fréquence : Maintient une fréquence stable, essentiel pour certains équipements sensibles.
10. **Applications spécifiques :**
    • Industrielles : Pour alimenter des machines ou lignes de production.
    • Résidentielles : Pour garantir l'éclairage et le fonctionnement des appareils ménagers.
    • Hospitalières : Pour assurer une alimentation de secours immédiate et fiable.
    • Événementielles : Utilisés lors de concerts, festivals ou événements temporaires.

3.3 Classification des groupes électrogènes

Les groupes électrogènes peuvent être classés selon plusieurs critères en fonction de leur technologie, de leur mode d'utilisation, de leur alimentation en carburant ou de leur configuration physique. Cette classification permet de mieux adapter le choix du groupe aux besoins spécifiques de chaque application.

1. **Selon le type de carburant :**
   • **Diesel** : Le plus courant dans les applications industrielles et de secours, il offre une

meilleure durabilité et un coût d'exploitation réduit à long terme.

• **Essence** : Utilisé pour les petits groupes portables, souvent en usage domestique ou occasionnel.

• **Gaz (GPL, gaz naturel, biogaz)** : Moins polluant, plus silencieux, utilisé dans des installations fixes ou écologiques.

• **Hybrides** : Combinaison de moteurs thermiques avec des batteries ou des panneaux solaires.

2. **Selon la puissance électrique :**

   • **Petite puissance (<10 kVA)** : Pour un usage domestique ou de loisir.

   • **Moyenne puissance (10–250 kVA)** : Pour les entreprises, chantiers ou petites industries.

   • **Grande puissance (>250 kVA)** : Utilisés dans l'industrie lourde, les hôpitaux, les data centers, ou les installations critiques.

3. **Selon la mobilité :**

   • **Portables** : Compactes, faciles à déplacer, idéales pour le bricolage, les foires ou les petites installations.

   • **Stationnaires** : Fixés de manière permanente, utilisés pour des alimentations de secours automatiques ou continues.

4. **Selon le mode d'exploitation :**

   • **Secours (standby)** : Fonctionnent uniquement en cas de coupure de courant.

   • **Prime (intermittent)** : Utilisés en source principale, mais pour une durée limitée chaque jour.

   • **Continu (continuous)** : Conçus pour fonctionner en continu sur de longues périodes, notamment dans les sites hors réseau.

5. **Selon le type de courant produit :**

   • **Monophasé (230 V)** : Adapté aux équipements domestiques ou de petite entreprise.

   • **Triphasé (400 V)** : Utilisé pour les machines industrielles ou les équipements gourmands en énergie.

6. **Selon la technologie d'insonorisation :**

   • **Ouverts** : Non carénés, bruyants, généralement réservés à des zones industrielles.

   • **Insonorisés (coffrets ou conteneurs)** : Réduction du bruit grâce à un capotage, adaptés aux zones sensibles.

7. **Selon le type de refroidissement :**

8.

- **Refroidis par air** : Simples, économiques, pour les petits modèles.
- **Refroidis par eau** : Nécessaires pour les puissances élevées ou les conditions de fonctionnement prolongées.

3.4 Les pannes possibles

Tableau 1 : *Les pannes possibles*

SYMPTÔMES	CAUSES PROBABLES	SOLUTIONS / REMÈDES
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Surchauffe du moteur (refroidissement insuffisant, liquide de refroidissement bas, radiateur encrassé)	Vérifier/refaire le plein de liquide de refroidissement, nettoyer ou remplacer le radiateur
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Surcharge électrique (appareils trop puissants, court-circuit)	Débrancher les appareils, réarmer le disjoncteur après correction
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Problème de carburant (réservoir vide, filtre bouché, pompe défectueuse)	Remplir le réservoir, vérifier/remplacer filtre ou pompe à carburant
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Système de lubrification défaillant (niveau d'huile bas, pompe à huile)	Vérifier et compléter l'huile, vidanger, remplacer la pompe si besoin
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Défaillance d'un capteur de sécurité	Remplacer les capteurs, faire un essai à vide puis en charge
Le groupe électrogène démarre, mais il s'arrête brusquement	Courts-circuits / fusible de surtension défectueux	Identifier et réparer les courts-circuits, remplacer le fusible
Refus de démarrage	Manque de carburant ou carburant de mauvaise qualité	Vérifier/remplir avec carburant adapté
Refus de démarrage	Robinet de carburant fermé	Ouvrir le robinet
Refus de démarrage	Contact de démarrage sur OFF	Mettre sur ON

SYMPTÔMES	CAUSES PROBABLES	SOLUTIONS / REMÈDES
Refus de démarrage	Batterie défectueuse/déchargée	Recharger/remplacer batterie, nettoyer les bornes
Refus de démarrage	Insuffisance d'huile	Vérifier et ajouter de l'huile
Refus de démarrage	Système d'allumage défectueux	Contrôler/remplacer bougies et câbles
Refus de démarrage	Disjoncteur différentiel sur ON	Le remettre sur OFF après vérification
Refus de démarrage	Fusible de surtension avarié	Remplacer le fusible
Refus de démarrage	Encrassement du filtre à air	Nettoyer ou remplacer le filtre
Refus de démarrage	Problèmes de compression	Diagnostic/réglage par un professionnel
Refus de démarrage	Défauts électriques divers	Remplacer les composants défectueux
Pas de courant produit	Panne système d'excitation	Vérifier/remplacer la bobine d'excitation
Pas de courant produit	Problème de régulation de tension	Vérifier le régulateur et les fusibles
Pas de courant produit	Défaillance de l'alternateur	Vérifier/réparer l'alternateur
Pas de courant produit	Câblage ou branchements défectueux	Réparer ou remplacer les câbles
Pas de courant produit	Sécurité empêchant la mise à la terre	Vérifier/remplacer le générateur
Pas de courant produit	Diodes passantes dans les deux sens	Remplacer les diodes

3.5 Conclusion

L’analyse des différents symptômes, causes et remèdes des pannes du groupe électrogène souligne l’importance d’une maintenance rigoureuse et systématique. Un groupe électrogène est un système complexe dont la fiabilité dépend de nombreux facteurs techniques, tels que le carburant, la lubrification, le refroidissement, et l’ensemble du circuit électrique.

Pour améliorer la disponibilité et anticiper les défaillances, il est pertinent d’adopter une démarche plus structurée : la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF**)**. Cette approche repose sur l’exploitation de l’historique des pannes afin de déterminer les éléments les plus vulnérables, les modes de défaillance les plus fréquents, et les actions correctives les plus adaptées.

Le chapitre suivant est consacré à cette étude de la fiabilité du groupe électrogène, avec pour objectif de mettre en place un plan de maintenance optimisé, préventif et prédictif, garantissant à la fois sécurité, performance et réduction des coûts d’arrêt.

Chapitre IV

Analyse de la fiabilité du groupe électrogène

IV.1 Introduction

L’analyse de la fiabilité d’un groupe électrogène est essentielle pour garantir son fonctionnement optimal, sa disponibilité continue, et sa longévité. Ce chapitre explore les différentes approches et outils utilisés pour évaluer la fiabilité d’un groupe électrogène.

L’objectif principal de cette analyse est de déterminer la capacité du groupe électrogène à fonctionner de manière fiable et continue dans des conditions spécifiques, sur une période donnée. Elle permet d’identifier les facteurs clés influençant sa fiabilité, notamment la qualité des composants, les conditions d’exploitation, la fréquence des maintenances, et les modes de fonctionnement.

En comprenant ces éléments, les ingénieurs peuvent mettre en place des stratégies efficaces afin d’améliorer la fiabilité du groupe électrogène, de minimiser les risques de défaillance, et de prolonger sa durée de vie opérationnelle.

Dans le cadre de cette étude, l’outil statistique **Minitab** sera utilisé pour traiter les données relatives aux temps de défaillance, et pour effectuer les différentes analyses nécessaires à l’évaluation de la fiabilité du système.

IV.2 Etude de la fiabilité de groupe électrogène

Le tableau suivant représente l'historique des pannes groupe électrogène sur une période de 10 ans :

Tableau 1 : *Historique des Pannes et Interventions – Groupe Electrogène*

N°	Date de démarrage	Date d'arrêt	TBF (h)	TTR (h)	Cause de la panne	Action corrective
1	2015-01-01 10:00	2015-01-01 13:07	260	3.13	Manque de carburant	Remplissage du réservoir avec du carburant adapté
2	2016-01-01 17:00	2016-01-01 19:09	288	2.16	Robinet de carburant fermé	Ouverture du robinet
3	2016-12-31 09:00	2016-12-31 11:43	287	2.72	Contact de démarrage sur OFF	Mise sur ON
4	2017-12-31 14:00	2017-12-31 15:43	208	1.73	Batterie défectueuse ou déchargée	Recharge / remplacement batterie, nettoyage bornes
5	2018-12-31 14:00	2018-12-31 15:17	278	1.29	Insuffisance d'huile	Vérification et ajout d'huile
6	2019-12-31 20:00	2019-12-31 21:58	298	1.98	Filtre à air encrassé	Nettoyage ou remplacement du filtre
7	2020-12-30 11:00	2020-12-30 12:14	195	1.24	Problèmes de compression	Diagnostic et réglage par un professionnel
8	2021-12-30 20:00	2021-12-30 21:41	297	1.69	Défauts électriques divers	Remplacement des éléments défectueux
9	2022-12-30 16:00	2022-12-30 18:00	229	2.01	Système d'allumage défectueux	Remplacement des bougies/câbles
10	2023-12-30 14:00	2023-12-30 15:31	256	1.52	Disjoncteur différentiel sur ON	Remise sur OFF, vérification du défaut
11	2024-12-29 15:00	2024-12-29 16:43	163	1.72	Fusible de surtension avarié	Remplacement du fusible

IV.2.1 Calcul temps de bon fonctionnement :

Après l'exploitation du dossier historique des pannes du groupe électrogène, on peut calculer la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) de manière suivante :

$$MTBF = \frac{\Sigma \text{ les temps de bon fonctionnement}}{\Sigma \text{ les pannes AP}}$$

$$MTBF = \frac{260+288+287+208+278+298+195+297+229+256+163}{11}$$

La moyenne des temps de bon fonctionnement :

$\boldsymbol{MTBF}$ = 250,81 $heurs/panne$

IV.2.2 Classement de TBF calcul F (ti) :

Le tableau suivant comporte les TBF classés par ordre croissant, et les *F(i)* calculés par la méthode des ranges médians $\boldsymbol{F} = \frac{\sum ni - 0.3}{N + 0.4}$ (dans notre cas N = 11 < 20) pour tracer la courbe de WeiBull :

Tableau 3 : *Classement de TBF calcul F (ti)*

N°	***TBF (h)***	***n***	$\boldsymbol{\Sigma ni}$	***F (ti)***	***F (ti) %***
1	163	1	1	0 ,061403	6,1403
2	195	1	2	0,149122	14,9122
3	208	1	3	0,236842	23,6842
4	229	1	4	0,324561	32,4561
5	256	1	5	0,41228	41,228
6	260	1	6	0,5	50
7	278	1	7	0,587719	58,7719
8	287	1	8	0,675438	67,5438
9	288	1	9	0,763157	76,3157
10	297	1	10	0 ,850877	85,0877
11	298	1	11	0,938596	93,8596

IV.3 Estimation des paramètres de la loi Weibull *(η, β, γ)* :

Pour faciliter le calcul des paramètres de la distribution de Weibull, nous avons utilisé le logiciel Minitab.

IV.3.1 Présentation générale de MINITAB

MINITAB est un logiciel de statistiques et d'analyse de données largement utilisé dans les domaines de la recherche, de l'ingénierie, de la qualité, de la gestion de projet et dans de nombreux autres secteurs. Il est développé par ***MINITAB Inc***. pour le système d'exploitation Windows.

- Produire des statistiques et des graphiques.
- Explorer les données visuellement.
- Effectuer des analyses statistiques et des procédures.
- Évaluer la qualité des données.
- Calculer la fiabilité selon différentes méthodes et la visualiser graphiquement.
- Examiner les relations entre deux variables.
- Effectuer des analyses de données approfondies.

IV.3.2 L'environnement de MINITAB

a) Feuille de travail :

MINITAB s'ouvre avec deux fenêtres principales :

La fenêtre Session, où les résultats de vos analyses sont affichés sous forme de texte. Cette fenêtre vous permet également de saisir des commandes au lieu d'utiliser les menus de MINITAB.

1. La fenêtre Données contient une feuille de travail semblable à une feuille de calcul. Vous pouvez ouvrir plusieurs feuilles de travail, chacune dans une fenêtre donnée différente.

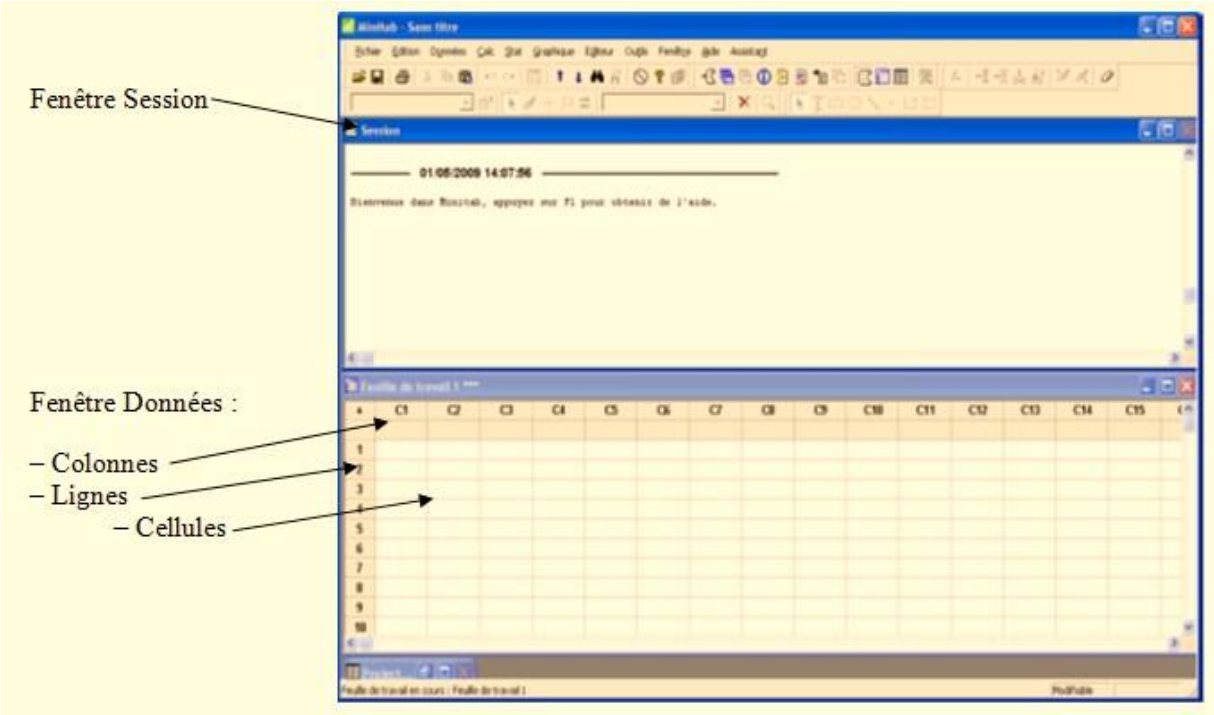
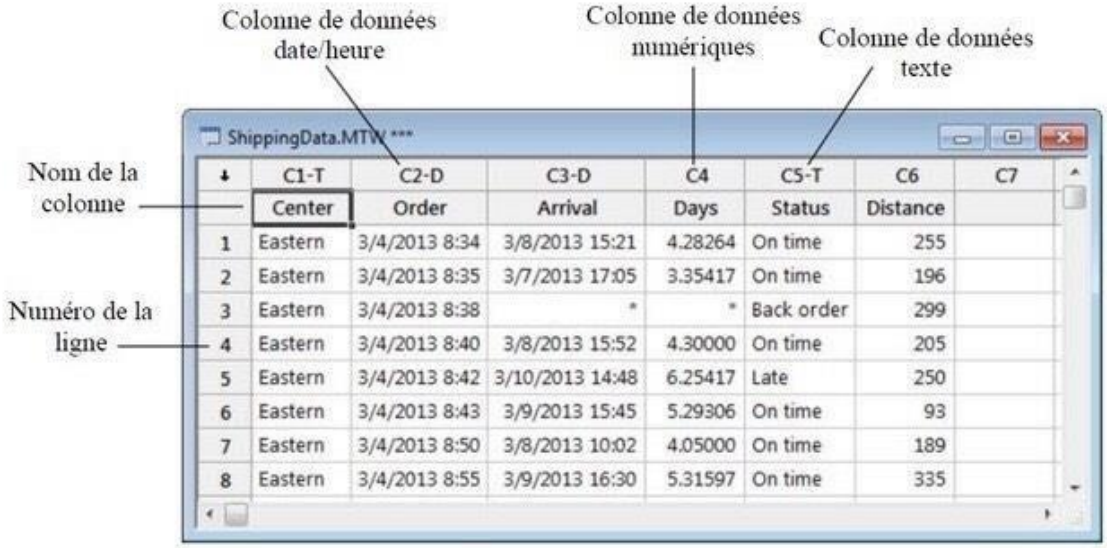


Figure 4.1. *Ouverture d'une* ***feuille*** *de travail*

b) Examen de la feuille de travail :

Les données sont organisées en colonnes, également appelées variables, avec un numéro et un nom de colonne affichés en haut de chacune. Chaque ligne de la feuille de travail correspond à un enregistrement. MINITAB accepte trois types de données : numériques, textuelles et de date/heure, qui peuvent être tous présents dans cette feuille de travail.



	C1-T	C2-D	C3-D	C4	C5-T	C6	C7
	Center	Order	Arrival	Days	Status	Distance	
1	Eastern	3/4/2013 8:34	3/8/2013 15:21	4.28264	On time	255	
2	Eastern	3/4/2013 8:35	3/7/2013 17:05	3.35417	On time	196	
3	Eastern	3/4/2013 8:38	*	*	Back order	299	
4	Eastern	3/4/2013 8:40	3/8/2013 15:52	4.30000	On time	205	
5	Eastern	3/4/2013 8:42	3/10/2013 14:48	6.25417	Late	250	
6	Eastern	3/4/2013 8:43	3/9/2013 15:45	5.29306	On time	93	
7	Eastern	3/4/2013 8:50	3/8/2013 10:02	4.05000	On time	189	
8	Eastern	3/4/2013 8:55	3/9/2013 16:30	5.31597	On time	335	

Figure 4.2. *Examen d'une feuille de travail*

IV.3.3 Représentation graphique des données :

Avant de réaliser une analyse statistique, l'utilisation de graphiques peut être utile pour explorer les données et examiner les relations entre les variables. De plus, les graphiques peuvent être employés pour synthétiser les données et simplifier l'interprétation des résultats statistiques. Pour accéder aux graphiques dans MINITAB, vous pouvez utiliser les menus "Graphique" et "Statistique". De nombreuses commandes statistiques incluent également des graphiques intégrés qui aident à interpréter les résultats et à évaluer la validité des hypothèses statistiques. Les fonctionnalités des graphiques de MINITAB incluent des galeries picturales pour choisir le type de graphique, une grande flexibilité pour personnaliser les graphiques, la possibilité de modifier les éléments graphiques et une option de mise à jour automatique des graphiques.

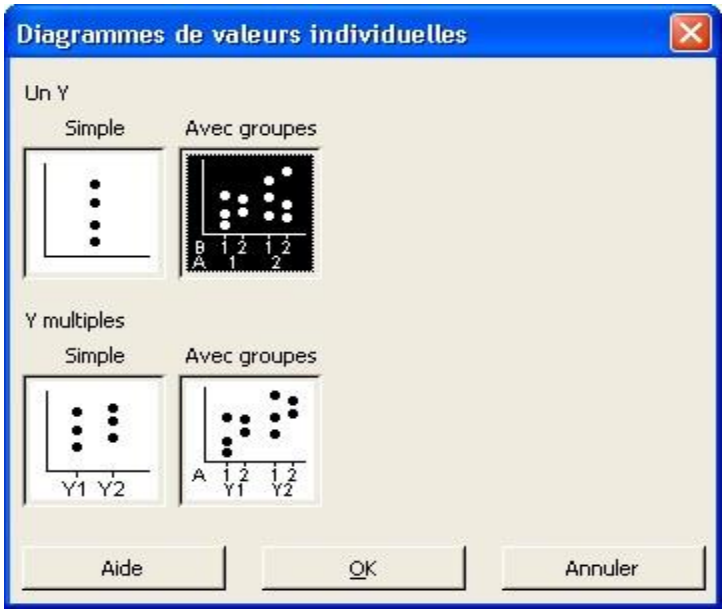


Figure 4.3. *Représentation graphiques des données (diagrammes de valeurs individuelles)*

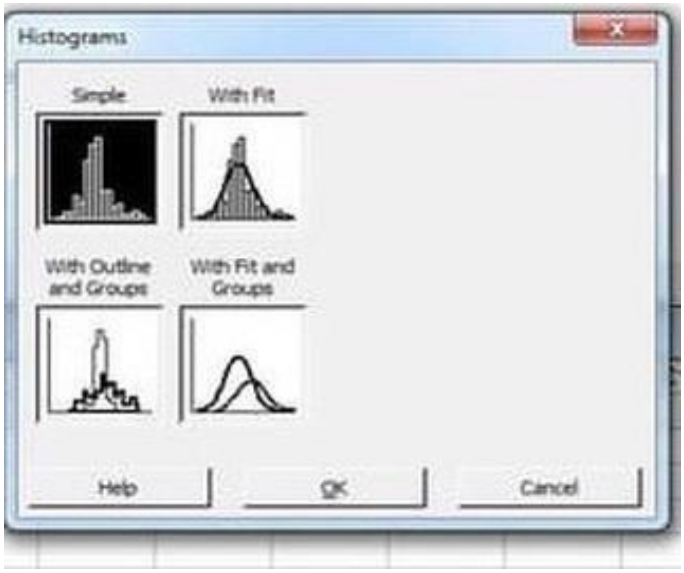


Figure 4.4. *Représentation graphiques des données (Histogramm***es)**



Figure 4.5. *Représentation graphiques des données (paramètres d'ajustement des Histogrammes)*

IV.3.4 Etude de la loi de WeiBull :

Le déroulement de l'étude passe par les étapes suivantes :

- **Etape 1 :**

-Remplissage des données sur la feuille de travail.

-Sélectionnez Start >Reliability/Survival >Disribution Analysis (Right Censoring) >Parmetric Distribution Analysis.

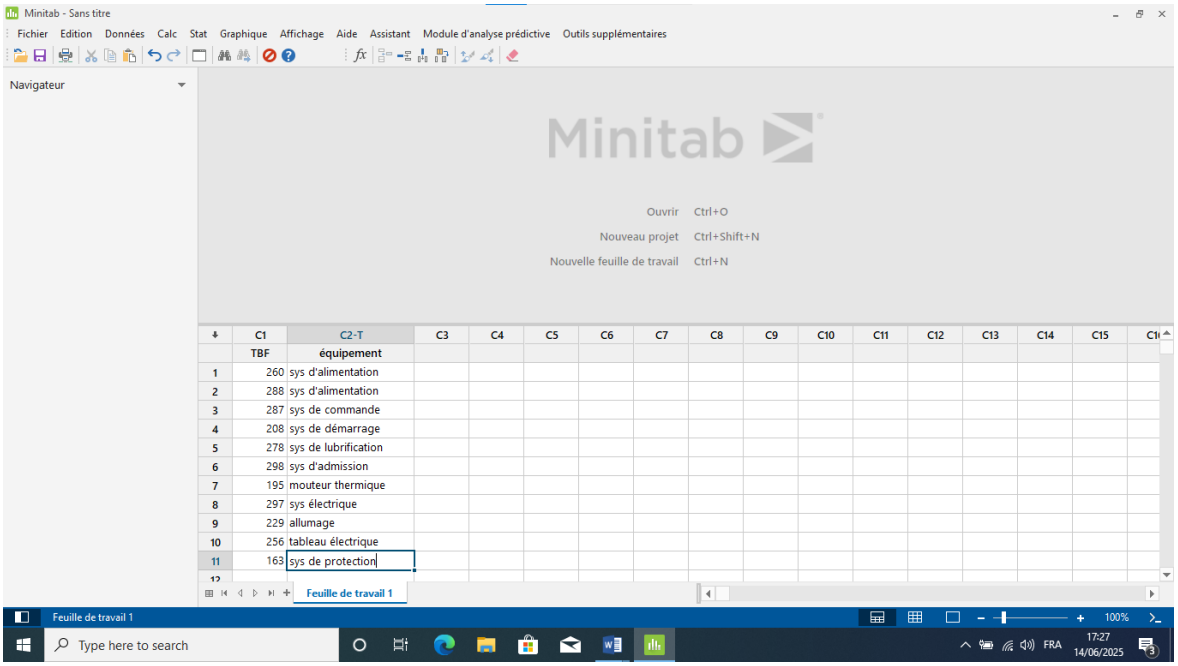


Figure 4.6. *Analyse de répartition*

- **Etape 2 :**

1- Dans la section "Variables", saisissez le nom de la première colonne (TBF) ou C1.

2-choisi la loi de WeiBull

3-Cliquez sur « F Mode ».

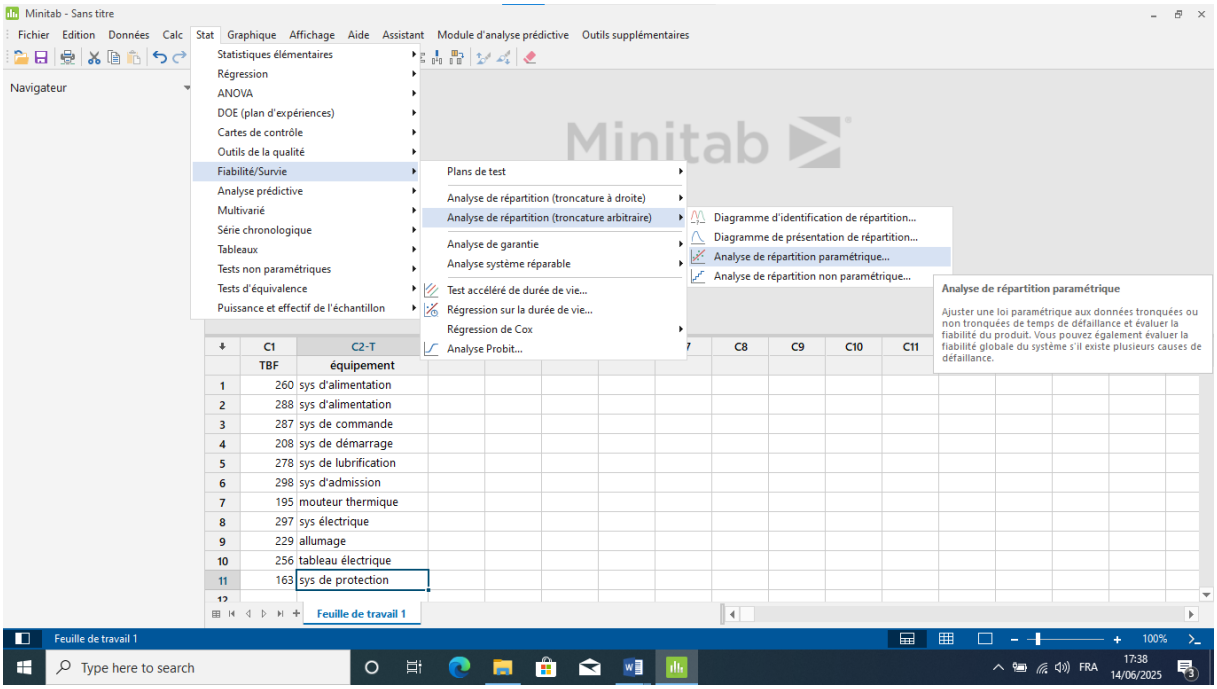


Figure 4.7. *Choix de la première variable C1*

- **Etape 3 :**

1. Dans la section "Use failure mode columns", inscrivez le nom de la deuxième colonne (Equipement) ou C2.

2. Sous "modifier la distribution pour les niveaux", saisissez "Equipement".

3. Choisissez la loi à utiliser pour le calcul de WeiBull, par exemple.

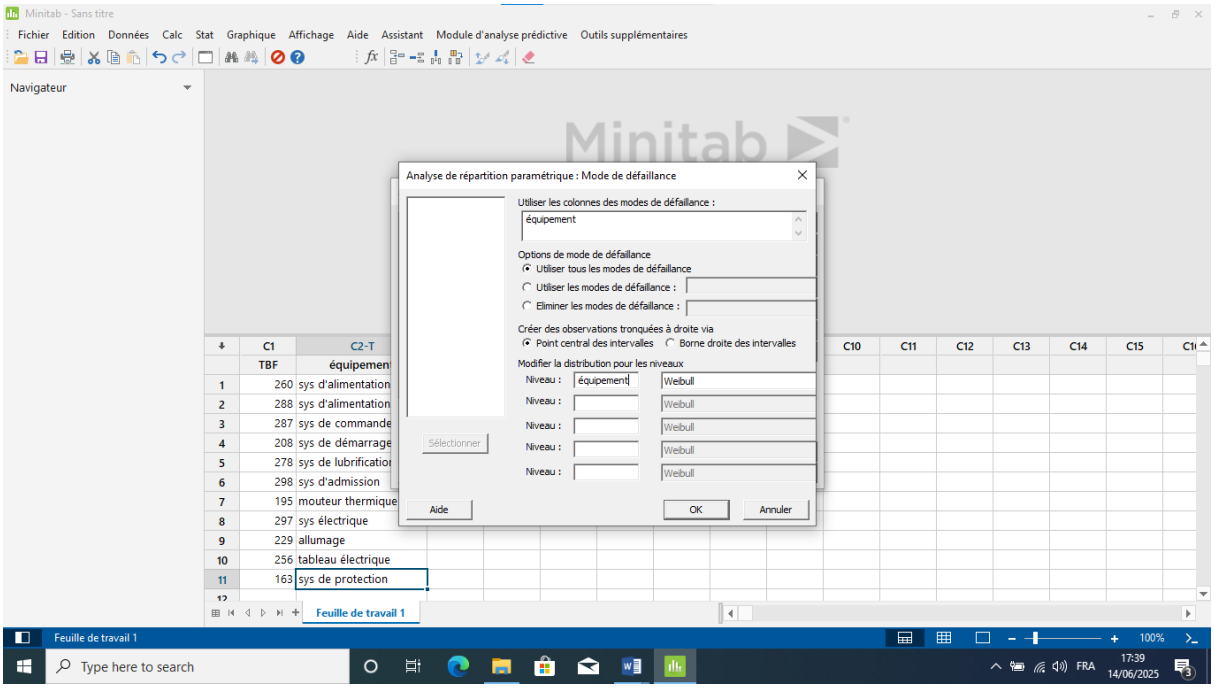


Figure 4.8. *Choix de la deuxième variable C2*

- **Etape 4 :**

Dans la section "Estimate probabilities for these times (values)", saisissez le nom de la première colonne ou C1 pour lesquels vous souhaitez calculer la fiabilité. Ensuite, cliquez sur "OK"

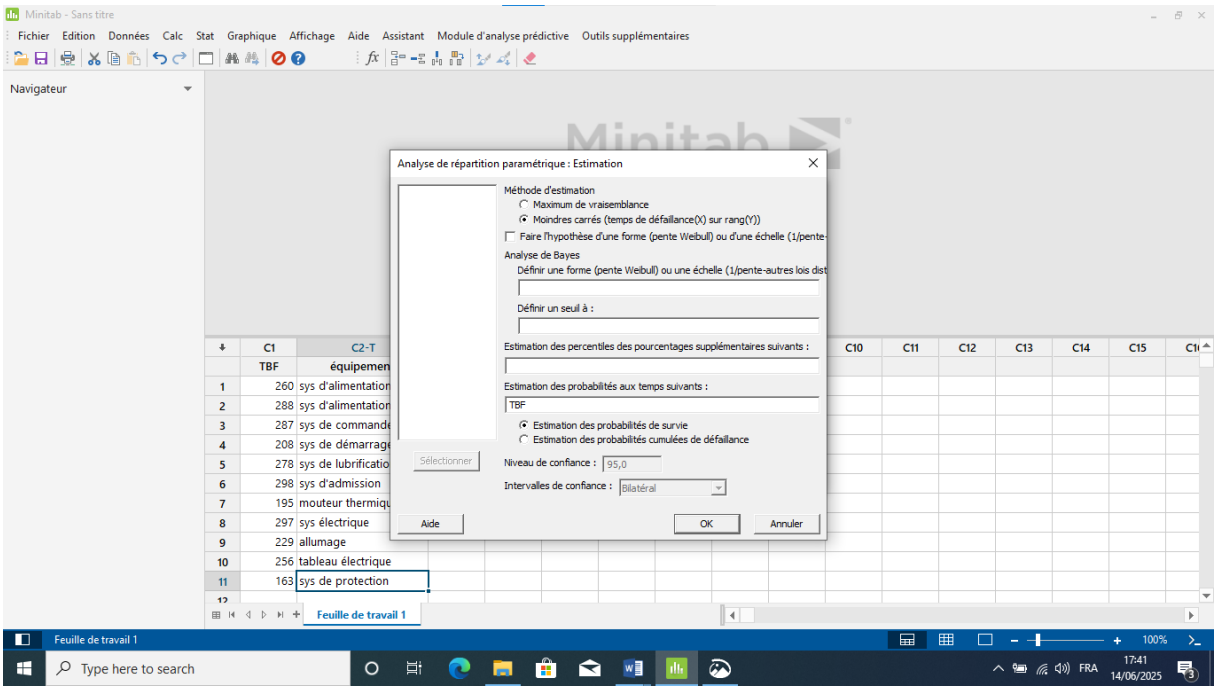


Figure 4.9. *Estimation des temps*

- **Etape 5 :**

-Cliquez sur « Results ».

-Cochez la case «Display analyses for individual failure mode according to display of results ». Cliquez sur « OK

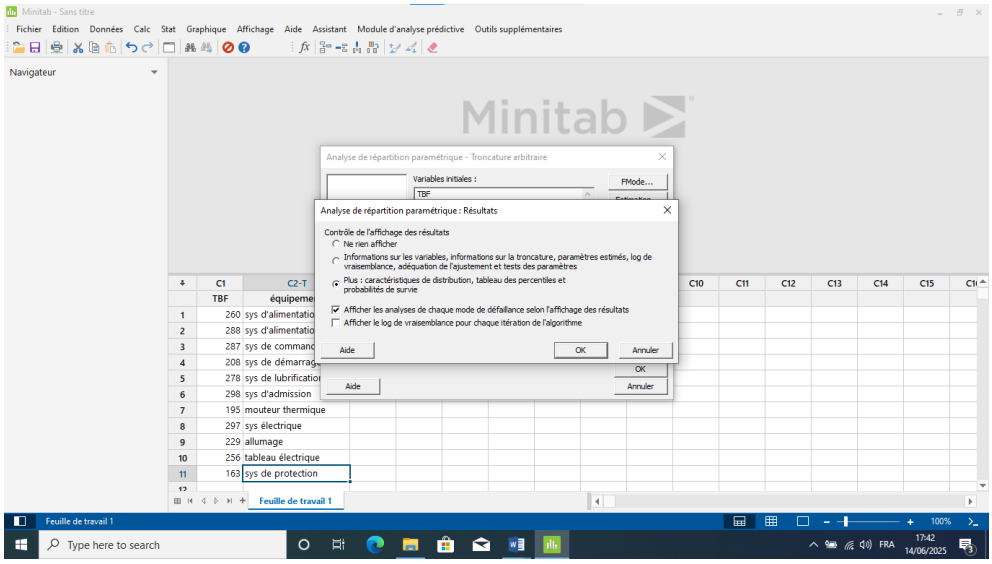


Figure 4.10. *Choix des résultats*

- **Etape 6 :**

1. Accédez à "Graphs".
2. Sélectionnez les graphiques que vous souhaitez générer en cochant les cases correspondantes.

3. Pour chaque boîte de dialogue, cliquez sur "OK".

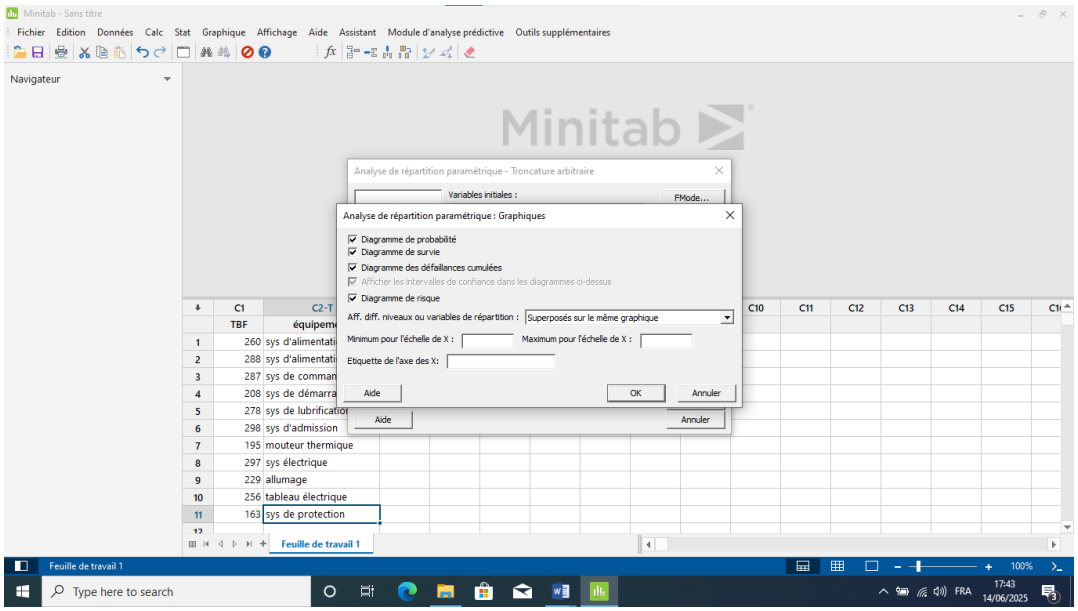


Figure 4.11. *Choix des graphes*

En fin de compte, les résultats comprennent :

- Les valeurs de fiabilité R(t) pour les temps estimés, la probabilité de défaillance cumulée F(t), le taux de défaillance (t), et la densité de probabilité f(t).
- Les graphiques représentant ces fonctions.
- Les moyennes de temps MTTF (Mean Time To Failure) et MTBF (Mean Time Between Failures).

On déduit les paramètres : β ; η et γ par le logiciel MINITAB

$\boldsymbol{\beta} = 4.94$

$\boldsymbol{\eta} = 262.68$

$\boldsymbol{\gamma} = 0$

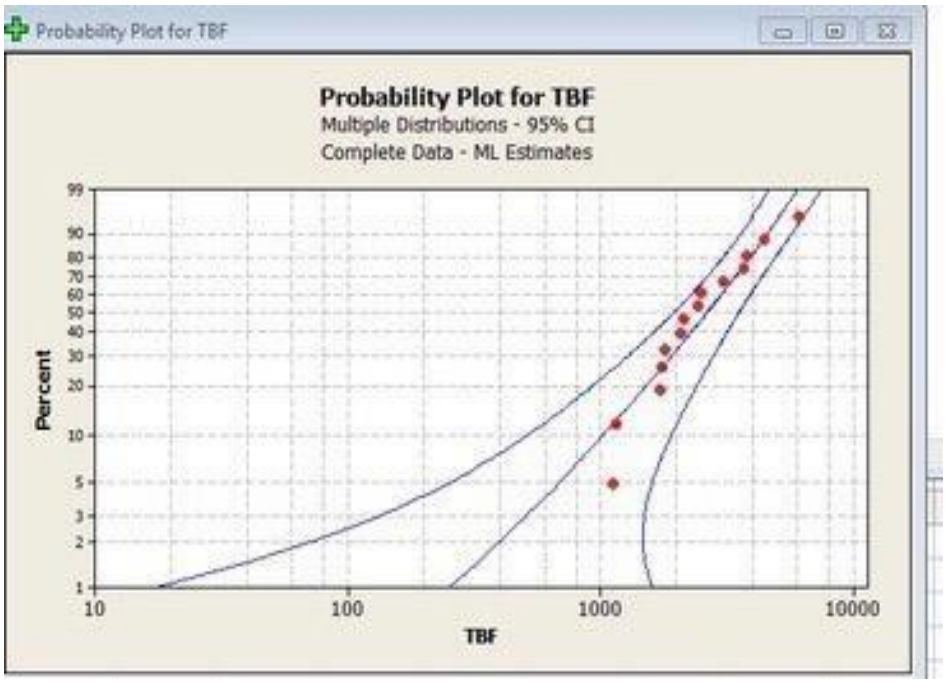


Figure 4.13. *Papier de WeiBull en logiciel Minitab*

IV.3.5 Test de Kolmogorov-Smirnov:

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

Dni =| F (ti) réelle –F (ti) théorique|

IV.4 Calcul de la fiabilité *R (ti),* la fonction de répartition *F (ti),* le taux de défaillance *λ (ti),* la densité de probabilité *f (ti*)

Tableau 4: *Les différentes valeurs utilisées pour la distribution de WeiBull*

N°	*TBF*	*F (ti) théorique*	*R (ti)*	*λ(ti)×10-3*	*F (ti) réelle*	*f(t) × 10-3*	*D ni*
1	163	0 ,0614	0.9096	2.869	0.0904	2.610	0.029
2	195	0,1491	0.7949	5.814	0.2051	4.621	0.056
3	208	0,2368	0.7292	7.497	0.2708	5.467	0.034
4	229	0,3245	0.6018	10.95	0.3982	6.591	0.073
5	256	0,4122	0.4145	16.99	0.5855	7.044	0.173
6	260	0,5	0.3865	18.06	0.6135	6.968	0.114
7	278	0,5877	0.2662	23.51	0.7338	6.261	0.146
8	287	0,6754	0.2125	26.65	0.7875	5.665	0.112
9	288	0,7631	0.2068	27.02	0.7932	5.591	0.03
10	297	0 ,8508	0.1597	30.50	0.8403	4.873	0.011
11	298	0,9385	0.1549	30.91	0.8451	4.789	0.093

D’après le tableau :
La fréquence maximale DN_{max} = 0,173 et selon la table K-S (KOLMOGOROVSMIRNOV)
Avec :
N = 11 et **α** = 0 ,05
D'après le tableau de K-S :
DN.α = D11**.** 0,05 = 0, 391
0,173 < 0, 391

Donc l’hypothèse du modèle de WeiBull est acceptable.

IV.4.1 Calcul de la fiabilité du groupe électrogène

Le MTBF :

D’après le tableau de distribution de WeiBull on trouve : A = 0.9160 ; B = 0.218

MTBF = $A.\eta+^{\gamma}$

MTBF = 0.916 *262.68+0

MTBF = 240.61 heures/panne.

IV.4.2 Calcul de R(t), F(t), λ(t) :

IV.4.2.1 La fiabilité *R(t)* :

R(t) = exp [- *(t / η)^β*] = e^(-(240.61 / 262.68)^4.94)

R(t)=0,522⇒ R(t) = 52,2%

Cela indique une probabilité de fiabilité de 52,2 % à l’instant t.

Tableau 5 : *Calcul de la fiabilité*

TBF	163	195	208	229	256	260	278	287	288	297	298
R(ti)	0.9096	0.7949	0.7292	0.6018	0.4145	0.3865	0.2662	0.2125	0.2068	0.1597	0.1549

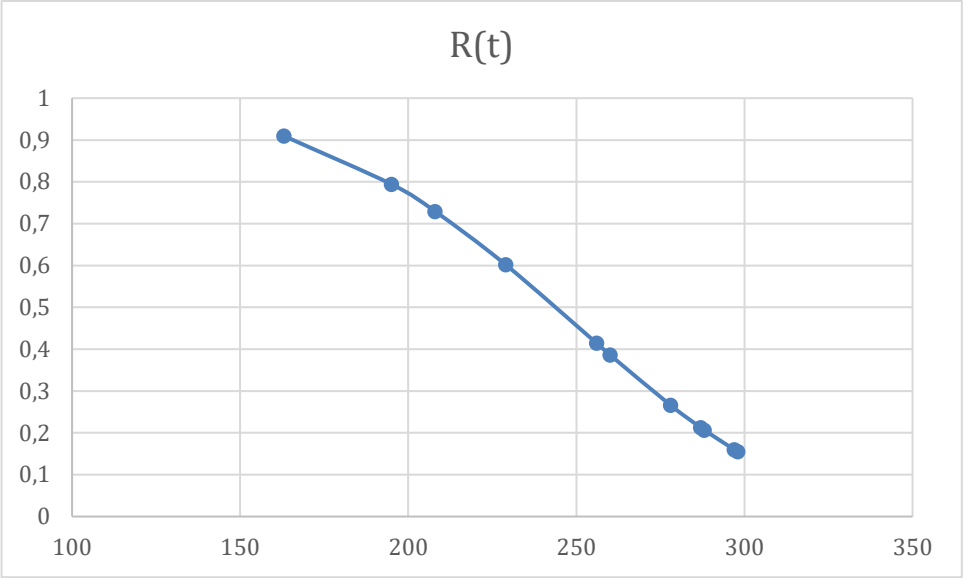


Figure 4.14. *La Courbe De la Fonction Fiabilité*

Commentaire

D'après l'évolution de cette courbe, il est observé que la fiabilité (probabilité de bon fonctionnement) diminue avec le temps de fonctionnement cumulé, ce qui indique que le groupe électrogène subit plusieurs arrêts entraînant l'arrêt de l'unité. Cette diminution de fiabilité est principalement causée par les vibrations de l'équipement, la dégradation du matériel ou une maintenance insuffisante.

IV.4.2.2 La fonction de répartition :
F (*t*) = 0.478= 47.8 %

Tableau 6 : *Fonction de répartition F(t)*

TBF	163	195	208	229	256	260	278	287	288	297	298
F(t)	0.0904	0.2051	0.2708	0.3982	0.5855	0.6135	0.7338	0.7875	0.7932	0.8403	0.8451

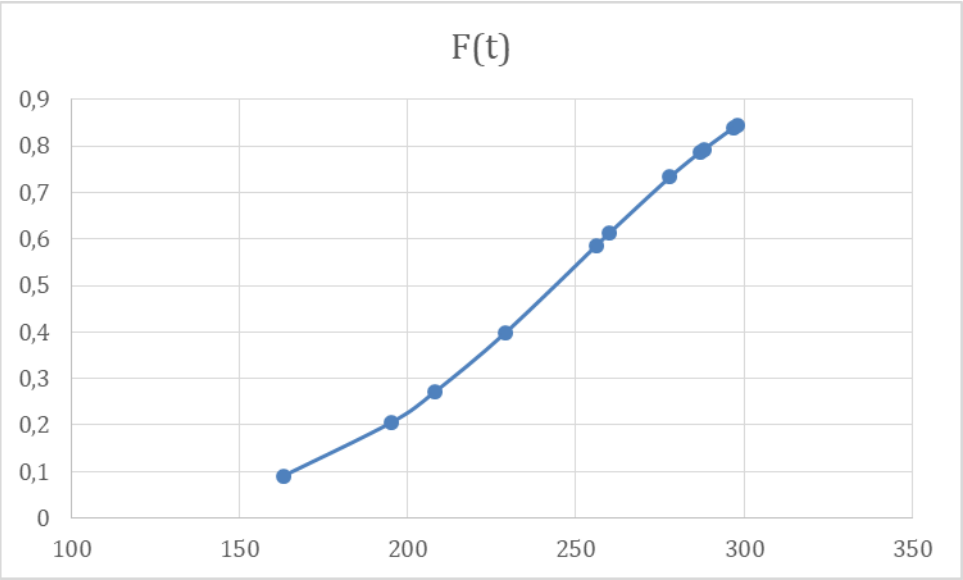


Figure 4.15. *La courbe de la Fonction de répartition* Commentaire

Selon la courbe, on constate que la fréquence des défaillances augmente avec le temps, ce qui signifie qu'il est de plus en plus probable de rencontrer une ou plusieurs pannes à mesure que le temps d'utilisation s'accroît. Par conséquent, il est essentiel de mettre en place une méthode appropriée pour prévenir les défaillances prévues et ainsi améliorer la fiabilité.

IV.4.2.3 Taux de défaillance

$\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{t}) = (\beta / \eta) \times (t / \eta)^{(\beta - 1)} = 13 \times \mathbf{10}^{-3}$

Tableau 7 : *Calcul du taux de défaillance*

TBF	*163*	*195*	*208*	*229*	*256*	*260*	*278*	*287*	*288*	*297*	*298*
λ(ti)× 10-3	2.869	5.814	7.497	10.95	16.99	18.06	23.51	26.65	27.02	30.50	30.91

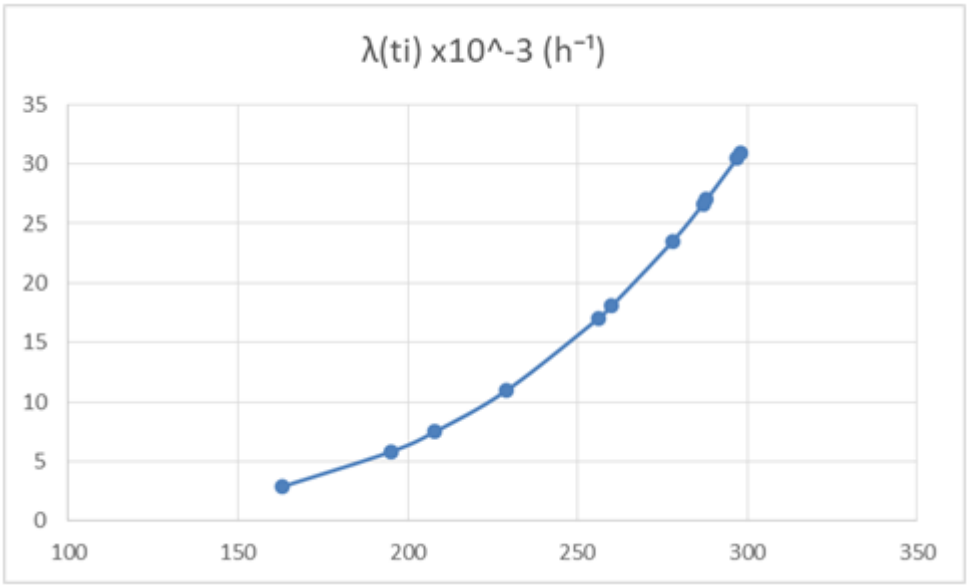


Figure 4.16. *La courbe du taux de défaillance*

Commentaire

En analysant la courbe, on observe que le taux de défaillance augmente avec le temps. Cette tendance croissante indique que l'équipement (qui est dans notre cas le groupe électrogène) entre dans une phase de vieillissement, durant laquelle la probabilité de défaillance devient de plus en plus élevée. Ce comportement est typique de la dernière phase de la courbe en baignoire.

IV.4.2.4 Densité de probabilité de défaillance

$$f(t) = (\beta / \eta) \times (t / \eta)^{(\beta - 1)} \times exp(-(t / \eta)^{\beta})$$

$$f(t) = 6.96 \times 10^{-3}$$

Tableau 8 : *Calcul de la fonction de la densité de probabilité*

TBF	163	195	208	229	256	260	278	287	288	297	298
f(t) × 10^{-3}	2.610	4.621	5.467	6.591	7.044	6.968	6.261	5.665	5.591	4.873	4.789

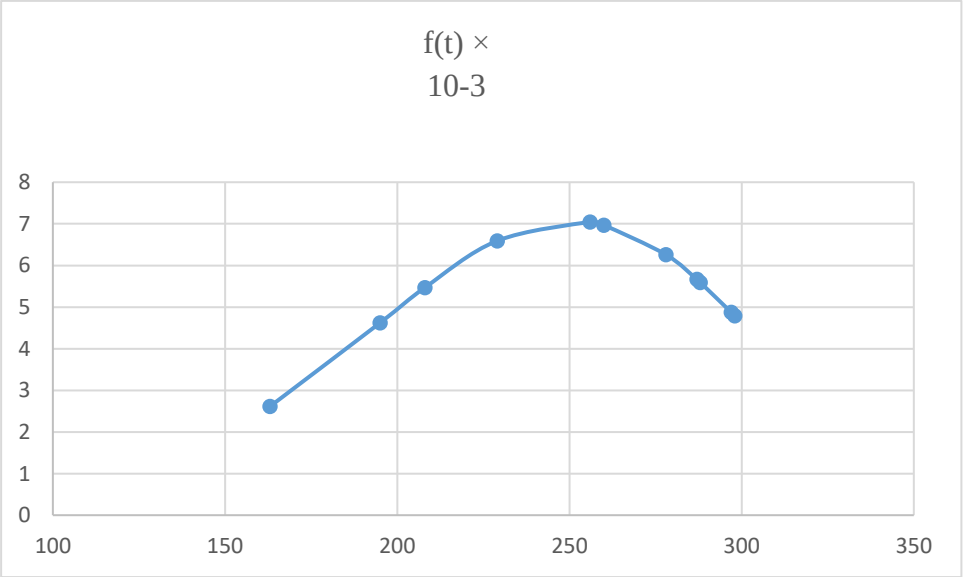


Figure 4.17. *La Courbe de la densité de probabilité de défaillance*

Commentaire

La courbe représente la densité de probabilité de défaillance F(t) en fonction du temps. Elle montre que la probabilité instantanée de défaillance augmente dans un premier temps, atteint un maximum autour du temps moyen entre pannes (MTBF)**,** puis diminue. Cette évolution reflète un comportement typique d'usure progressive : les défaillances sont rares au début, deviennent plus fréquentes autour du MTBF, puis diminuent, probablement en raison du remplacement ou de la réparation des composants défaillants. Une telle analyse permet de mieux planifier les interventions de maintenance préventive, en ciblant les périodes à risque élevé.

- Le sommet de la courbe (le pic de *F(t)*) correspond au moment où la probabilité instantanée de défaillance est maximale**.**

- Cette zone (autour de ce pic) est ce qu'on appelle la "période à risque élevé"**,** car les défaillances sont plus fréquentes**.**

IV.4.3 Etude de maintenabilité

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Moyenne des Temps Technique de Réparation).

La fonction de maintenabilité M(t) :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu(t)}$$

$$MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N}$$

TTR : Moyenne des temps de réparation

N: le nombre de réparation

MTTR=$\frac{21.19}{11}$ = 1.92 heure

$\mu = \frac{1}{1.92}$ = 0.52 intervention/heure

Commentaire :

La fonction de maintenabilité *M(t)* évalue la capacité d'un système à être réparé rapidement après une panne.

À partir des données recueillies :

- Le temps moyen de réparation (*MTTR*) est de 1,92 heure, calculé à partir d'un total cumulé de 21,19 heures pour 11 réparations.
- Le taux de réparation μ est donc de 0,52 intervention/heure, ce qui indique qu'en moyenne, une panne est corrigée en moins de 2 heures.

Ces valeurs traduisent une bonne maintenabilité, car les réparations sont effectuées rapidement, ce qui contribue à réduire les durées d'indisponibilité de l'équipement.

Tableau 9 : *Etude de maintenabilité*

n	T(h)	M(t)	%
1	0.5	0.228	22.8
2	1	0.4054	40.54
3	1.5	0.5414	54.14
4	2	0.6465	64.65
5	2.5	0.7274	72.74
6	3	0.7898	78.98
7	3.5	0.8379	83.79
8	4	0.8750	87.50
9	4.5	0.9036	90.36
10	5	0.9257	92.57
11	5.5	0.9427	94.27

Courbe de la maintenabilité :

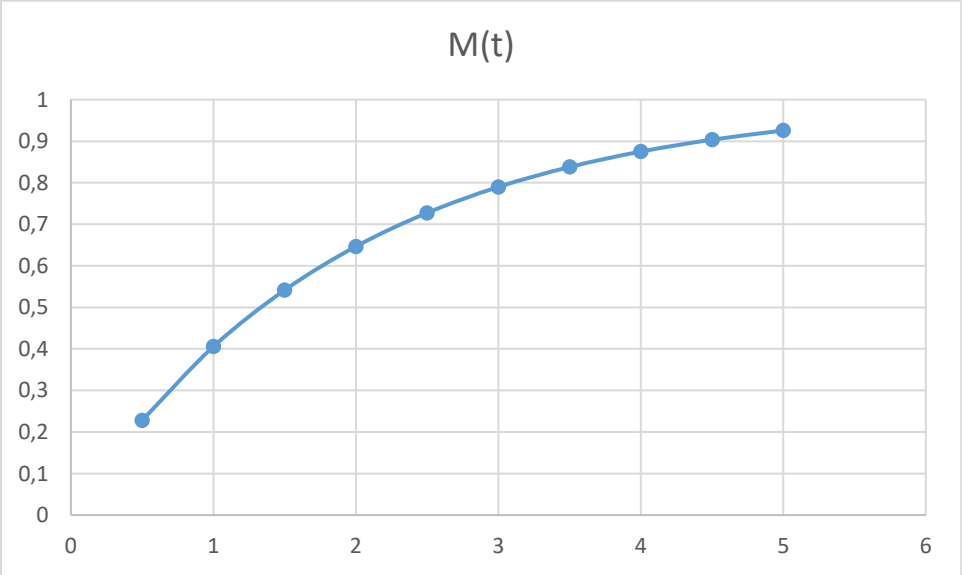


Figure 4.18. *La courbe de la maintenabilité*

Commentaire :

On observe que la fonction est strictement croissante**,** ce qui signifie que plus le temps passe, plus la probabilité de réparation augmente.

À t=5 heures, la maintenabilité atteint environ 94.27 %**,** ce qui indique qu'il y a 94.27 % de chances que le système soit réparé avant 5 heures**.**

Cette performance traduit une bonne capacité du système à retrouver un état fonctionnel dans des délais raisonnables, ce qui est favorable pour la continuité de service.

IV.4.4 Etude de disponibilité instantanée

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression :

$$\mathbf{D(t)} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda} e^{-(\lambda+\mu)t}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{250{,}81} = 3.99\, x\, 10^{-3}$$

Cela signifie qu'en moyenne, il y a environ 3,99 pannes pour 1000 heures de fonctionnement**,** ce qui permet d'évaluer la fiabilité globale du système étudié.

Tableau 10 : *Disponibilité instantanée*

T(h)	D(t)	%
0.5	0.99992	99.992
1	0.99984	99.984
1.5	0.99976	99.976
2	0.99968	99.968
2.5	0.99961	99.961
3	0.99953	99.953
3.5	0.99946	99.946
4	0.99939	99.939
4.5	0.99931	99.931
5	0.99924	99.924
5.5	0.99917	99.917

Courbe de la disponibilité :

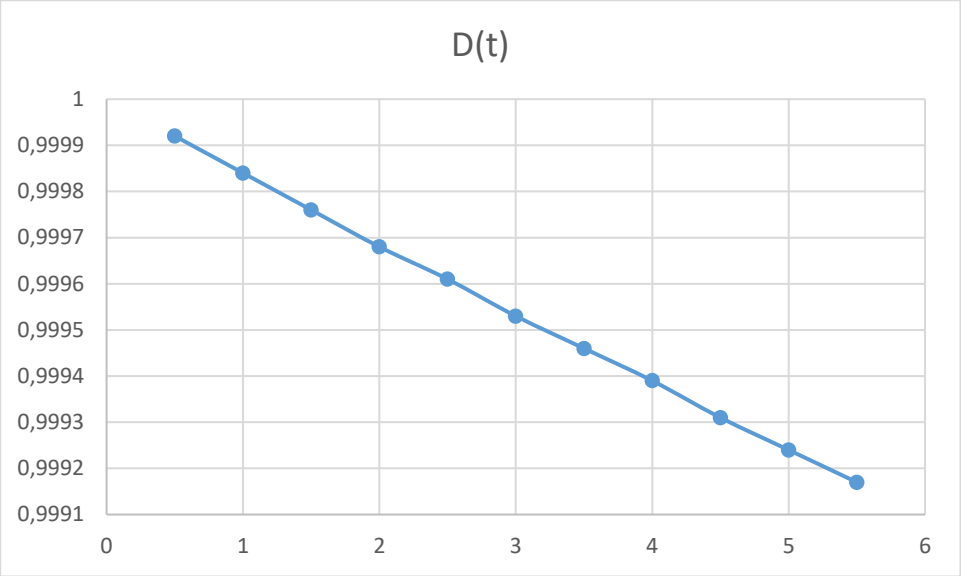


Figure 4.19. *Disponibilité instantanée*

Commentaire :

La courbe *D(t)* représente l'évolution de la disponibilité instantanée du groupe électrogène en fonction du temps. On observe une légère décroissance continue, ce qui indique une détérioration progressive de la capacité du système à être opérationnel à un instant donné, probablement sous l'effet cumulé des défaillances et des temps de réparation.

Pour améliorer la disponibilité, deux leviers principaux peuvent être actionnés :

- Augmenter la fiabilité du compresseur, c'est-à-dire réduire la fréquence des pannes.
- Améliorer la maintenabilité, en réduisant le temps moyen de réparation *(MTTR).*

Ces deux actions permettent de maintenir le système fonctionnel plus longtemps, et donc d'assurer une meilleure continuité de service.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploité l'historique des pannes du groupe électrogène installé au niveau de l'unité de HENKEL à Chelghoum Laïd, en classant les défaillances selon leurs causes.

À partir de ces données, nous avons déterminé et analysé les différentes fonctions caractéristiques de la fiabilité :

- La fonction de fiabilité *R(t)* a permis d'évaluer la probabilité de bon fonctionnement au cours du temps. Sa valeur de 52,2 % à l'instant étudié traduit une fiabilité moyenne du système.

- La fonction de défaillance *F(t)* et sa densité *f(t)* ont permis d'identifier les périodes à plus forte probabilité de défaillance, notamment autour du temps moyen entre pannes *(MTBF).*
- Le taux de défaillance *λ(t)* a montré une tendance croissante, révélant une phase de vieillissement du système.
- La fonction de maintenabilité *M(t)* a quant à elle permis d'évaluer la rapidité avec laquelle le système peut être remis en état après une panne, avec un temps moyen de réparation *(MTTR)* satisfaisant.

La loi de Weibull a été ajustée aux données et validée par le test de Kolmogorov–Smirnov, confirmant sa pertinence dans la modélisation du comportement de défaillance du système.

En conclusion, pour assurer une meilleure disponibilité du groupe électrogène, il est impératif de mettre en œuvre une politique de maintenance efficace reposant sur deux axes principaux :

- La réduction du nombre d'arrêts, par l'amélioration de la fiabilité ;
- La diminution du temps de réparation, en renforçant la maintenabilité.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a permis d'approfondir la stratégie de maintenance appliquée aux groupes électrogènes, en mettant en évidence plusieurs aspects essentiels.
Il s'est tout d'abord focalisé sur l'optimisation de la maintenance préventive, en insistant sur l'importance d'anticiper les défaillances afin d'assurer le bon fonctionnement des équipements. Il a ensuite souligné la nécessité d'identifier les équipements critiques, dont la défaillance pourrait avoir un impact significatif sur la production ou la sécurité, afin de leur accorder une attention particulière.

Pour atteindre ces objectifs, la collecte de données issues de l'historique des indicateurs de dégradation s'est révélée primordiale. Elle a permis une meilleure compréhension du comportement des équipements et une anticipation plus efficace des défaillances potentielles. L'utilisation d'outils comme Minitab s'est avérée incontournable pour l'analyse de la fiabilité. Ce logiciel propose diverses méthodes, dont la loi de Weibull, utilisée dans cette étude pour évaluer la fiabilité des équipements à différents stades. Cette approche souple s'adapte à la diversité des résultats expérimentaux et permet de définir des périodes d'intervention optimales.

En combinant ces méthodes modernes avec des approches plus classiques d'analyse de fiabilité, ce travail a contribué à renforcer la fiabilité des équipements et à anticiper leur comportement futur. Il a également facilité la prise de décisions éclairées en matière de performance et de durabilité.

Réalisé au sein de la société HENKEL Algérie, société par actions (SPA) disposant de deux unités de production situées à Réghaia (Centre) et Chelghoum El Laïd (Est), ce mémoire a abouti à l'élaboration d'une stratégie de maintenance performante pour les groupes électrogènes, s'appuyant sur les avancées technologiques et les outils d'analyse les plus adaptés pour garantir leur bon fonctionnement.

À la lumière de ce travail, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées pour renforcer la stratégie de maintenance des groupes électrogènes :

- Mettre en place un système de surveillance en temps réel des paramètres de fonctionnement.
- Étendre l'analyse de fiabilité à d'autres équipements critiques du site.
- Intégrer l'intelligence artificielle pour la détection précoce des défauts.
- Renforcer la formation du personnel à l'utilisation des outils d'analyse prédictive.
- Évaluer l'impact économique des actions de maintenance pour une meilleure planification budgétaire.

BIBLIOGRAPHIE

[1] D. Sherwin, « A review of overall models for maintenance management. J of Qual in Maint Eng 6(3): 138-164 », *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 6, p. 138-164, sept. 2000, doi: 10.1108/13552510010341171.

[2] D. N. P. Murthy, A. Atrens, et J. A. Eccleston, « Strategic maintenance management », *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 8, no 4, p. 287-305, déc. 2002, doi: 10.1108/13552510210448504.

[3] « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels - Villemeur A. - Librairie Eyrolles ». https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/surete-de-fonctionnement-des-systemes- industriels-9782212016154/ (consulté le mai 09, 2021).

[4] « B. Herrou, B. ELKIHEL et M. Elghorba, Optimisation de plan d‟action maintenance par la maintenance basée sur la fiabilité, étude de cas d‟une PME marocaine, CPI‟2007, Rabat, Maroc, 2007.

[5] *Dana Netherton, Criterion for Defining RCM (Part One), Maintenance Technology, 1998.*
.

[6] P. Vrignat, « Génération d‟indicateurs de maintenance par une approche semi- paramétrique et par une approche markovienne », p. 163.

[7] FRANÇOIS MONCHY « Maintenance : Méthodes et organisation » ,2 e Ed. Dunod.

[8] A.HATHAT,H.DEBLAOUI : «Etude analytique FMD d'une turbine DR990»,mémoire master, encadré par : Mr. R.KAREK, Université Kasdi Merbah-Ouargla, (2015).

[9] "Manuel de maintenance", NAPHTOGAZ, HMD, (2001).

[10] JEAN –MARIE AUBERVILLE « maintenance industrielle de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté. » génie industrielle techno. Sup.

[11] Guide De La Maintenance Daniel Boitel Et Claude Hazard Edition Nathan1990.

[12] Djamel HALIMI, « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures », thèse de doctorat de l'université M'hamed Bougara de Boumerdes , 2014.

[13] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50003-1

[14] Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. United States Department of Defense. https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA066579.pdf

[15] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering and Analysis* (5th ed.). Pearson Education.

[16] Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

[17] AFNOR. (1990). *NF X 60-000 – Maintenabilité, fiabilité, disponibilité, sécurité de fonctionnement – Termes et définitions*. Association Française de Normalisation.

[18] Elsayed, E. A. (2012). *Reliability Engineering* (2nd ed.). Wiley.

[19] Birolini, A. (2017). *Reliability Engineering: Theory and Practice* (8th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54204-1

[20] Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC

[21] Wireman, T. (2005). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Industrial Press.

[22] Birolini, A. (2017). *Reliability Engineering: Theory and Practice* (8th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54204-1

[23] Bianchi, M., Rossi, F., & Conti, M. (2024). Strategic maintenance planning in the digital era: A hybrid approach merging Reliability-Centered Maintenance with digitalization opportunities. *Operations Management Research*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s12063-024-00496-y