

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE
ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : Science Technologie

FILIERE : Génie Electrique

OPTION : Maintenance Industrielle

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master**

Par :

DJEGHDALI MOHAMMED

BEKHTI YAHIA

Intitulé

**Etude et évaluation de la disponibilité
d'un système électromécanique**

Soutenu devant le jury composé de :

- | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------|
| - Dr. Mabrouk Defdaf | Université M'sila | Président |
| - Pr. Zine Ghemari | Université M'sila | Rapporteur |
| - Dr. Bilal Djamel Eddine Cherif | Université M'sila | Examineur |

Année universités : 2023 /2024

Remerciement

*Je remercie avant tout ALLAH qui m'a donné la force, la
Volonté et le moral pour accomplir mes études.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du
Département de génie électrique et l'ensemble des membres*

Du jury et spécialement notre encadreur

Pr. ZINE GHEMARJ.

Dr. MABROUK DEFDAJ

En fin, on remercie tous les personnels de la station de

*Production de l'énergie électrique de M'sila
(SPE_M'sila) qui nous a aidé pour rendre*

Ce travail effectif.

Dédicaces

À l'aide de dieu j'ai pu réaliser ce travail que Je dédie

À la mémoire de mon père

A ma très chère mère

Pour sa bienveillance et son abnégation pour

*M'encourager à terminer dans de bonnes conditions mon
travail.*

A mes frères

A tous les membres de ma famille

A tous mes amis chacun a son nom

En particulier les compagnons du long chemin avec tous

Mes vœux de succès

A Toute la famille universitaire.

Sommaire

Liste des abréviations	i
Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale	1
Chapitre I. Généralité sur la maintenance	1
I.1. Introduction	3
I.2. Définition de La maintenance	3
I.3. But de la maintenance	4
I.3.1. Objectives financiers	4
I.3.2. Objectives operational.....	4
I.3.3. Deux objectifs fondamentaux de la maintenance.....	4
I.4. Stratégie de maintenance (normes NF EN 13306 & FD X 60-000)	5
I.5. Différence entre entretien et maintenance.....	5
I.6. Historique et évolution de la maintenance	6
I.7. Maintenance comme politique	6
I.8. Avantages et les inconvénients de maintenance	7
I.8.1. Avantage de la maintenance.....	7
I.8.2. Inconvénient de la maintenance	7
I.9. Différents types de maintenances.....	7
I.9.1. Maintenance corrective	8
I.9.2. Maintenance préventive	8
I.9.3. Maintenance prévisionnelle :	10

I.9.4.	Maintenance Améliorative	10
I.10.	Techniques de la maintenance conditionnelle.....	10
I.11.	Opérations de maintenance	11
I.11.1.	Les opérations de maintenance corrective	11
I.11.2.	Les opérations de maintenance préventive.....	11
I.11.3.	Autres opérations.....	12
I.12.	Techniques d'analyse :	12
I.12.1.	L'analyse vibratoire :	13
I.12.2.	L'analyse d'huile :	14
I.12.3.	La thermographie infrarouge :	15
I.13.	Niveaux de maintenance	16
I.13.1.	Premier niveau.....	17
I.13.2.	Deuxième niveau.....	17
I.13.3.	Troisième niveau.....	17
I.13.4.	Quatrième niveau	18
I.13.5.	Cinquième niveau.....	18
I.13.6.	Documents nécessaires à prévoir	19
I.14.	Conclusion :	21
Chapitre II.	Methodes des calculs du FMD	2
II.1.	Introduction :	21
II.2.	Methodes des calculs du FMD	21
II.2.1.	Fiabilité (Reliability)	21
II.2.2.	Maintainabilité (Maintainability)	38
II.2.3.	La Disponibilité (Availability)	42
II.3.	conclusion.....	44

Chapitre III. Présentation de SPE Société Groupe (SONELGAZ).....	26
III.1. Présentation de SPE Société Groupe (SONELGAZ).....	45
III.1.1. Sonelgaz, un opérateur historique.....	45
III.1.2. Description de la Centrale M'sila :.....	45
III.2. Personnel	46
III.3. Description des structures des services	46
III.4. Division production.....	47
III.4.1. Le service Diagnostic Machine	48
III.4.2. Service Réalisation	48
III.4.3. Service Contrôle Economique	49
III.5. Division Technique	50
III.5.1. Service Etudes et Préparation	50
III.6. Service Approvisionnement Stock et Crédit	54
III.7. Service Ressource Humaines	55
III.8. Les Subdivision Finance et Comptabilité.....	56
III.9. Subdivision Moyens.....	58
.Chapitre IVApplication de l'analyse FMD sur le système électromécanique shoiser	52
IV.1. Introduction :.....	60
IV.2. Choix du système	60
IV.3. L'historique des pannes du groupe TG01 :.....	60
IV.4. L'analyse FMD	61
IV.4.1. Fiabilité.....	61
IV.4.2. Maintenabilité.....	68
IV.4.3. Disponibilité	69

IV.4.4. Amélioration de fiabilité par l'application de la maintenance préventive systématique.....	71
IV.4.5. Méthodes d'analyse prévisionnelle ABC	71
IV.5. Proposition des solutions pour les éléments les plus défaillants	74
IV.5.1. Proposition d'une révision générale	74
IV.5.2. Proposition des techniques de contrôle non destructif (CND)	76
IV.5.3. Proposition d'un plan des inspections préventives systématiques	80
IV.6. Conclusion :	83
Conclusion générale.....	45
Conclusion Générale.....	86
Références bibliographiques.....	88

Liste des abréviations

MBF	Maintenance basé sur la fiabilité
TBF	Temps de bon fonctionnement entre deux défaillances
MTBF	La durée moyenne entre deux défaillances consécutives
MTTR	Le temps moyen mis pour réparer le système
FMD	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité
$\lambda(t)$	Taux de défaillance
$\mu(t)$	Taux de réparation
$f(t)$	Densité de probabilité
$F(t)$	La fonction de répartition
$R(t)$	La fonction de fiabilité
$M(t)$	Fonction maintenabilité
$D(t)$	Fonction de disponibilité
Di	Disponibilité intrinsèque
Dn	La différence de test de Kolmogorov Smirnov
Γ	Paramètre de position
β	Paramètre de forme
γ	Paramètre de position
η	Paramètre d'échelle
a et b	Nombre réel

Liste des figures

Figure I-1. Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement.	4
Figure I-2 représentation synthétique de la maintenance.	7
Figure I-3 Maintenance préventive systématique.....	9
Figure I-4 Maintenance préventive conditionnelle.....	9
Figure I-5 Les différents indicateurs utilisés pour le diagnostic.....	10
Figure I-6 Différentes méthodes d'analyse.....	13
Figure I-7 technique d'analyse vibratoire.....	14
Figure I-8 technique d'analyse d'huile.....	15
Figure I-9 technique de la thermographie infrarouge.....	16
Figure II-1 Redondance m parmi n.....	22
Figure II-2 Redondance passive.	23
Figure II-3 Système avec n composantes en séries.	23
Figure II-4 Système avec n composantes en parallèle.....	24
Figure II-5 Densité de probabilité.....	28
Figure II-6 Fonction de répartition.	29
Figure II-7 Courbe de fiabilité et fonction de répartition.	32
Figure II-8 Fiabilité.....	33
Figure II-9 Fonction de répartition.	33
Figure II-10 Taux de défaillance	33
Figure II-11 Courbe en baignoire.	34
Figure II-12. Papier de Weibull.....	36
Figure II-13. Densité de probabilité.....	38
Figure II-14. Fonction de répartition.	38

Figure II-15. Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle.	40
Figure II-16. Les durées caractéristiques de FMD.	41
Figure II-17. La relation entre les notions FMD.....	44
Figure III-1 SPE Centrale de M'sila.	45
Figure IV-1 Papier fonctionnel de Weibull	62
Figure IV-2 Densité de probabilité.	65
Figure IV-3 Fonction de répartition F(t).....	66
Figure IV-4 Fonction de fiabilité R(t).	67
Figure IV-5 Taux de défaillance $\lambda(t)$	68
Figure IV-6. La Courbe de Maintenabilité.	69
Figure IV-7. Courbe de la disponibilité instantanée.....	71
Figure IV-8. La courbe ABC.....	73
Figure IV-9 Dégradation des aubes mobiles.	74
Figure IV-10 Dégradation des aubes fixes.	75
Figure IV-11 Dégradation des plaques céramiques.....	75
Figure IV-12 Schéma définissant les axes repères pour un contrôle ultrasonore.....	77
Figure IV-13 Etapes de contrôle par ressuage.....	80

Liste des tableaux

Tableau 1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.....	19
Tableau 2. Historique des pannes de groupe turbo-alternateur (TG01).	61
Tableau 3 Calcul de la fonction de répartition.....	62
Tableau 4. Paramètres de calcul de fiabilité.	63
Tableau 5. Estimation de la fiabilité et la fonction de répartition.	63
Tableau 6. Calcul de la densité de probabilité.....	65
Tableau 7 Calcul de la fonction de répartition $F(t)$	66
Tableau 8 Fonction de fiabilité $R(t)$	67
Tableau 9. Taux de défaillance $\lambda(t)$	67
Tableau 10. le calcul de la Maintenabilité.	69
Tableau 11. Calcul de la disponibilité instantanée.	70
Tableau 12. Données nécessaires pour tracer la courbe ABC.	73
Tableau 13. Plan des inspections préventives.....	82
Tableau 14. la comparaison entre la fréquence relative $F(t_i)$ et la fonction de répartition $F_{th}(t_i)$	93

Introduction Générale

Introduction générale

L'objectif de la maintenance est de développer une politique ou une stratégie visant à garantir la continuité de la production dans les installations industrielles, tout en prolongeant leur durée de vie et en renforçant leur niveau de sécurité. De plus, la maintenance vise à améliorer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de ces installations.

Les entreprises industrielles recherchent constamment des moyens d'améliorer leur production, que ce soit en termes de qualité ou de quantité. Cela implique également de veiller au bon fonctionnement des équipements de fabrication. En parallèle, les concepteurs s'efforcent de concevoir des systèmes fiables qui offrent des performances élevées. Ils cherchent continuellement des solutions techniques pour accroître la disponibilité et la fiabilité des équipements de production.

La santé des équipements est assurée par la surveillance de leur comportement. L'apparition d'un comportement anormal indique une défaillance causée par diverses situations, ce qui peut entraîner l'arrêt du système et l'interruption de la production.

De nombreuses initiatives ont été entreprises pour accroître la disponibilité des systèmes électromécaniques, en particulier dans le domaine du travail [1]. L'évaluation de la disponibilité et de la fiabilité des appareils à cylindres se fait selon deux approches distinctes. La première consiste en l'analyse de la Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité (FMD), qui simplifie l'analyse et l'adoption d'une politique de maintenance efficace. La seconde approche repose sur la théorie des processus de Markov, fournissant un outil mathématique pour cette évaluation [2].

Dans l'étude, diverses méthodes ont été explorées dans le contexte de la maintenance des systèmes électromécaniques afin d'améliorer la fiabilité de la machine Aléseuse Fraiseuse. Cependant, cette étude met en avant la méthode de la "Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)" pour son application sur les équipements et machines de production. Cette approche vise à planifier l'exécution des différentes tâches de maintenance tout en minimisant les interruptions du plan de production et en respectant au mieux les intervalles de maintenance des équipements [3].

Dans notre mémoire, une méthode basée sur l'analyse de la fonction de maintenance a été présentée pour évaluer la fiabilité et la disponibilité. L'application de cette méthode à la station de production électrique (SPE) vise à améliorer sa fiabilité et sa disponibilité. Ce travail vise à améliorer la disponibilité du turboalternateur au sein de SPE en proposant un ensemble de solutions axées sur les organes les plus susceptibles de tomber en panne. Nous proposons également un plan préventif

basé sur des opérations de maintenance préventive systématique. Pour atteindre cet objectif, notre mémoire est structuré en quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre présentera les concepts fondamentaux de la maintenance, y compris les différents types de maintenance, leurs objectifs et leurs niveaux. Il abordera les distinctions entre la maintenance corrective et la maintenance préventive, expliquant comment chacune vise à maximiser la disponibilité des équipements tout en minimisant les coûts et les interruptions de production.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude approfondie de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité des systèmes électromécaniques, ainsi qu'à leurs méthodes de calcul. Il débutera par une définition détaillée de la fiabilité, expliquant comment cette mesure quantifie la probabilité qu'un système fonctionne sans défaillance pendant une période donnée. Le chapitre discutera des facteurs influençant la fiabilité et présentera les principales lois statistiques utilisées pour modéliser la fiabilité, telles que la loi exponentielle, la loi de Weibull et la loi normale.
- Le troisième chapitre illustrera la station de production l'énergie électrique (SPE) dans la wilaya de M'sila.
- Le quatrième chapitre est consacré à une application pratique de l'analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (F.M.D) sur un turboalternateur choisi au sein de la Société de Production Électrique (SPE). Ce chapitre vise à évaluer les paramètres de la sûreté de fonctionnement de ce turboalternateur, puis à proposer des améliorations pour optimiser ces paramètres.
- Finalement, une conclusion générale qui résumera tous les résultats obtenus et leurs valeurs sur Le fonctionnement et la production du système choisi.

Chapitre I. Généralité sur la maintenance

I.1. Introduction

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que le besoin de produire vite et bien, ont obligé les industriels à structurer et à organiser les « ateliers d'entretien » ils ont surtout créé de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles manières d'intervenir sur des structures de production concernant les produits manufacturés.

Aujourd'hui, l'entretien a laissé la place à la maintenance. Ce changement ne réside pas uniquement dans un changement de dénomination, mais aussi dans un bouleversement complet de la manière de faire et de concevoir ce qui s'appelait « entretien » et que l'on appelle aujourd'hui « maintenance ». Il y a quelques dizaines d'années, les ateliers de production ne disposaient d'aucune structure de maintenance. L'entretien des machines ou des unités de production se faisait par des personnes, spécialisées ou non, sans logistique établie et surtout définie.

La production intensive, la complexité des systèmes et surtout la rentabilité, ont poussé les industriels à créer un domaine et une structure dans l'entreprise appelée : « service maintenance ». Ce service structuré comporte différents corps de métiers comme des électriciens, des mécaniciens, des électroniciens, des automaticiens. Ces spécialistes interviennent chacun dans leur domaine respectif, mais en respectant une coordination dans les tâches à effectuer. [4]

I.2.

I.3. Définition de La maintenance

La norme AFNOR NF X 60 010 [AFNOR, 2002] définit la maintenance par l'expression suivante « La maintenance constitue l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état qui lui permet d'accomplir la fonction requise ». La maintenance vise la conservation de l'état préalablement défini (le bon état) mais permet aussi la reconstitution et l'amélioration. L'entretien peut être vu comme une condition nécessaire mais insuffisante de la maintenance. Les objectifs de la maintenance se résument comme suit :

- Réduire le nombre d'arrêts sur casse
- Fiabiliser l'outil de production
- Augmenter son taux de disponibilité
- Dépanner rapidement les équipements.
- Améliorer la sécurité du travail, etc. [5]

I.4. But de la maintenance

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types

I.4.1. Objectives financiers

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

I.4.2. Objectives operational

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment.[6]

I.4.3. Deux objectifs fondamentaux de la maintenance

Les deux objectifs [4] majeurs de maintien d'un site de production

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

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

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

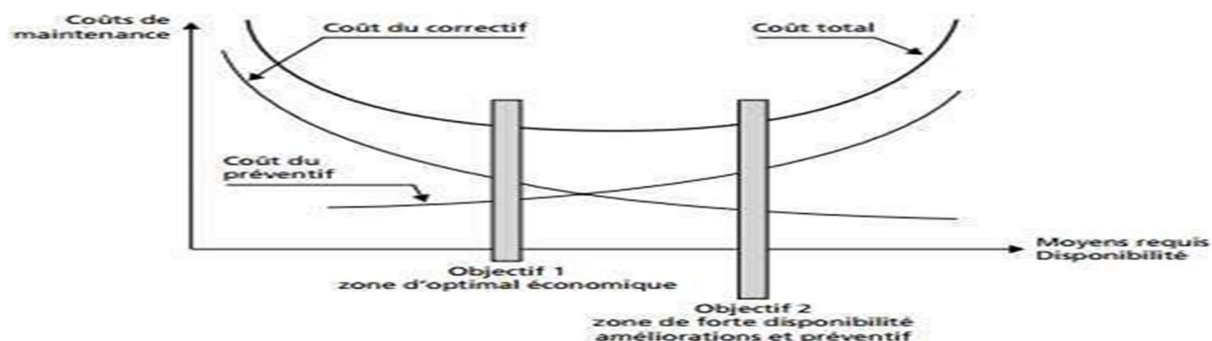


Figure I-1. Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement.[4]

« Réduire les dépenses » de maintenance consiste à optimiser les coûts directs des moyens mis en Suvre pour maintenir une installation, cest-à-dire choisir le niveau de préventif qui optimise le coût total. Mais le coût total direct nintègre pas les coûts des conséquences des défaillances qui justifient souvent lobjectif « plus de disponibilité », donc plus de préventif et damélioration. Cette performance ne sobtient malheureusement pas au coût direct minimal.[4]

I.5. Stratégie de maintenance (normes NF EN 13306 & FD X 60-000)

"La stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance."

Les choix de stratégie de maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de maintenance :

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance.
- Elaborer et optimiser les gammes de maintenance.
- Organiser les équipes de maintenance.
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance. - Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.
- Etudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité. [7]

I.6. Différence entre entretien et maintenance

Entretien : ce terme désigne les opérations ou les interventions à effectuer sur un matériel de production afin de le conserver en parfait état de produire. Les opérations

Correspondantes, souvent ordonnées par le constructeur, peuvent prendre la forme

- de vidange (huile de lubrification) ;
- de graissage (paliers de guidage) ;
- de changement de courroies. etc.

Maintenance : la maintenance permet d'organiser, prévoir, planifier et gérer les opérations d'entretien. La maintenance permet donc de conserver un bien dans son état maximal de production.

Aux activités techniques effectuées par des spécialistes viennent se greffer d'autres responsabilités comme :

- L'organisation d'une structure de maintenance préventive.
- Le suivi des coûts
- L'analyse des pannes ainsi que le compte rendu des interventions de maintenance.
- Le suivi informatique du vieillissement du matériel.
- L'établissement d'un fichier historique du suivi de maintenance par secteur et par machine.
- La gestion des stocks de pièces détachées.
- Les activités de conseil (AMDEC...).[4]

I.7. Historique et évolution de la maintenance

- A. Le terme "maintenance" a son origine dans le vocabulaire militaire, dans le sens maintien dans des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant. Il est évident que les unités qui nous intéressent ici sont les unités de production, et le combat est avant tout économique. L'apparition du terme "maintenance" dans l'industrie a eu lieu vers 1950 aux USA. En France, il se superpose progressivement à "l'entretien".
- B. Entretien ou Maintenance ?
- Entretien c'est dépanner et réparer un parc matériel, afin d'assurer la continuité de la production. (Entretien c'est subir).
 - Maintenir c'est choisir des moyens de prévenir, de corriger ou de rénover le matériel, suivant sa criticité économique afin d'optimiser le coût global de possession. (Maintenir c'est maîtriser). [7]

I.8. Maintenance comme politique

- A. La maintenance est une politique qui prend en compte :
- B. Le choix des méthodes d'entretien (les différents modes de maintenances).
- C. Les améliorations.
- D. La place des équipements dans le procédé de fabrication (hiérarchisation).
- E. La formation du personnel d'entretien et de production [8]

I.9. Avantages et les inconvénients de maintenance

I.9.1. Avantage de la maintenance

C'est une maintenance facile à gérer car les périodes d'interventions sont fixes, elle permet

- D'éviter les détériorations importantes.
- De diminuer les risques d'avaries imprévues. [2]

I.9.2. Inconvénient de la maintenance

Reposer sur la notion de MTBF et ne prends pas en compte les phénomènes d'usure. [2]

I.10. Différents types de maintenances

Sur la [Figure I.2] on distingue deux principaux types de la maintenance.

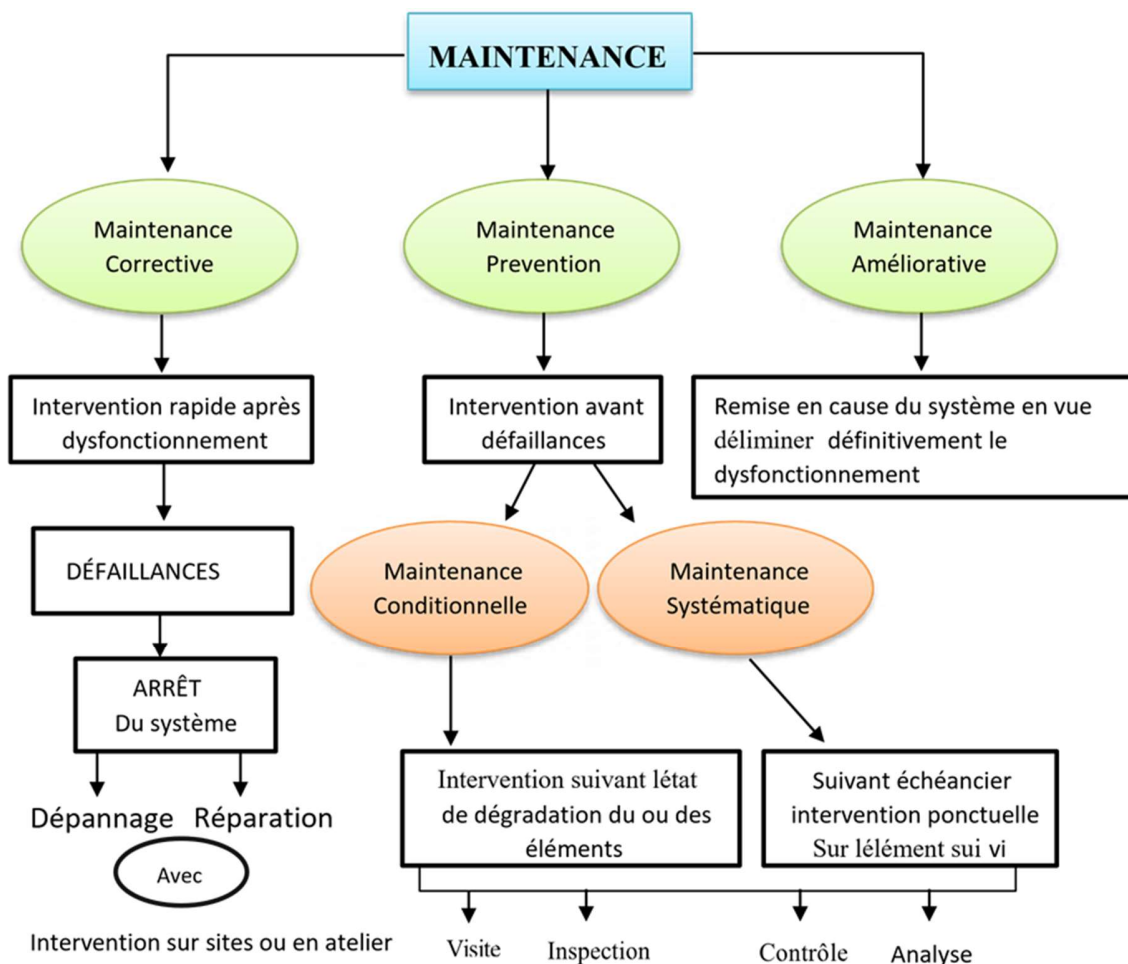


Figure I-2 représentation synthétique de la maintenance.

I.10.1. Maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. L'opération de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches: la maintenance palliative et la maintenance curative.

- Maintenance palliative : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieure au niveau optimal.
- Maintenance curative : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.[9]

I.10.2. Maintenance préventive

L'objectif de la maintenance préventive est de déterminer l'ensemble des actions à exercer sur le procédé afin de ne pas subir l'effet d'une défaillance. On peut à cet effet distinguer deux approches possibles : la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle.

I.10.2.1. Maintenance préventive systématique

Ce type de maintenance est effectué dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Elle est effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage. Ci-après nous présentons une figure qui illustre ce principe. [5]

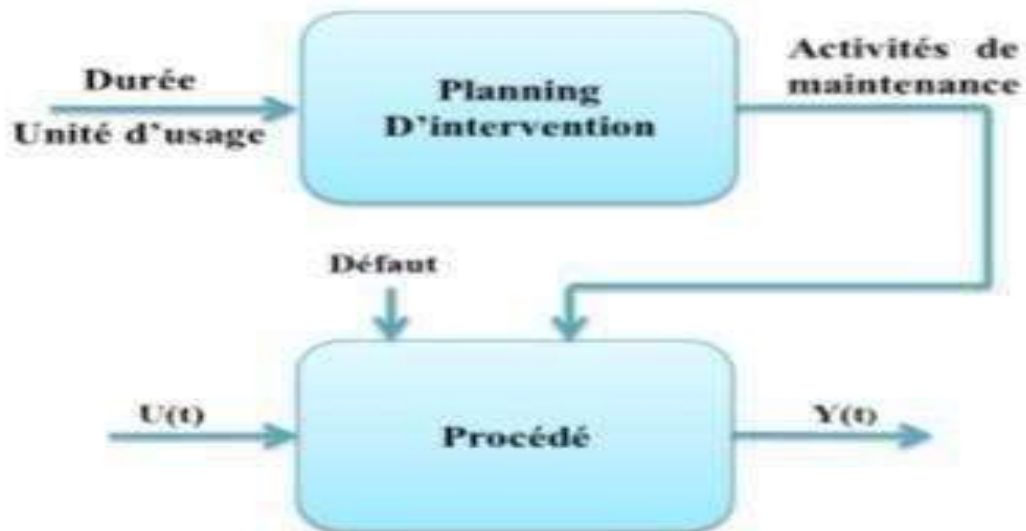


Figure I-3 Maintenance préventive systématique.[5]

I.10.2.2. Maintenance préventive conditionnelle

Ce type de maintenance est basé sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive.

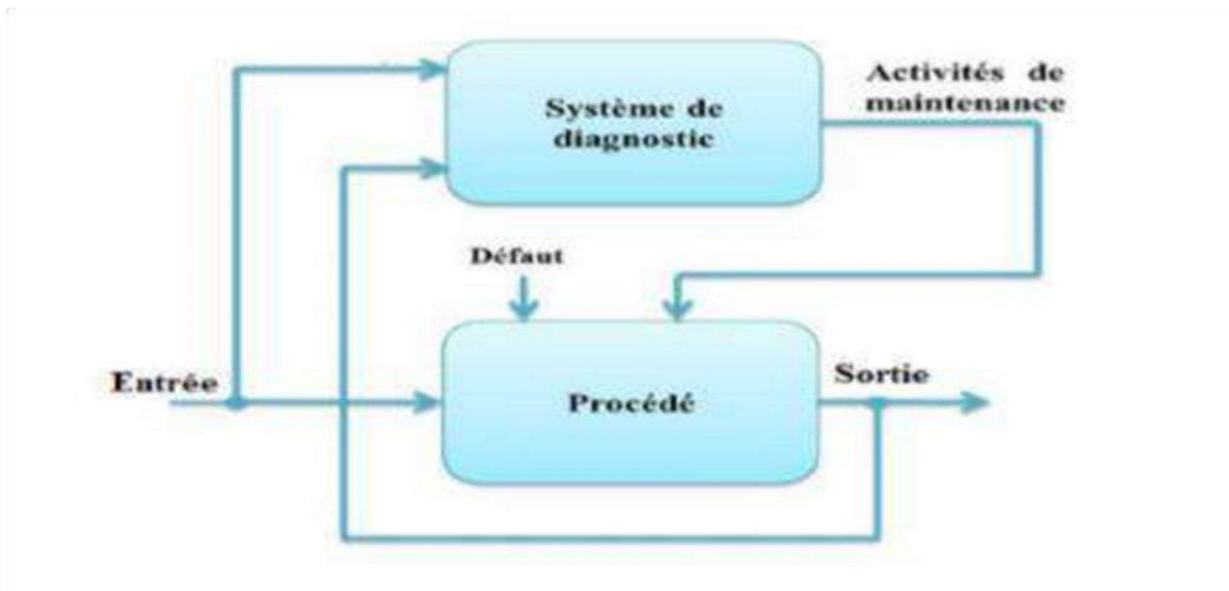


Figure I-4 Maintenance préventive conditionnelle.[5]

On s'intéresse dans la suite à la maintenance conditionnelle, basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système considéré.

I.10.3. Maintenance prévisionnelle :

Parfois appelée « maintenance prédictive », la maintenance prévisionnelle est, selon l'AFNOR, « Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ». Elle est basée sur l'analyse de l'évolution des paramètres techniques qui permettent de quantifier l'état du bien et de déceler les dégradations potentielles dès leur apparition, elle permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée. [10]

I.10.4. Maintenance Améliorative

Après plusieurs défaillances de même nature, ce type de maintenance permet, après réflexion et étude, d'éliminer le problème. Elle nécessite obligatoirement une concertation entre services Production - Bureau d'étude et Maintenance.[4]

I.11. Techniques de la maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle se base sur l'analyse des grandeurs mesurées afin de détecter ou signaler une anomalie au niveau d'un système. La [Figure I.5] représente cette grandeur :

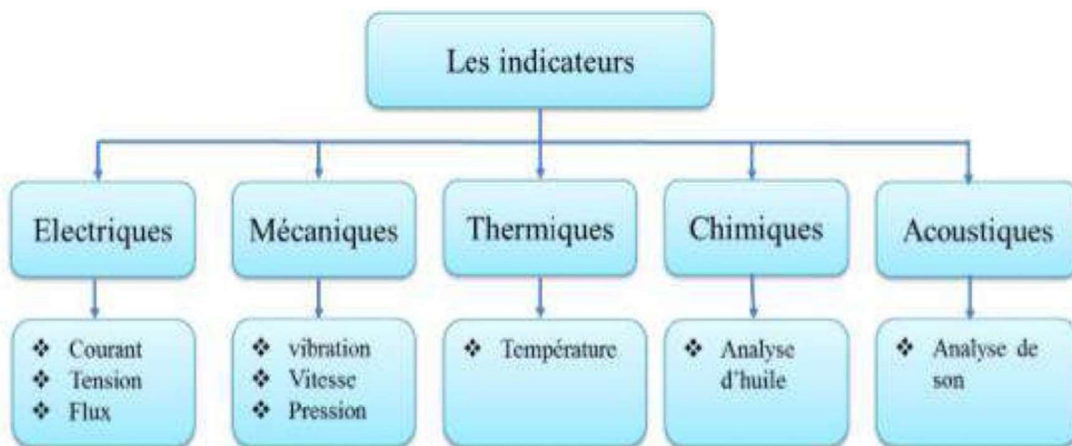


Figure I-5 Les différents indicateurs utilisés pour le diagnostic [5]

I.12. Opérations de maintenance

I.12.1. Les opérations de maintenance corrective

I.12.1.1. Dépannage

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt. [11].

I.12.1.2. Réparation

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance.

L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.[11].

I.12.2. Les opérations de maintenance préventive

I.12.2.1. Inspections

C'est l'activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies, et d'exécution de réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni l'arrêt des équipements.[11].

I.12.2.2. Visites

Opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.[11].

I.12.2.3. Contrôles

Il correspond à des vérifications de conformité par rapport à des données prédéterminées suivies d'un jugement. Le contrôle peut comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet..... [11].

I.12.3. Autres opérations

I.12.3.1. Révision

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles.

Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections.

Les 2 types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4ème niveau de maintenance. [12].

I.12.3.2. Echanges standards

Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état. Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des biens échangés. [12].

I.13. Techniques d'analyse :

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (figure I-6) tels que :

1. L'analyse vibratoire.
2. L'analyse d'huile.
3. La thermographie infrarouge.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps.

Sur cette figure, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils. [13]

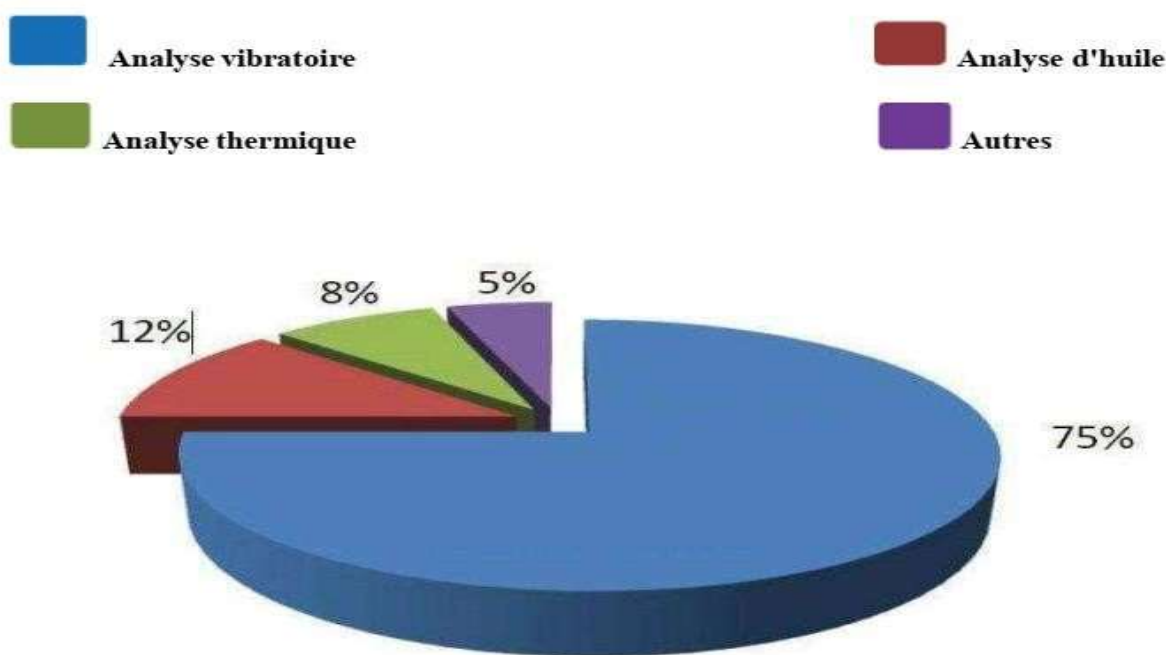


Figure I-6 Différentes méthodes d'analyse.

I.13.1. L'analyse vibratoire :

Parmi les méthodes utilisées en maintenance conditionnelle l'analyse vibratoire est une des plus utilisées pour le suivi des systèmes mécaniques. Le principe général consiste à utiliser l'information vibratoire émanant soit d'un équipement mécanique dynamique (machines tournantes, ...) soit d'un matériel statique (structure, tuyauterie, ...) afin d'en déterminer l'état. En effet, un ensemble de pièces en mouvement, quelque soit la forme de la structure porteuse, génère des vibrations, et ce, même si les machines analysées sont en bon état de fonctionnement. Les vibrations dans les bâtis de machine peuvent avoir plusieurs origines telles que des arbres mal équilibrés, mais aussi des roulements à billes, des engrenages ou des courroies en parfait état de marche qui viennent exciter ces bâtis. Les signaux vibratoires relevés permettent d'identifier une dégradation de l'outil de

production avant qu'un incident ne se produise. Selon la qualité des relevés vibratoires et de la pertinence de l'analyse elle permet de spécifier le ou les composant(s) qui commence(nt) à se détériorer. Toutefois les coûts de l'instrumentation nécessaire au recueil des données mais aussi à leur analyse sont assez élevés, ce qui a pour effet de limiter la généralisation de ces techniques. [14]



Figure I-7 technique d'analyse vibratoire.

I.13.2. L'analyse d'huile :

Un lubrifiant joue de nombreux rôles :

- Réduit la consommation d'énergie.
- Limite l'usure.
- Participe au refroidissement.
- Assure certaines étanchéités.

Protégé contre la corrosion .L'analyse d'échantillons d'un fluide lubrifiant permet de déterminer les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et ainsi d'identifier de manière précoce une usure des éléments mécaniques en contact. En effet, le lubrifiant est un remarquable vecteur d'informations, puisqu'il va recueillir, en passant à travers les circuits, toutes les contaminations et usures provoquées ou subies par les machines. De ce fait, il va également se dégrader dans le temps. L'analyse d'huile usagée pennet donc d'avoir rapidement une vue détaillée non seulement de l'état du lubrifiant mais également de l'équipement qu'il lubrifie. L'objectif sera de déceler les principales anomalies afin de donner au Responsable de Maintenance des informations précises sur l'état de la machine, et cela en recherchant dans le lubrifiant : Tous les phénomènes de pollution.Tous les phénomènes de

contamination. L'ensemble des métaux provenant de l'usure. Dans certains cas et notamment lorsque les vidanges sont espacées, l'état du lubrifiant. Toutefois l'étape préalable à l'étude de la dégradation et/ou de la contamination du lubrifiant consiste à prélever un échantillon de lubrifiant. L'acquisition d'échantillons « valides » constitue souvent une limite à ces analyses. En effet, cette opération doit être effectuée avec soin, de façon à obtenir des échantillons représentatifs de l'état du lubrifiant qui circule dans l'installation. Ainsi, même si les procédés d'analyse des lubrifiants utilisables en ligne commencent à être bien connus, les méthodes de prélèvement et la fréquence à laquelle il faut les prévoir constituent toujours une difficulté dans la mise en œuvre de cette technique de surveillance.

L'objectif de ces techniques est de mettre en place des signatures caractéristiques de l'état de fonctionnement d'un système à partir de mesures réalisées sur celui-ci. L'utilisation de ces techniques en maintenance engendre des coûts de mise en œuvre qui ne sont pas toujours négligeables vis-à-vis des gains escomptés. Les techniques d'analyse vibratoire, de thermographie ou encore d'analyse de lubrifiants sont essentiellement utilisées de manière périodique sur des équipements pour lesquels les coûts imputés à une diminution de la productivité seraient très importants. [14]



Figure I-8 technique d'analyse d'huile.

I.13.3. La thermographie infrarouge :

L'analyse thermographique fait également partie des techniques de mesure employées pour la surveillance des équipements. Elle consiste à mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge d'un système. Chaque corps émet son propre rayonnement qui dépend directement de sa température et de sa nature. Appliquée à la maintenance, un défaut sur un équipement entraîne généralement une différence de température, comme chez l'homme pour qui une maladie se traduit par une augmentation de la température.

Par conséquent, la détection de l'échauffement d'un composant permet d'identifier un défaut, et dans certaines situations d'en localiser la cause. Aujourd'hui, la majeure partie des applications traitées par cette technique sont réalisées dans le domaine électrique, mais en mécanique aussi, la thermographie est intéressante en étant complémentaire de l'analyse vibratoire. Elle a pour principal avantage d'être rapide, sans contact avec la machine, et peut mettre en évidence de nombreux problèmes sur des organes mécaniques comme par exemple les engrenages. Illustre l'application de l'analyse thermographique pour la surveillance des systèmes électriques.

La partie a) représente l'image d'un disjoncteur vue par l'homme et sur laquelle aucune anomalie n'est perceptible.

Alors que la partie b) correspond à l'image obtenue par une caméra thermique, image sur laquelle une connexion défectueuse est mise en évidence par l'apparition d'un point chaud. [15]



Figure I-9 technique de la thermographie infrarouge.

I.14. Niveaux de maintenance

Un niveau de maintenance se définit par rapport:

- À la nature de l'intervention ;
- à la qualification de l'intervenant ;

Aux moyens mis en Suivre.

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

Il existe cinq niveaux de la maintenance illustrés dans le tableau ci-dessous (tableaux 1) :

I.14.1. Premier niveau

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

Exemples

Echanges en toute sécurité d'éléments consommables tels que : fusibles, voyants, ...

Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.

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

I.14.2. Deuxième niveau

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

Exemples

Graissage d'une machine ;

Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements. Thermiques ;

Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.

Ces interventions de deuxième niveau peuvent être réalisées par un technicien Ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçu une formation pour les exécuter en toute sécurité.

I.14.3. Troisième niveau

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

D'échanges de constituants ;

De réparations mécaniques mineures ;

De réglage et ré étalonnage général des mesureurs.

Exemples

Emplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension ; - Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine ;

Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette. Les interventions de troisième niveau peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans un atelier de maintenance.

I.14.4. Quatrième niveau

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

Exemples

Révision générale d'un compresseur ;

Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage ;

Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil. Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention.

I.14.5. Cinquième niveau

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

Révision générale de la chaufferie d'une usine ;

-Rénovation d'une ligne de conditionnement de flacons pour améliorer son degré d'automatisation ;

-Réparation d'un engin de levage portuaire partiellement endommagé à la suite d'une tempête. Dans ce type de travaux les moyens et les méthodes sont comparables à ceux mis en œuvre lors de la fabrication des matériels. C'est au constructeur d'en fournir, les spécifications techniques et constructives. [4].

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
---------	--------------------------	--------

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

Tableau 1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

I.14.6. Documents nécessaires à prévoir

Une intervention de maintenance sur un système ne peut se faire sans référence à des documents précis et à jour. Chaque machine ou système possède différents dossiers qui permettent de connaître les différentes structures de l'ensemble. Les interventions de maintenance sont obligatoires pour la conservation du système dans un état optimal de production. De plus, ces interventions doivent se faire au moindre coût, sans gêner la production. Pour tenir cet objectif, il est indispensable de pouvoir consulter à tout moment le passé, au niveau technique, du bien de production.

L'informatique, grâce à des logiciels parfaitement adaptés à cette gestion de maintenance, permet d'établir des dossiers, de les tenir à jour, de les consulter à tous moments, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

I.14.6.1. Dossier technique

Ce dossier d'ordre général regroupe les aspects techniques propres à un type de machine, à savoir :

- Les schémas électriques.
- Les plans et schémas mécaniques.
- Les données et paramètres de fonctionnement.
- Les caractéristiques fonctionnelles.

I.14.6.2. Dossier machine

Ce dossier, particulier à la machine, ne concerne que celle-ci. Il peut comporter des documents ou renseignements comme :

- Sa mise en service.
- Les consignes particulières d'installation et de mise en place.

I.14.6.3. Dossier relatif à son cycle de fonctionnement

- Les différents GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition).
- Le GEMMA (Guide d'étude des Modes de Marches et d'Arrêts).

I.14.6.4. Dossier relatif à la partie mécanique

- Les spécifications de réglage ;
- Les interventions de maintenance particulières ;
- Les modifications intervenues après mise en service ;
- Les spécifications particulières, au niveau sécurité, concernant certaines interventions présentant des risques.

I.14.6.5. Sous-dossier dit « fichier historique »

Il va regrouper les traces écrites ou informatisées du passé propres au système. C'est à ce niveau que l'on peut parler d'évolution de maintenance par rapport à un entretien.

On trouve par exemple:

- Tout le passé de l'entretien classique, préconisé par le constructeur comme.
- Les révisions des éléments mécaniques.
- Les vidanges et graissages des éléments de transmission de mouvement.
- Les dysfonctionnements.
- Les pannes ou arrêts anormaux.
- Les dépannages puis les réparations.

- La logique maintenance doit faire apparaître également le coût financier de cette "logistique".
- Seront pris en compte.
- Les coûts intervention.
- Le temps passé par intervention.
- Le coût des éléments changés.
- La gestion du magasin de pièces détachées, en tenant compte de préserver un stock minimum.
- L'outil informatique peut se montrer très performant et permettre une gestion facile et logique de la structure « maintenance » d'une unité de production. [7].

I.15. Conclusion :

La maintenance est l'un des processus les plus importants dans la gestion d'entreprise.

A cet effet, l'organisation et la gestion d'une politique de maintenance stratégique assure Prospérité et développement de l'entreprise.

Chapitre II. Méthodes des calculs de FMD

II.1. Introduction :

La sûreté de fonctionnement regroupe les activités d'évaluation de la fiabilité (assurer la continuité du service), de la Maintenabilité (être réparable), de la disponibilité (être prêt à l'emploi), d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement de l'entité. Ces évaluations sont prévisionnelles et reposent essentiellement sur des analyses inductives ou déductives des effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité. [16]

II.2. Methodes des calculs du FMD

II.2.1. Fiabilité (Reliability)

II.2.1.1. Définition de la fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0 ; t]$, sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant $t=0$. $R(t) = \text{Prob} \{E \text{ non défaillant sur } [0 ; t]\}$. [17]

Définition selon la NF X 06-501 : la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée. [18]

II.2.1.2. Objectif de la fiabilité

La fiabilité utilisée depuis bientôt une dizaine d'années dans l'industrie, le concept de fiabilité permet à l'aide de renseignement statistique recueilli pendant la vie du matériel [19] :

- De mesurer une garantie dans le temps.
- Dévaluer rigoureusement de degré de confiance.
- De chiffrer une dure de vie.
- Dévaluer une précision du temps de bon fonctionnement.
- De calculer le risque pris.
- De déterminer la stratégie d'entretien.
- De choisir le stock magasin judicieux.

II.2.1.3. Fiabilité des systèmes complexes

II.2.1.3.1 Redondance active m parmi n

Un système en redondance active m parmi n fonctionne si au moins m parmi les n composants redondants fonctionnent [20]. Si les composants sont indépendants et identiquement distribués ($R=R_i$, $i=1, 2, \dots, n$).

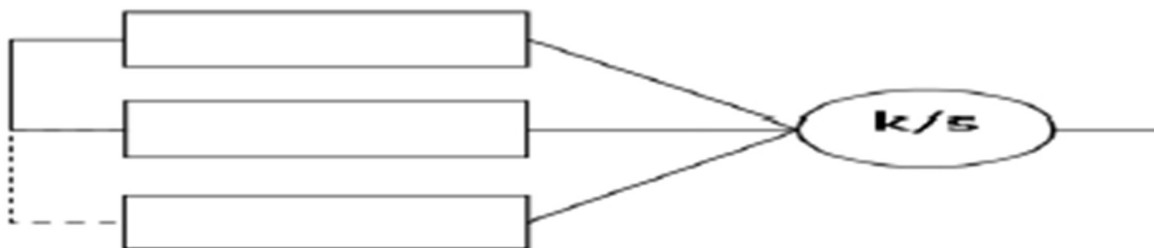


Figure II-1 Redondance m parmi n.

❖ alors la fiabilité du système est donnée par :

$$R(t) = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} R^j (1-R)^{n-j} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.3.2 Redondance passive

Dans une redondance passive les composants redondants ne sont mis en service que lorsque les composants du système sont défaillants. Dans l'exemple de la figure II-5 à deux composants en redondance passive, le deuxième composant est mis en service lorsque le composant principal est défaillant, [20]. Si les composants ont la même loi de fiabilité $R(t)$.

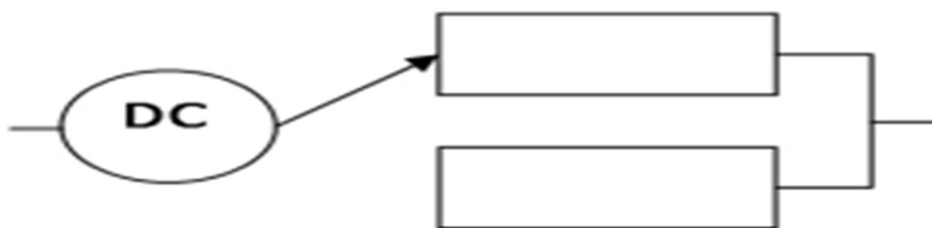


Figure II-2 Redondance passive.

❖ La fiabilité de ce système est donnée par :

$$R_{sys} = R(t) + \int_0^t f(\tau)R(t - \tau)\partial\tau \quad (II.3)$$

II.2.1.3.3 Composants en série :

La fiabilité R_s d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_A, R_B, R_C, R_n de chaque composant. $R_s = R_A * R_B * R_C * ... * R_n$ Si les "n" composants sont identiques avec une même fiabilité R la formule sera la suivante :



Figure II-3 Système avec n composantes en séries. [21]

❖ Si le taux de défaillance constant donc :

$$R(s) = (e^{-\lambda a t}) * (e^{-\lambda b t}) * (e^{-\lambda c t}) * (e^{-\lambda n t})$$

❖ Pour calculer la fiabilité dans cet exemple on utilise :

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (II. 4)$$

II.2.1.3.4 Composants en parallèle :

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de n composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les n composants tombent en panne au même moment.

Si F_i est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée R_i est son complémentaire : $F_i = 1 - R_i$

- F_i représentant la fiabilité associée :

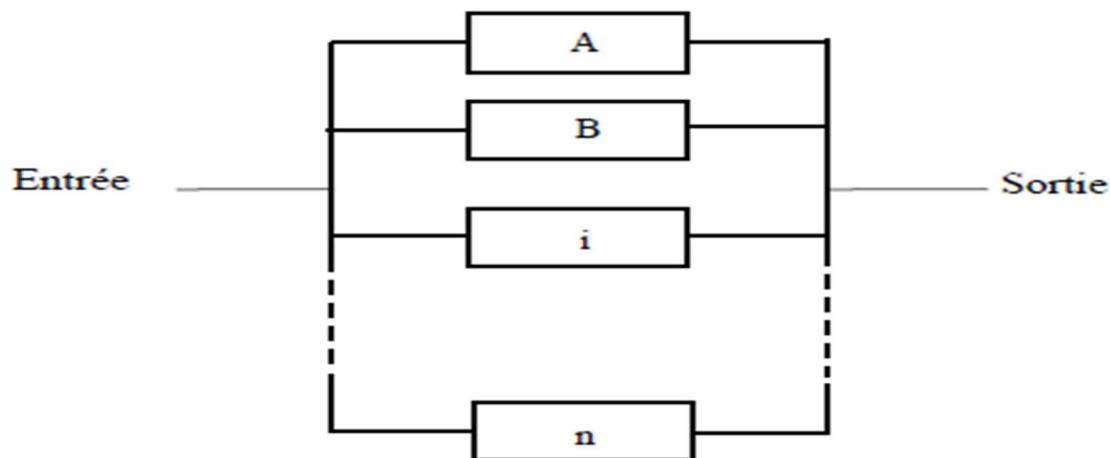


Figure II-4 Système avec n composantes en parallèle. [21]

- Pour calculer la fiabilité de ce système on utilise :

$$R_{sys}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (II.5)$$

II.2.1.4. Paramètres nécessaires pour mesurer la fiabilité :

II.2.1.4.1 Densité de probabilité :

La densité de probabilité de l'instant de la défaillance T s'obtient en dérivant la fonction de répartition $F(t)$: [22]

$$f(t) = \frac{\partial f(t)}{\partial(t)} = - \frac{\partial R(t)}{\partial(t)} \quad (II.6)$$

II.2.1.4.2 Fonction de répartition :

C'est la probabilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant t_i . [22]

$$f(t_i) = P_R(T < t_i) \quad (II.7)$$

Notons que ces deux fonctions sont complémentaires :

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (II.8)$$

II.2.1.4.3 Fonction de fiabilité :

Nous appelons $R(t)$ la fonction de fiabilité, qui représente la probabilité de fonctionnement sans défaillances pendant un temps (t) , ou la probabilité de survie jusqu'à un temps (t) . La probabilité

d'avoir au moins une défaillance avant le temps (t), qui représente la probabilité cumulative des défaillances, est appelé : « probabilité de défaillance ». [22]

II.2.1.5. Indices de fiabilité (λ) et (MTBF) :

II.2.1.5.1 Taux de défaillance :

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances. [23]

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{durée total de bon fonctionnement}} \quad (\text{II.9})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{II.10})$$

II.2.1.5.2 Temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) :

Le temps moyen jusqu'à défaillance (ou moyenne des temps de bon fonctionnement) est : [24]

$$MTBF = \frac{\text{la somme de temps de bon fonctionnement}}{\text{temps de bon fonctionnement nombre d'intervalles de temps de bon fonctionnement}} \quad (\text{II.11})$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{II.12})$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II.13})$$

II.2.1.6. Lois de calcul de la fiabilité :

On distingue deux types : [21]

- Lois discrètes.
- Lois continues.

II.2.1.6.1 Lois discrètes :

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans \mathbb{N} c'est à dire des valeurs entières comme celle qui compte le nombre de pannes.

- ❖ Parmi les lois discrètes on peut citer : [21]

- Loi Uniforme
- Loi de Bernoulli
- Loi Binomiale
- Loi Binomiale négative
- Loi Géométrique
- Loi Hypergéométrique
- Loi de Poisson

II.2.1.6.2 Lois continues : [21]

- La loi du Khi deux
- La loi Gamma
- Loi Inverse Gamma
- La loi de Student
- La loi log-logistique
- La Loi de Cauchy
- La loi Bêta
- La loi exponentielle
- La loi de Fisher
- 14. La loi de Weibull

Et des autres lois mais dans notre recherche, nous parlerons des lois les plus importantes et les plus utilisées en fiabilité.

II.2.1.6.3 Lois principales de la fiabilité :

La fiabilité est, de plus en plus fréquemment, une grandeur quantitative et nécessite la

Connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Ces distributions doivent absolument

Tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies.

Nous présentons dans cette section les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience,

De représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité mécatronique. Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de Fiabilité associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance. [25]

Dans les études de fiabilité des différents équipements, une variable aléatoire continue ou discrète peut être distribuée suivant diverses lois qui sont principalement : [26]

- La loi exponentielle.
- La loi de WEIBULL.
- La loi normale.
- La loi log-normale (ou loi de GALTON).
- La loi gamma.
- Lois binominale.
- La loi de POISSON.

II.2.1.6.4 Loi Gamma :

La loi Gamma est une loi de probabilité de densité de paramètre $\lambda > 0$, $s > 0$, Elle est notée : [27]

$$f(t) = \frac{\lambda^s}{\Gamma(s)} (\lambda t)^{s-1} e^{-\lambda t} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

- ✓ λ : est le taux ou débit de réponse
- ✓ s : est le nombre de réponses qu'on attend
- ❖ Le temps d'attente moyen sera donc de :

$$\mu = s \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Unité de temps})$$

- ❖ Comme nous l'avons fait pour les modèles poissonniers, nous pouvons construire un modèle du débit de réponse à partir d'une ou de plusieurs variables indépendantes. La moyenne d'un Gamma s'écrit :

$$\mu = \frac{s}{\lambda} \quad (\text{II.15})$$

- ❖ On peut dénier un modèle de régression inverse :

$$\mu = \frac{s}{\lambda} = \frac{s}{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}$$

- ❖ Peut aussi s'écrire :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta_0}{s} + \frac{\beta_1}{s}X_1 + \dots + \frac{\beta_p}{s}X_p = \beta_0^* + \beta_1^*X_1 + \beta_p^* \quad (II.16)$$

Régression Gamma (lien log), Nous pouvons aussi observer que si $\mu = \frac{s}{\lambda}$, alors :

$$\text{Ln}\mu = \ln(s) - \ln(\lambda) \quad (II.17)$$

❖ Si nous pensons que l'effet des variables sur le temps d'attente est non plus additif mais multiplicatif (effet d'apprentissage ou d'accumulation) :

$$\lambda = e^{\beta_0} e^{\beta_1 X_1} e^{\beta_2 X_2} \dots e^{\beta_p X_p} = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p} \quad (II.18)$$

Alors on a un modèle log linéaire [22].

$$\ln \mu = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad (II.19)$$

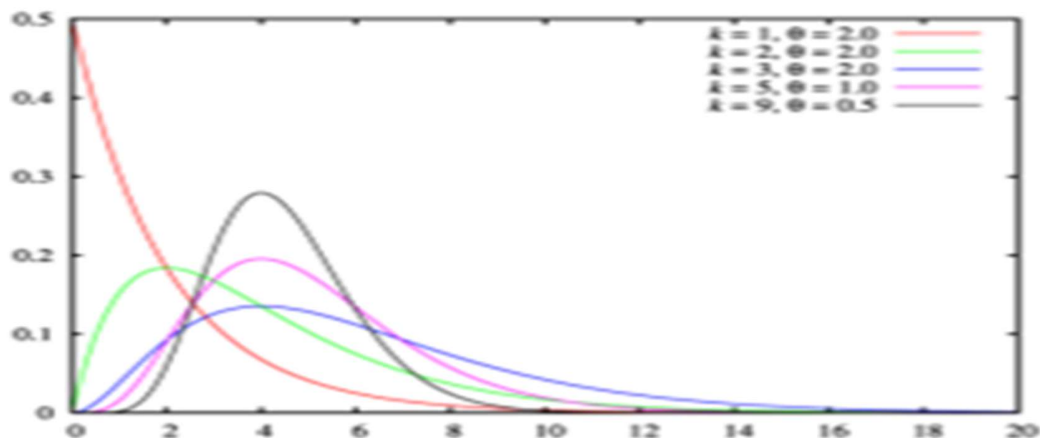


Figure II-5 Densité de probabilité.

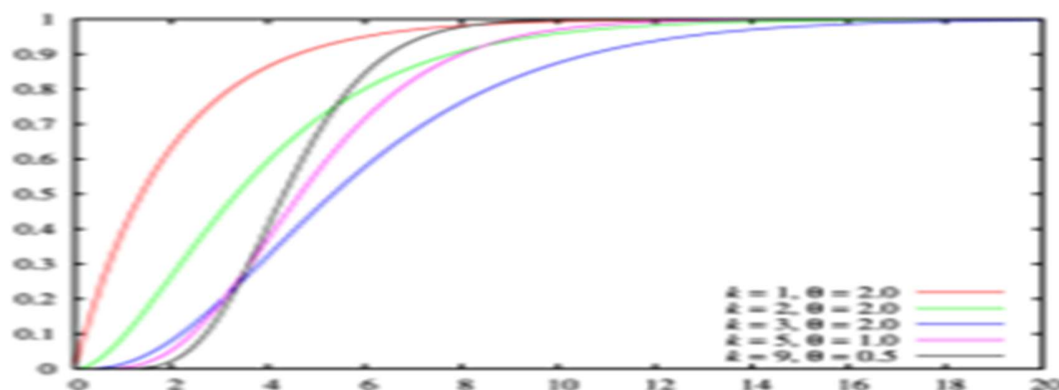


Figure II-6 Fonction de répartition.

II.2.1.6.5 La Loi log-Normale (ou loi de GALTON) :

Une variable aléatoire continue et positive T est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique. [25]

La densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs μ et σ est :

❖ La fiabilité :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \tag{II.20}$$

❖ La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)^2} \tag{II.21}$$

❖ Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_0^\infty \sigma \sqrt{2\pi} f(t) dt} \tag{II.22}$$

II.2.1.6.6 La loi normale :

C'est une loi continue à deux paramètres ; la valeur moyenne et l'écart type caractérise la dispersion autour de la valeur moyenne. Elle est la plus ancienne, utilisée pour décrire les phénomènes d'incertitudes sur les mesures, et ceux de fatigue des pièces mécaniques. [28]

Sa fonction de fiabilité est : [21]

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II.23})$$

Avec les paramètres de signification :

- ✓ μ : est la moyenne.
- ✓ σ : l'écart type.
- ✓ n : le nombre total d'individus dans l'échantillon.
- ✓ $n(x)$: le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x .
- ✓ e : est la base de l'exponentielle (2,718...).

II.2.1.6.7 Lois de Poisson : [21]

La loi de Poisson découverte au début du XIX ème siècle par le magistrat français Siméon-Denis Poisson s'applique souvent aux phénomènes accidentels où la probabilité p est très faible ($p < 0,05$).

Elle peut également dans certaines conditions être définie comme limite d'une loi binomiale. [21]

- ❖ Sa Fonction de fiabilité est

$$p(x = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (\text{II.24})$$

Avec les paramètres et significations :

- ✓ Un seul paramètre ' λ '
- ✓ e : est la base de l'exponentielle (2,718...)
- ✓ $n!$: est la factorielle de n .
- ✓ λ : le nombre moyen d'événement par unité de temps

II.2.1.6.8 Lois binomiale :

Décrite pour la première fois par Isaac Newton en 1676 et démontrée pour la première fois par le mathématicien suisse Jacob Bernoulli en 1713, la loi binomiale est l'une des distributions de probabilité les plus fréquemment rencontrées en statistique appliquée.

En mathématiques, une loi binomiale de paramètres n et p est une loi de probabilité qui correspond à une expérience aléatoire à deux issues possibles, généralement dénommées respectivement « succès » et « échec », la probabilité d'un succès étant p . [21]

❖ Sa fonction de probabilité est :

$$P[X = k] = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k} \quad (\text{II.25})$$

Avec : $0 \leq k \leq n ; 0 \leq p \leq 1$

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (\text{II.26})$$

❖ On en déduit la fonction de réparation :

$$F[k] = P[X \leq k] = \sum_{i=0}^k C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} \quad (\text{II.27})$$

Avec les paramètres de signification :

- ✓ $(n \geq 0)$: Nombre d'épreuves.
- ✓ $(0 \leq p \leq 1)$: probabilité de succès.

II.2.1.6.9 Lois de Weibull

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,..). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η et γ . [29]

II.2.1.6.9.1 Densité de probabilité $f(t)$:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.28})$$

Avec $t \geq \gamma$

Où :

- ✓ b est le paramètre de forme ($b > 0$)

- ✓ h est le paramètre d'échelle (h>0)
- ✓ g est le paramètre de position (g³ 0)

II.2.1.6.9.2 Fonction de répartition F(t) : [29]

$$F(t) = 1 - e^{\left(\frac{-t+\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{II.29}$$

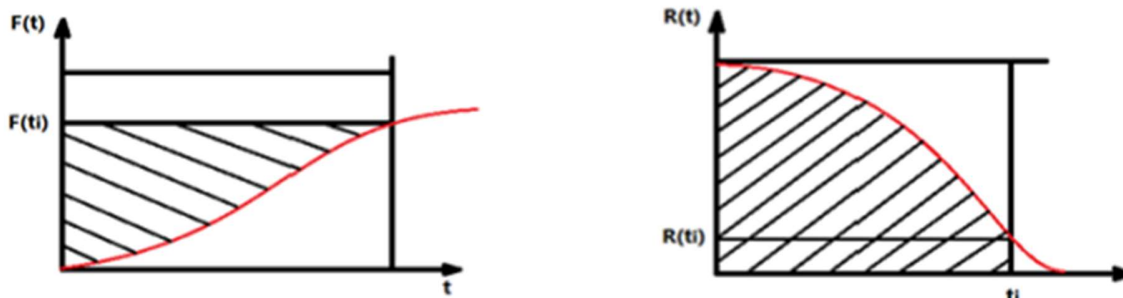


Figure II-7 Courbe de fiabilité et fonction de répartition. [29]

II.2.1.6.9.3 Fonction de fiabilité : [29]

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{\left(\frac{-t+\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{II.30}$$

❖ Probabilité complémentaire :

$$F(t) + R(t) = 1$$

$$\int_0^t f(t)d(t) + \int_0^\infty f(t)d(t) = 1$$

II.2.1.6.9.4 Taux de défaillance λ(t) :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \cdot \frac{1}{e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \tag{II.31}$$

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

avec $t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0$

Remarque :

Si ($\gamma = 0, \beta = 1$) :

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF} \tag{II.32}$$

II.2.1.6.9.5 Signification des paramètres du modèle de Weibull :

Paramètre de forme bêta (β) : Ce paramètre donne des indications sur le mode des défaillances et sur l'évolution du taux de défaillances dans le temps.

Les courbes suivantes illustrent respectivement l'évolution de la fiabilité, de la fonction de répartition et du taux de défaillance en fonction du paramètre de forme (β). [21]

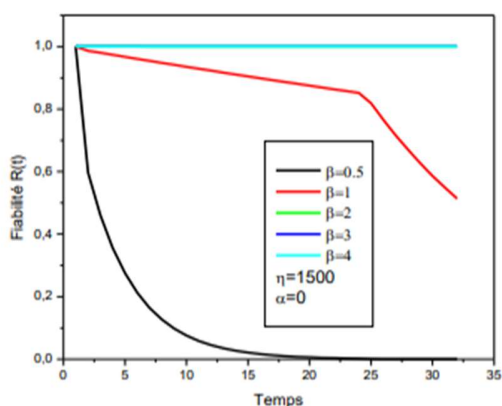


Figure II-8 Fiabilité.

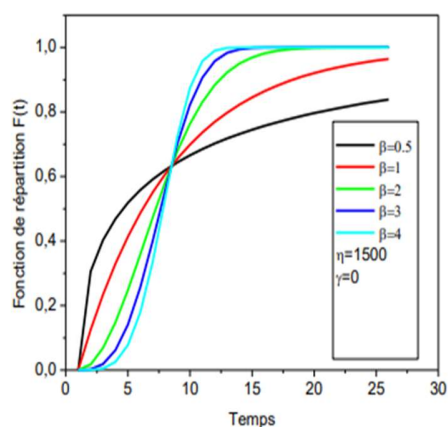


Figure II-9 Fonction de répartition.

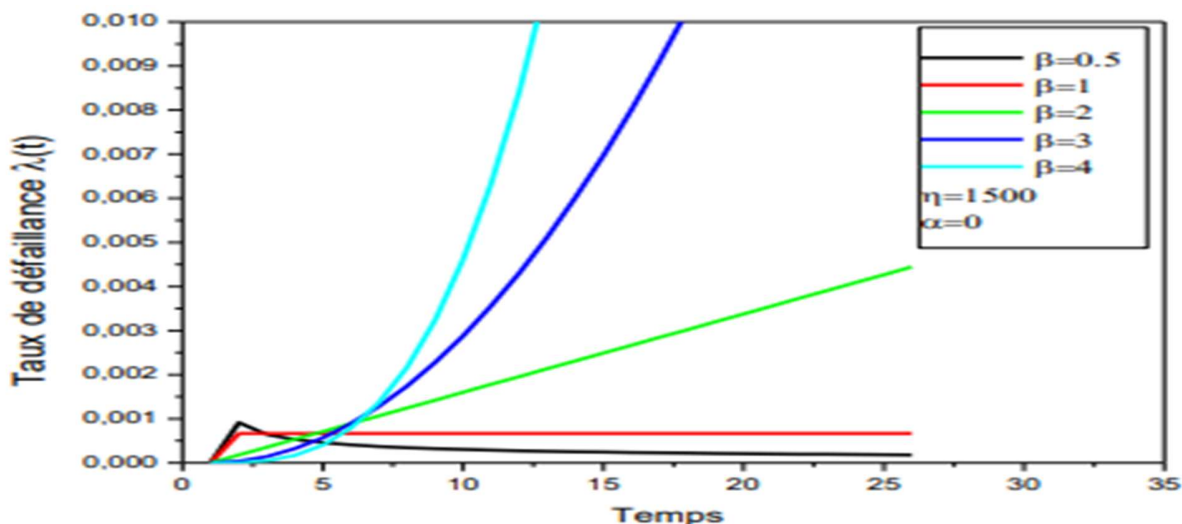


Figure II-10 Taux de défaillance [21]

L'allure générale des variations de la fonction $\lambda(t)$ d'un équipement le long de sa durée de vie est connue a priori : nous trouvons une courbe en forme de « baignoire ». Cette courbe (figure II-11) met en évidence trois périodes distinctes : la jeunesse, la maturité et la vieillesse de l'équipement, chaque période ayant ses types de défaillances propres... [30]

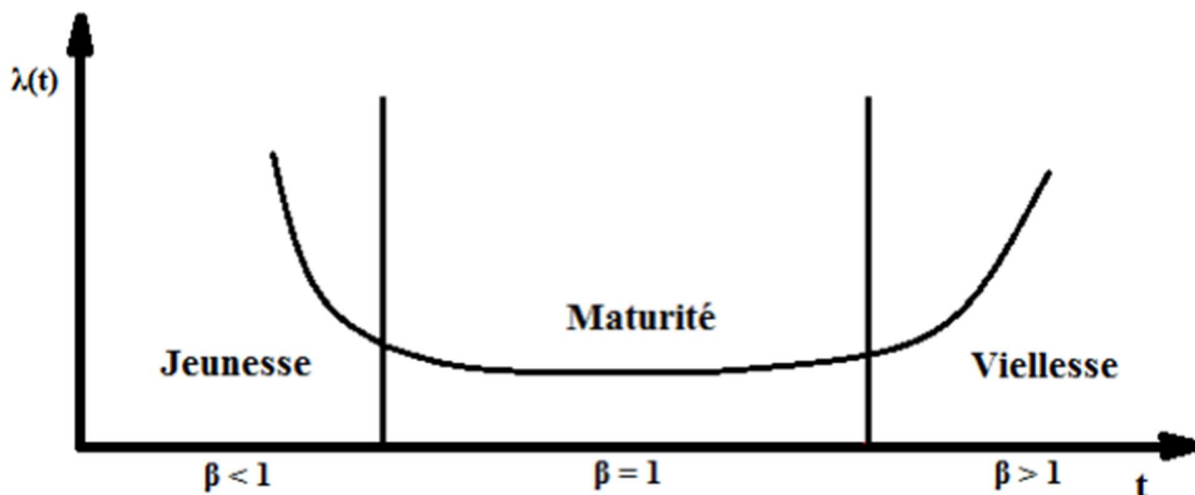


Figure II-11 Courbe en baignoire.

Pour un système comportant des technologies variées, la courbe $\lambda(t)$ peut être considérée comme une « ligne de tendance » résultante des différentes distributions des défaillances des composants. Cette courbe permet de séparer trois populations de défaillances de natures différentes, généralement classées en trois périodes successives :

Période de jeunesse, caractérisée par des défaillances « précoces » ;

Période de Maturité (vie utile), avec des défaillances aléatoires et un taux de défaillance sensiblement constant. Nous nommerons « hypothèse exponentielle » le fait de considérer λ constant sur la période de Maturité ;

Période de vieillesse ou d'usure, avec un taux de défaillance inexorablement croissant jusqu'à l'obsolescence ; [30]

A : Paramètre de forme (β) :

($\beta < 1$) Correspond à la zone décroissante de la courbe, c'est la période de mise en place dérogée de l'installation (période de jeunesse).

($\beta=1$) Correspondre à la zone ou le taux de défaillance est pratiquement constant, c'est la période de défaillance aléatoire qui ne présente généralement avec un symptôme de dégradation préalable (vie utile). C'est la période la plus longue.

($\beta > 1$) Correspondre à la zone croissante rapide, c'est la période de vieillesse provoqué par l'usure mécanique. [29]

B : Paramètre d'échelle $\hat{\eta}(\eta)$:

En unité qui est associée à l'échelle utilisé sur le graphe d'allions plait. [31]

C : Paramétré de position :

Il permet de déterminer la date du début de la défaillance ; son unité est celle du temps : [31]

Si :

$Y < 0$: les défaillances ont débuté avant l'origine du temps ;

$Y = 0$: les défaillances ont débuté dès l'origine du temps ;

$Y > 0$: il y a une survie totale entre $t=0$ et $t=Y$

II.2.1.6.9.6 Papier de Weibull :

Ce papier de Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une loi de Weibull dans le cas où le paramètre γ est nul.

En effet, la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres $\beta, \gamma = 0, \eta$ est définie par : [21]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.33})$$

$$\ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln\left(\frac{t}{\eta}\right)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta)$$

$$Y = \beta X - \beta \ln(\eta) \quad (\text{II.34})$$

- La dernière équation obtenue est l'équation d'une droite dans le repère rouge (O ; X ; Y) où O est le point correspondant à $X = 0$ et $Y = 0$ soit à $t = 1$ et $F(t) = 1 - 1/e$.
- Le paramètre se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique, ce qui est montré sur les figures III.2.a et III.2.b.
- Le paramètre est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation $X = -1$.

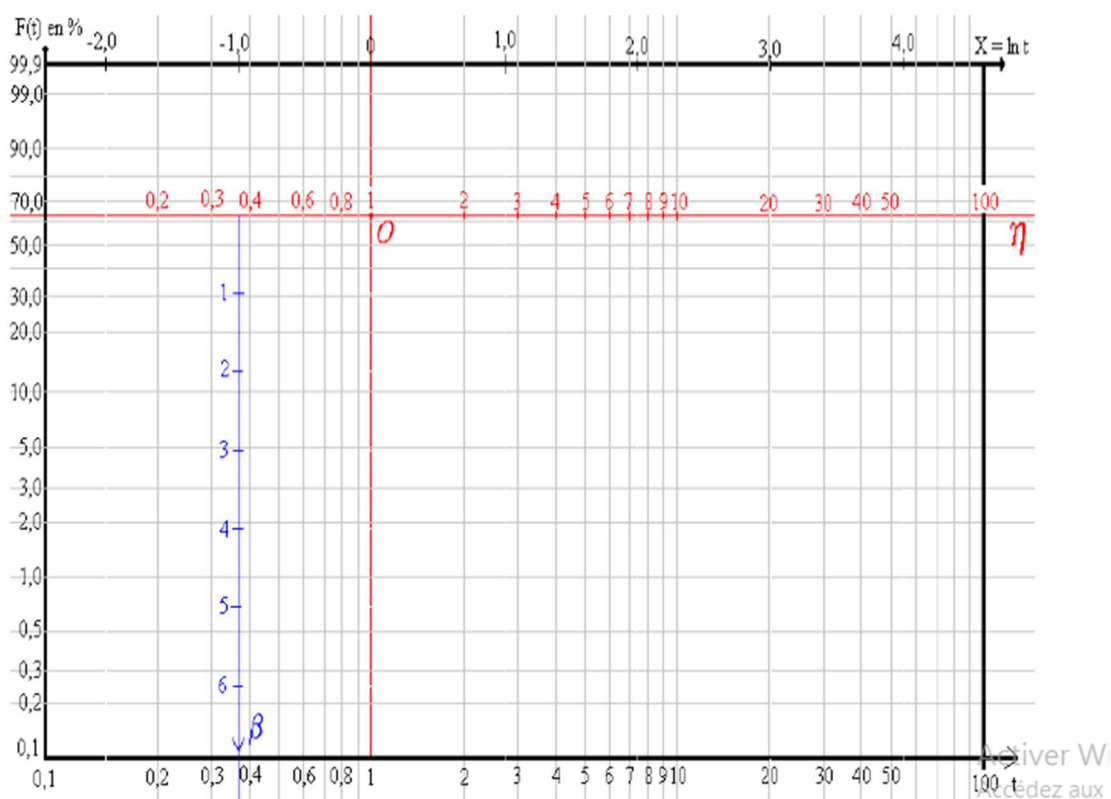


Figure II-12. Papier de Weibull.

Echelles utilisées sur le papier de Weibull : [30]

L'axe A est l'axe des temps sur lequel nous porterons les valeurs t_i de durées de bon fonctionnement ;

L'axe B porte $F(t)$ sur lequel nous porterons les valeurs $F(t)$ calculées par approximation (rangs moyens ou médians). Nous estimerons la fiabilité en prenant le complément :

$$R(t) = 1 - F(t) ;$$

- l'axe a correspond à $\ln t$.
- L'axe b correspond à $\ln \ln (1/1 - F(t))$. Cet axe permettra d'évaluer la valeur de β .

II.2.1.7. Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. [29]

- La loi exponentielle donne le temps d'attente avant un événement lorsque le processus est régi par une loi de Poisson. Dans le cas de la loi de Poisson la variable aléatoire était le nombre d'événements tandis que dans la loi exponentielle c'est le temps d'attente avant le premier événement. Il est à noter que le nombre d'événements est une variable discrète tandis que le temps d'attente est une variable aléatoire continue.

La variable aléatoire qui donne le temps d'attente avant la première apparition d'un phénomène de Poisson est une loi exponentielle de paramètre λ =temps moyen. [32]

- Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales.

II.2.1.7.1 La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ : [29]

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{II.35})$$

II.2.1.7.2 La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{II.36})$$

II.2.1.7.3 Le taux de défaillance est constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{II.37})$$

II.2.1.7.4 La durée de vie moyenne ou MTTF : [33]

La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) ou de bon fonctionnement (MTBF) un important estimateur de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes et se calcul par l'expression :

$$\text{MTTF} = \text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II.38})$$

- La Variance : $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$
- L'espérance : $E(t) = \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$
- L'écart type : $\sigma = \frac{1}{\lambda}$

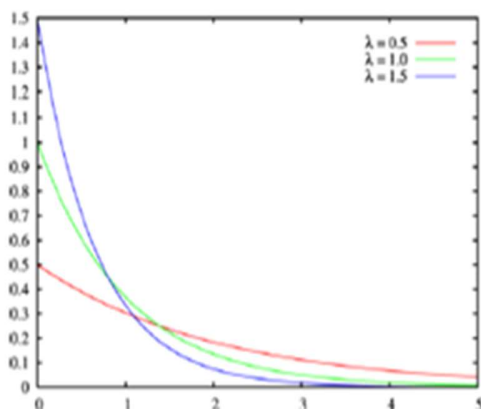


Figure II-13. Densité de probabilité.

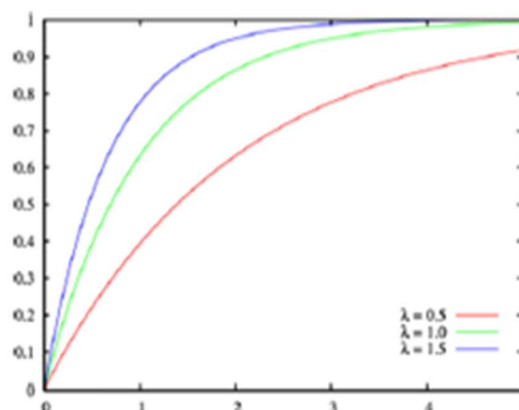


Figure II-14. Fonction de répartition.

- La distribution exponentielle s'applique aux systèmes opérants en continu (systèmes électroniques) c'est ce qu'on appelle distribution sans mémoire. Les systèmes complexes ont aussi un $\lambda(t)$ constant. [33]

II.2.2. Maintainabilité (Maintainability)

II.2.2.1. Définition

AFNOR norme X60-010 : « dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits » Il est possible de donner à la maintenabilité une définition probabiliste : « si la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions avec des moyens prescrits ».[28] La maintenabilité dépend essentiellement de l'accessibilité, de la facilité de démontage et de remontage des éléments constitutifs et de leur interchangeabilité d'un équipement.

L'indicateur essentiel de la maintenabilité d'un équipement est la MTTR (Mayen Time To Repaire)

Traduite par la (Moyenne des Temps Techniques de Réparation), la maintenabilité concerne donc le responsable de maintenance ou même titre que la fiabilité, tant pour le choix d'équipements nouveaux que pour l'amélioration éventuelle l'équipement existant. [19]

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque** : c'est-à-dire « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges comprenant des critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).
- **La maintenabilité prévisionnelle** : est également « construite », mais à partir d'objectifs de disponibilité. [21]
- **La maintenabilité opérationnelle** : mesurée à partir des historiques d'interventions. Une « analyse de maintenabilité » permettra d'évaluer la *MTTR* ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité, à l'identique des analyses de fiabilité. [30]

II.2.2.2. Approche mathématique de la maintenabilité :

II.2.2.2.1 Fonctions mathématiques caractéristiques : [30]

- **Variable aléatoire** : c'est la durée d'une intervention préventive ou corrective de maintenance. Nous la noterons $t = TTR$ (temps technique de réparation), de moyenne *MTTR*.
- **La densité de probabilité** : c'est $g(t)$. Par nature, la distribution des durées d'intervention sera dissymétrique ainsi que nous l'expliquerons au paragraphe 6.2.2. Les lois de probabilité ajustables à cette dissymétrie seront la loi log-normale, la loi gamma et la loi LVE des valeurs extrêmes (sous sa forme 1 nommée loi de Gumbel).
- **La fonction de répartition** : c'est $M(t)$. Elle exprime la probabilité qu'une intervention ait une durée $TTR < t$, ou que le système en panne à $t = 0$ soit rétabli à t : $M(t) = \int_0^t g(t) dt = \text{Prob}(TTR < t)$

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t u(t) dt} \quad (\text{II.39})$$

Durée d'intervention moyenne *MTTR* : Exprimer par : $MTTR = \int_0^t g(t) dt$

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation : [26]

$$MTTR = \frac{\Sigma \text{Temps d'intervention pour } n \text{ panne}}{\text{Nombre des pannes}} \quad (\text{II.40})$$

- **Taux de réparation $u(t)$** : On appelle taux de réparation $u(t)$ d'un système réparable au temps t la probabilité que l'entité soit réparée entre t et $t + dt$ sachant qu'elle n'était pas réparée sur l'intervalle $[0, t]$.

Elle se note :

$$u(t) = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{II.41})$$

Et le Taux de réparation instantané est généralement exprimé par :

$$u(t) = \frac{1}{1-M(t)} * \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{II.42})$$

- **Hypothèse exponentielle** : Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle, signifiant ici que le taux de réparation μ est supposé constant. La répartition des temps de réparation est alors exponentielle, selon la formule :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{II.43})$$

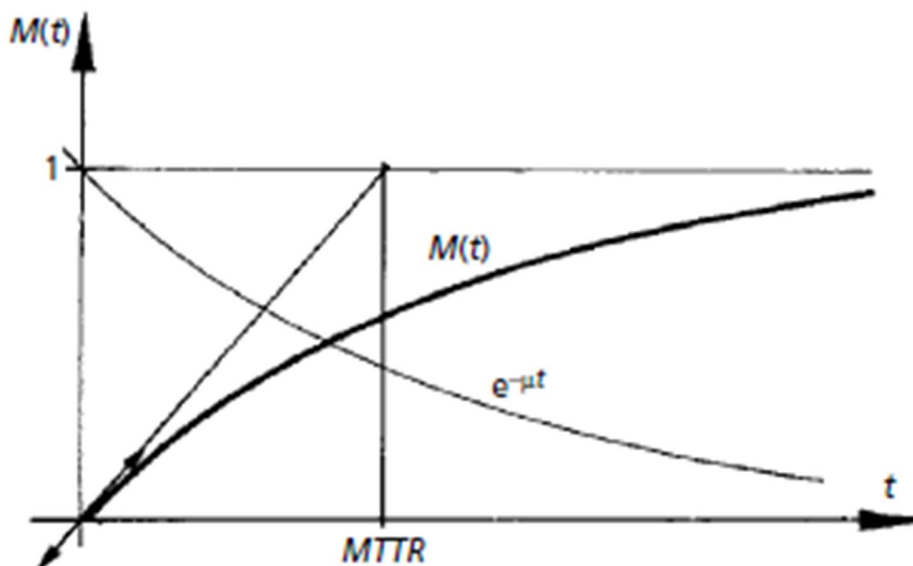


Figure II-15. Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle.

- ❖ Espérance mathématique :

$$E(t) = MTTR = \tau = \frac{1}{\mu} \quad (\text{II.44})$$

II.2.2.3. Indicateurs opérationnels :

La figure ci-dessous schématise les états successifs que peut prendre un système réparable : [21]

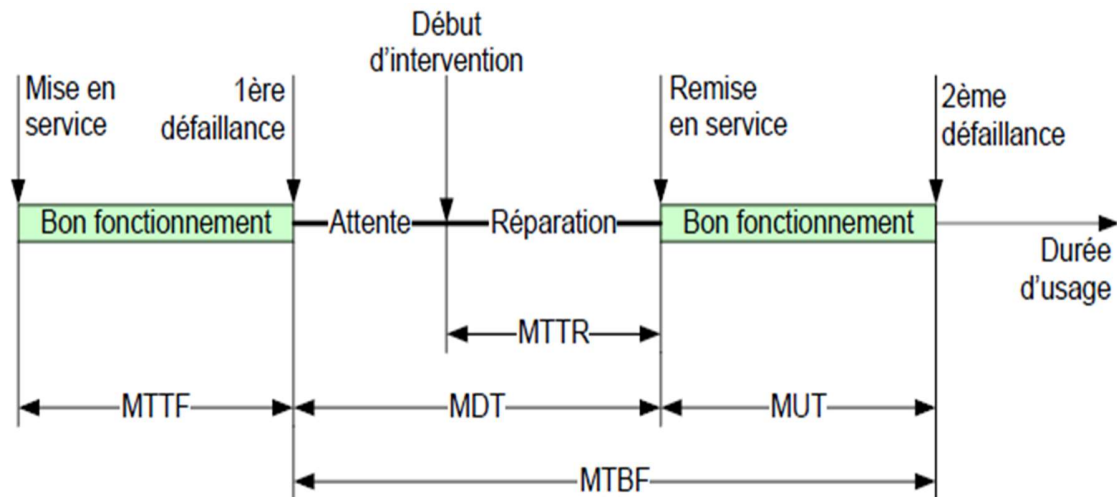


Figure II-16. Les durées caractéristiques de FMD.

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (*TBF*) auxquelles on fait correspondre des moyennes (*MTBF*) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes : [30]

- ✓ MTTF : temps moyen avant-première défaillance ;
- ✓ MDT ou MTI : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;
- ✓ MUT : temps moyen de disponibilité ;
- ✓ MTTR : temps moyen de réparation.

II.2.2.4. Amélioration de la maintenabilité :

- Le développant des documents d'aide à l'intervention
- L'aptitude de la machine au démontage (modification, risquant de coûter chère).
- L'accessibilité.
- L'interchangeabilité et la standardisation.
- La facilité de remplacement.

➤ L'aide au diagnostic

Il assurera de ce fait la réduction des durées de détection des pannes d'état, diminuant, ainsi les TTR l'amélioration de la maintenabilité d'une manière considérable.

La maintenance doit améliorer la maintenabilité par les actions suivantes :

1. Disponibilité de la documentation tenue à jour du matériel.
2. Utilisation des systèmes d'aide au diagnostic
3. Utilisation des capteurs intégrés pour la localisation de la panne
4. Disponibilité des accessoires outillages. [26]

II.2.3. La Disponibilité (Availability)

II.2.3.1. Définition

Selon la norme AFNOR X60 – 500, on peut définir la disponibilité comme aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un Intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée. [26]

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production,
- Être rapidement remis en état s'il est défaillant.

II.2.3.2. Différents niveaux de la disponibilité :

II.2.3.2.1 Disponibilité intrinsèque :

Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes des temps de bon fonctionnement et les moyennes de réparations, ce qui donne : [24]

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (II.45)$$

II.2.3.2.2 Disponibilité opérationnelle :

Pour cette mesure, sont pris en compte les temps logistiques, ce qui donne : [31]

$$Do = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR+MTL} \quad (II.46)$$

Avec :

MTL : moyenne des temps logistiques

II.2.3.2.3 Disponibilité moyenne :

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut-être évalué par les rapports

Suivants : [26]

$$Dm = \frac{TCBF}{MCBF+TCI} \quad (\text{II.47})$$

Avec :

TCI : Temps cumulé d'immobilisation

II.2.3.2.4 Disponibilité asymptotique :

Lorsque λ et μ sont indépendants de temps et quand (t) devient grand, on constate que D (t) tend vers une valeur constante. Cette valeur est souvent dénommée disponibilité asymptotique et se note $A\alpha$ est égale à : [26]

$$A \alpha = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (\text{II.48})$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{II.49})$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{II.50})$$

II.2.3.2.5 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 : [26]

$$D(t) = \frac{\mu}{(\mu + \lambda)} + \frac{\lambda}{(\mu + \lambda)} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (\text{II.51})$$

II.2.3.3. Amélioration de la disponibilité :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- La réduction de la MTTR (action sur la maintenabilité).
- Fiabilité.
- Maintenabilité.

➤ Logistique. [24]

II.2.3.4. La relation entre les notions FMD :

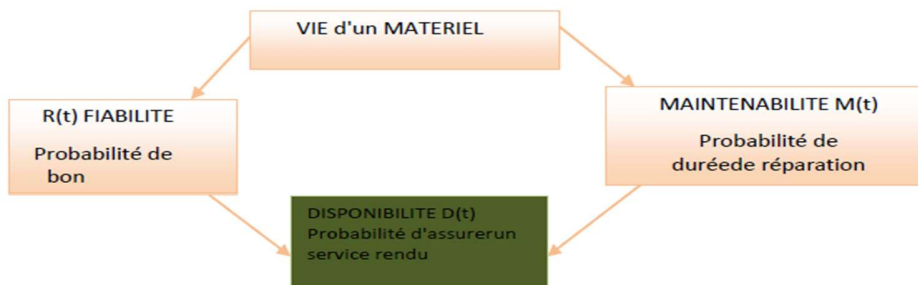


Figure II-17. La relation entre les notions FMD. [24]

Pour qu'un matériel soit disponible il faut s'assurer que sa fiabilité est optimum et qu'il est aussi maintenable.

II.3. conclusion

Le concept de FMD vise à garantir que les équipements fonctionnent de manière fiable, qu'ils peuvent être entretenus efficacement pour éviter les pannes, et qu'ils sont disponibles lorsque nécessaire.

La fiabilité fait référence à la capacité d'un équipement à fonctionner correctement sans panne pendant une certaine période de temps. La maintenabilité se réfère à la facilité avec laquelle un équipement peut être maintenu, réparé ou remplacé en cas de panne. Enfin, la disponibilité concerne le fait que l'équipement soit opérationnel et prêt à être utilisé quand cela est nécessaire. En combinant ces trois aspects, il est possible d'optimiser le fonctionnement des équipements et d'assurer leur fiabilité à long terme. Cela passe notamment par la mise en place d'un plan de maintenance préventive pour détecter et résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des pannes.

En conclusion, les méthodes FMD est un outil essentiel pour garantir le bon fonctionnement des équipements industriels et pour optimiser leur performance. Elle permet de maximiser la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité, et ainsi d'assurer la pérennité des activités industrielles.

Chapitre III. Présentation de SPE (SONELGAZ)

III.1. Présentation de SPE (SONELGAZ)

III.1.1. Sonelgaz, un opérateur historique

A sa création, en 1969, SONELGAZ, la Société Nationale de l'électricité et du Gaz, dans le cadre de la mission que lui ont confié les pouvoirs publics, dispose du monopole de la production, du transport, de la distribution, de l'énergie électrique sur le territoire algérien. En 1991, il obtient le statut d'Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC), et devient une société par actions, dans un contexte d'ouverture totale du secteur à la concurrence.

III.1.2. Description de la Centrale M'sila :

La centrale thermique de M'sila a été mise en exploitation en 1981 avec 22 groupes de puissance 23MW chacun, il en reste que 02 groupes (M'sila1) elle a subi une 1ere extension de 03 groupes de puissance 100MW chacun (M'sila2), il y aura une 2eme extension de 02 groupes géants de puissance 215 MW chacun (M'sila3) ; 04 groupes de 25Mw TG mobiles (M'sila04).

La centrale de production d'électricité de M'sila se trouve à 8 Km environ à l'ouest de la ville de M'sila.

Elle comporte 02 groupes de turbines à gaz de puissance de 23 MW chacun, de 03 groupes de puissance de 100 MW chacun, 02Groupe de 215 MW chacun et 04 groupes mobiles de 25Mw, ce qui totalise en moyenne une puissance de 876 MW.



Figure III-1 SPE Centrale de M'sila.

La centrale est partagée en deux parties :

- Un groupement de 02 turboalternateurs de type 5001P appelé M'sila I, ces groupes peuvent fonctionner soit au gaz soit au fuel.
- Un groupement de 03 turboalternateurs de type 9001E appelé M'sila II, fonctionnant seulement au gaz.
- 02 Turbines à gaz « ANSALDO – (une société Italienne) model V94.3A.4 » et leurs Auxiliaires.
- 04 Turbines à mobiles générale électrique de 25 mW.

III.2. Personnel

Le personnel de la centrale de M'sila est composé de :

- 53 Cadres
- 77 Agents Maîtrises
- 40 Agents Exécution

III.3. Description des structures des services

Directeur de centrale

Sectaire la direction

La division Production

- Service quart de production
- Service contrôle économique
- Service diagnostique machine
- Service réalisation

La division technique

- Service appro et stock
- Service étude et préparation
- Service intervention

Autres services

- Service Ressources Humaines
- Subdivision Moyens
- Subdivision Finances et Comptabilité.

III.4. Division production

Service quart

Pour le fonctionnement et le contrôle des groupes turbine à gaz il y a quatre équipes qui travaillent en alternance.

Les heures de travail d'une journée sont divisées sur trois équipes

- Equipes du matin travaille de 06 h à 13 h 00
- Equipes de la nuit travaille de 13h à 20 h 00
- Equipes de l'après-midi travaille de 20 h a 06 h 00

Chaque équipe travail quatre jours la nuit, quatre jours après midi, quatre jours le matin , et se repose quatre jours .

L'effectif de la structure est composé de

- Un chef de quart
- Un ingénieur de production
- Un adjoint chef de quart
- Trois chefs de bloc
- Cinq rondiers

Attributions

- Relevé des paramètres de fonctionnements
- Exploitation des différents organes de turbine à gaz
- Disjoncteur
- Transformateur
- Consignation et déconsignation
- Établie les messages d'exploitation
- Consignation BT – HT
- Analyse des anomalies
- Analyse des paramètres des groupes
- Consignation des anomalies

III.4.1. Le service Diagnostic Machine

Pour le maintien des groupes en bon état, le rôle de la subdivision diagnostic machine est l'intervention a fin de croitre la sécurité des personnes et éviter les intervention d'urgence ou L'indisponibilité des groupes dans des temps indésirables.

L'effectif de la structure est composé de :

- Chef de service
- 02 TPCE (technicien principal contrôle et Essai)
- 02 TPCE (technicien contrôle et Essai)
- 01 TP Chimiste

Attributions

- Détermination des points chauds des connexions transformateurs TP
- Relevé des paramètres de fonctionnement des groupes.
- Mesure et analyse des vibration (des paliers, pompes .de graissage, moteurs de lancement du moteur de virage)
- Les huiles isolantes et lubrifiantes subissent des modifications dues aux conditions d'utilisation ces modifications peuvent perturber le fonctionnement des ouvrages.
- La surveillance des huiles consiste en contrôles périodiques des différentes caractéristiques des huiles.
- Cette surveillance se fait par un technicien chimiste qui fait en plus l'analyse de refroidissement et d'eau la chaudière

III.4.2. Service Réalisation

Le service réalisation assure la maintenue systématique conditionnelle et curative des équipements Le service réalisation est à assurer toutes les opérations de maintenance dans le domaine électrique, elle comporte trois sections

Section régulation

- Le rôle de cette section est
- Le contrôle et l'intervention cotée turbine (protection, régulation)
- L'augmentation de la température.
- Absence de flamme.
- Régulation débit gaz.

Section électromécanique

- La section électromécanique : le rôle de cette section est :
- Installation des moteurs électriques.
- L'éclairage
- Réparation des cartes (circuits) de commande des moteurs
- L'entretien de disjoncteurs T P

Section automatés

- Le rôle de cette section est
- Le contrôle et l'intervention coté alternateur (protection, régulation)
- Excitation, auto excitation alternateur
- Déséquilibre.
- Surtension, surintensité.
- L'augmentation de la température.
- Retour d'énergie.

III.4.3. Service Contrôle Economique

Le service Contrôle Economique(C/E) est composé de :

- Un Chef de Service
- Deux (02) Technicien principaux C/E
- Deux (02) Technicien C/E

Les taches de structure

Suivi des performances des groupes de la Centrale (suivi rigoureux de la Consommation spécifique)

Où : Consommation Spécifique (Th / KWh) = Chaleur consommée (Th) / Energie produite (KWh)

- ❖ **Chaleur consommée (Th)** = Débit gaz (Nm³/h) x PCS (Th/ m³)
- **Débit gaz** (Nm³/h) - C'est le débit gaz consommé par le groupe pendant 1 h
- **PCS** – Pouvoir calorifique supérieur dépendant des caractéristiques du gaz
- **Energie produite (KWh)** = Puissance ou énergie du groupe pendant 1h

L'amélioration de la consommation spécifique que devra obligatoirement tenir compte du suivi des :

- Compteur gaz
- Compteur d'énergie

Un programme mensuelle établi et les essais des groupes de la centrale sont alors réalisé - un rapport des essais est établi mensuellement

- Les valeurs de la consommation spécifique calculées sont alors comparées au contrat de gestion de la centrale et les différences sont alors analyses et des remèdes seront apportés pour ainsi améliorer les performances des groupes.
- Suivi des compteurs gaz
- Suivi des compteurs énergie
- Un suivi des paramètres des groupes est réalisé
- Des essais de puissance Max sont élaboré pour ainsi déterminer la puissance maximale des groupes corriger celle-ci en fonction de la température et élaborer la carte des puissances des groupes.
- Des essais de performances à différents paliers de charge (25 % ,50%, 75 %,100% et pointe sont réalisés annuellement sur chaque groupe.
- La structure contrôle Economique assure le suivi environnemental des groupes : (l'analyse de fumé du gaz échappement.)
- Mensuellement un rapport des essais est établi

III.5. Division Technique

Comme toute installation de production d'énergie électrique équipée de machines tournantes, de rôle du service maintenance est d'assurer le maximum de disponibilité des groupes pour les activités de production.

L'organisation du service maintenance basé sur :

Structure de la gestion maintenance statistique

Des structures sont liées au chef service maintenance.

III.5.1. Service Etudes et Préparation

Le chef de service études et préparation est chargé d'animer, de coordonner et de contrôler la préparation de la maintenance mécanique, électrique et régulation automate.

Ingénieur D'études mécanique**Attributions**

- Mener des études de modification et de rénovation liées à la partie mécanique des équipements
- Mettre à jour les schémas des organes mécaniques
- Superviser les travaux d'intervention
- Préparer les matériels pour travaux
- Préparer la documentation technique
- Préparer les inspections
- Gérer pour chaque pièce mécanique ; les dossiers matériels, les gammes types de visites et l'historique des interventions
- Etablir les cahiers des charges et Prévoir la pièce de sécurité

Etablir et traiter les demandes matérielles

- Analyser et expertiser les incidents
- Superviser la réalisation des études de modification et de rénovation
- Veiller à la disponibilité des pièces mécaniques
- Veiller a la disponibilité des outillages
- Veiller à l'application des consignes de sécurité
- Tenir un fichier de fournisseur
- Veiller à l'application de la nomenclature de la base de donne de la pièce de sécurité

L'ingénieur D'études Electrique**Attributions**

- Mener des études de modification et de rénovation liées à la partie électrique des équipements
- Mettre à jour les schémas des organes électriques
- Superviser les travaux d'intervention
- Préparer les matériels pour travaux
- Préparer la documentation technique
- Préparer les inspections
- Gérer pour chaque pièce électrique ; les dossiers matériels, les gammes types de visites et l'historique des interventions

- Etablir les cahiers des charges
- Prévoir la pièce de sécurité
- Etablir et traiter les demandes matérielles
- Analyser et expertiser les incidents
- Superviser la réalisation des études de modification et de rénovation
- Veiller à la disponibilité des pièces électriques
- Veiller à la disponibilité des outillages
- Veiller à l'application des consignes de sécurité
- Tenir un fichier de fournisseur
- Veiller à l'application de la nomenclature de la base de données de la pièce de sécurité

L'ingénieur D'études Régulation Automates

Attributions

- Mener des études de modification et de rénovation liées à la partie à l'automatisme
- Mettre à jour les schémas des organes de régulation
- Superviser les travaux d'intervention
- Préparer les matériels pour travaux, la documentation technique et les inspections
- Gérer pour chaque organe de régulation ; les dossiers matériels, les gammes types de visites et l'historique des interventions
- Etablir les cahiers des charges
- Prévoir la pièce de sécurité
- Etablir et traiter les demandes matérielles
- Analyser et expertiser les incidents
- Superviser la réalisation des études de modification et de rénovation
- Veiller à la disponibilité des pièces de régulation et des outillages
- Tenir un fichier de fournisseur
- Veiller à l'application de la nomenclature de la base de données de la pièce de sécurité

L'ingénieur D'études Gestion maintenance et Statistique GMAO

L'ingénieur d'études gestion de maintenance et statistique est chargé de la gestion de maintenance assisté par ordinateur

Attributions

- Veiller à la disponibilité, la fiabilité du système GMAO
- Chargé de la supervision du logiciel COSWIN
- Analyser les statistiques de la maintenance et gestion de la documentation
- Planifier et Programmer les interventions de gros entretien (révisions) à long terme
- Veiller à l'application des consignes du constructeur et tableau de bord du groupement
- Participer à la réalisation des études de modification et de rénovation
- Etablir et traiter les demandes matérielles et établir les cahiers charges
- Valider les gammes systématiques

Technicien Principal Méthode Maintenance :

Le technicien principale méthode maintenance est chargé de la préparation de l'analyse du lancement et du contrôle de l'exécution de tous types des travaux d'entretien ainsi la planification des interventions de gros entretien (révisions)

Attributions

- Collationner et évaluer les travaux d'entretien à effectuer
- Elaborer les programmes annuels des travaux de gros entretien
- Suivre les heures de marche des turbines en vue de programmer les visites
- Préparer les dossiers d'ordonnancement travaux (DT Gamme de visite systématique ; plans,)
- Tenir à jour les dossiers historiques et les rapports de visite
- Programmer et lancer quotidiennement les travaux
- Etablir les rapports : hebdomadaire, mensuel, trimestriel et annuel de la maintenance

Agent Gestion Principal Documentation

L'agent de gestion documentation est chargé de la tenue et la conservation de la documentation technique et l'archive de sa structure

Attributions

- Effectuer les enregistrements des entrées et sorties des documents.
- Récupérer et recenser tous les volumes existants dans les différentes structures.
- Classer les catalogues par type d'équipement.
- Veiller à la disponibilité, la fiabilité du logiciel GEIDE.
- Participer à la purge annuelle des archives.
- Participer à la destruction physique des documents.

- Veiller à la consigne de sécurité, spécifiques aux salles d'archive.

III.6. Service Approvisionnement Stock et Crédit

Assure les opérations d'approvisionnement selon l'ensemble des besoins de la centrale du matériel.

Missions : structures faire les besoins exprimés pour les différentes structures d'unité.

Les besoins exprimés la structure demandée est établir un DM (demande d'achats et de travaux) et précise les points suivants :

- Précisée (Désignation, référence et quantité ...)
 - Imputation
 - DM Signée par le Directeur d'unité.
 - Procédure d'achats
 - Achat (fournisseurs locaux)
 - Achat (fournisseurs étrangers)
1. Achat : Achat dans le montant est inférieur ou égale à 100.000 DA où pour faire un achat sur la base d'une facture préformât. Présentation d'une facture préformât établissement d'un bon de commande et réception du matériel.
 2. Achats dans le montant supérieur à 500 000.00 DA et inférieur ou égal à 1000 000 DA il faut faire une prospection (consultation de fournisseur au moins (05) fournisseur) L'achat doit être fait sur la base du moins disant
 3. Achat dans le montant du 300000.00 et 500000.00 Il passe soit sur une consultation restreinte, soit sur la base d'un appel d'offre, soit au gré à gré.

En cas de consultation restreinte il faut demander dérogation, est le lancer la consultation après l'accord du PDG SPE.

Le fournisseur est l'unique en transmettre la facture du matériel soit il est constructeur lui-même. Une demande de dérogation pour le gré à gré sera transmise au PDG /SPE

Après l'accord obtenu l'achat se fait chez le seul fournisseur direct.

L'effectif de la structure est composé de

- Un chef service APPROS
- Un Chargé d'études
- Un technicien principal achat

- Un technicien acheteur
- Un acheteur
- Un chef de section gestion de stocks
- Agent de gestion de stock
- Un magasinier principal
- Deux magasiniers

Attributions

Détient le stockage dans les endroits bien protégés avec des codifications et référence établissement d'un bilan annuel de la centrale avec justifications de l'ensemble des dépenses sur le crédit.

Gère les opérations de stock.

Assure les opérations d'inventaire de chaque année.

Lancer les appels d'offres.

Gère les opérations de suivi du crédit de l'exercice.

III.7. Service Ressource Humaines

Le service ressources humaines est chargé de l'administration et la gestion du personnel

La gestion de RH est un ensemble de fonction et de mesures dont l'objectif est de mobiliser et développer la capacité du personnel d'entreprise afin d'obtenir de ce dernier une plus grande efficacité et une meilleur productive

Personnel –principal)

Attributions

- Traitement des dossiers et la paie
- Traitement de la paie
- Gestion de formation et perfectionnement du personnel
- Gestion de la fiche information qui contient toutes les informations sur le personnel par le système GIP
- Le système d'information se compose de
- Le fishier du personnel
- Un module de gestion

- Dans un fichier du personnel on trouve
- Les données concernant l'agent.
- Les données concernant les personnes de la famille de l'agent vivant à sa charge.
- Historique des formations suivis par l'agent.

La conception des quatre fichiers sera effectuée au ensemble de données concernant les éléments de paye, les accidents de travail etc.

Le module de gestion il permet de réaliser certaines fonctions telles que la gestion des données sur le personnel, l'analyse et l'exploitation de ces données pour

L'effectif de la structure est composé de

- Un chef service
- Deux chargés d'études
- Deux AGPP (agents gestion personnel –principal)

III.8. Les Subdivision Finance et Comptabilité

La finance et comptabilité est une technique de gestion normalisée qui consiste à saisir et mouvements affectant l'exploitation ou la structure d'une entreprise et résultant soit de son activité interne, soit de ses relations avec l'extérieur.

L'effectif de la structure est composé de

- Un chef subdivision finances et comptabilité
- Un chargé d'étude
- Un comptable principal
- Un comptable
- Un agent gestion règlement
- Un caissier

Attributions

Travaux de Contrôle et de Coordination

- Répartition des tâches et coordination de l'activité de la structure
- Vérification de la réalisation des programmes des individus
- Opération de contrôle réglementaire des documents préalablement à leur règlement
- Assistance des agents dans les opérations quotidiennes

- Assurer les liaisons avec le chef de l'unité et les services du siège
- Participation à l'ensemble des réunions au niveau de l'unité

Attributions de comptabilité

- Vérification, affectation et comptabilisation divers documents comptables
- Saisie sur SAP des différentes pièces
- Contrôle et envoi à SPE /C et SPE/F
- Rapprochement bancaire et CCP.
- Classement et archive des divers documents
- Journées de la caisse.
- Dossier facture
- Paie permanent.
- Avis de débit (frais BNA)
- Déclaration C. N.A.S (charges sociales)
- Traitement des mouvements du mois des huiles et la pièce de sécurité
- Traitement de la relève mensuel des consommations de carburant.

Travaux de trésorerie

- Diverses demandes d'accréditif « A » et « P »
- Etablissement divers TMF (paiement et encaissement »
- Etablissement diverses situations de trésorerie
- Justification des comptes de trésorerie.

Attributions de la caisse

- Vérification des diverses pièces
- Opérer les règlements
- Arrêt quotidien de la caisse
- Etablissement diverses situations

Sécurité industrielle

La sécurité du personnel et du matériel prend une grande importance, en raison des activités des industries électriques et gazières. La structure sécurité veille à la sécurité du personnel et du matériel en prenant toutes les mesures nécessaires pour l'application des prescriptions d'hygiène et sécurité du personnel en conformité avec la législation et la réglementation en vigueur.

L'effectif de la structure est composé de

- Un ingénieur sécurité
- Un attaché sécurité

Attributions ingénieur sécurité

- Coordonne et suit les travaux des attachés ou techniciens de sécurité relevant de sa direction.
- Etablit au niveau de la direction les consignes générales et particulières de sécurité, puis les diffuse et informe les services concernés.
- Collabore à la conception des systèmes de protection et de lutte contre l'incendie.
- Participe au choix du matériel de sécurité.
- Entreprit des études de sécurité analyse les statistiques des accidents et des CHS.
- Suit la mise en œuvre des décisions de la CHS

Attributions Attaché sécurité

- Assiste et conseille la hiérarchie en matière de Prévention et Sécurité.
- Etablit le programme annuel d'activité de la fonction sécurité de son unité
- Doit s'assurer du respect et de l'application des règles et consignes de sécurité préétablies.
- Collabore à l'établissement du programme de fonctionnement de la CHS/ U

Attributions technicien sécurité

- Reçoit les instructions de sa hiérarchie
- Assiste sa hiérarchie en matière de prévention et sécurité
- Animer les séances de secourisme, prévention incendie manutention et de sécurité technique.

III.9. Subdivision Moyens

Le rôle de la subdivision moyens est d'assurer un meilleur suivi et gestion des moyens internes au niveau de la centrale elle est composée de

L'effectif de la structure est composé de

- Un chef de subdivision
- Deux agents gestion Moyens
- Un standardiste
- Un infirmier

- Un chef de groupe parc (Chauffeurs VL, PL, mécanicien autos convoyeur)

Attributions

- Le rôle des moyens est suivi tous les besoins de l'entreprise dans
- Fourniture de bureau
- Réparation des matériels d'administration
- Entretien de la centrale
- Suivi et gestion du parc auto
- Gestion des moyens en utilisant le logiciel SAP (gestion des fichiers centrale et fichier auxiliaire)
- Transport du personnel
- Les demandes de prise en charge
- L'alimentation de la centrale en eau potable
- Le rôle de l'infirmier est l'intervention préliminaire en cas d'accident de travail

L'élaboration de cette partie du rapport a pour principale source les différents enseignements tirés de la pratique journalière, les nombreux entretiens que j'ai pu avoir avec les employés des différents services de la société m'ont permis de donner une cohérence à cette partie rapport.

**Chapitre IV. Application
de l'analyse FMD sur le
système
électromécanique choisi**

IV.1. Introduction :

L'application de la maintenance au sein d'une entreprise de production est un exercice difficile, tout comme il est toujours compliqué de faire simple dans un environnement complexe. Le dernier chapitre de notre étude vise à surmonter ce défi. Nous avons analysé l'historique des pannes du turbo-alternateur pour mener une étude statistique approfondie des indicateurs de Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité (FMD) de cette machine. Cette analyse comprend la collecte et l'examen détaillé des données de pannes, la détermination des causes et des fréquences de ces pannes, et le calcul des trois indicateurs FMD. Grâce à cette approche, nous espérons identifier les points faibles du système et proposer des améliorations concrètes pour optimiser les performances de la maintenance et, par conséquent, de la production.

IV.2. Choix du système

Dans notre travail, nous avons choisi d'étudier le groupe turbo-alternateur (TG 01) au sein de l'entreprise SPE de M'sila, où nous avons effectué notre stage. Ce choix s'explique par l'importance cruciale de ce système dans le fonctionnement global de l'entreprise. Pour évaluer le niveau de sûreté de fonctionnement, incluant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de ce système, il est essentiel de recueillir et d'analyser son historique de pannes. Cette analyse nous permettra de comprendre les causes et les fréquences des défaillances, afin de proposer des améliorations et d'optimiser la maintenance de ce groupe turbo-alternateur.

IV.3. L'historique des pannes du groupe TG01 :

Le traitement des données brutes de l'historique des pannes (pendant 4 ans) classées dans le Tableau IV.1 comprend les étapes suivantes :

- Le calcul des heures de bon fonctionnement (TBF) qui résultent des différences entre deux pannes successives.
- Le calcul des heures techniques de réparation (TTR).

N	Cause	Date de début (la panne)	Date de fin (La panne)	TBF (heurs)	TTR (Heurs)
1	Réparation générale	01/01/2017	01/01/2018	6938	428
2	Réparation générale	01/01/2018	01/01/2019	6588	409
3	Réparation générale	01/01/2019	01/01/2020	5685	367,75
4	Révision générale (travaux non terminé)	22/04/2020	01/07/2020	192	552
5	IC (inspection combustion)	12/04/2021	16/04/2021	6840	32
6	IC + Réparation chambre de combustion	31/10/2022	10/12/2022	13488	328
7	IC approfondi et chargement brulleur N 07	16/09/2023	21/09/2023	6696	56
8	HGPI (Hot Gaz Path Inspection) + RG alternateur	31/12/2023	09/02/2024	2400	320

Tableau 2. Historique des pannes de groupe turbo-alternateur (TG01).

Le (tableau 2) présente un enregistrement détaillé des incidents techniques survenus sur le groupe turbo-alternateur TG01 au fil du temps. L'objectif de ce tableau est de fournir une base de données historique des pannes qui peut être analysée pour évaluer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité du groupe turbo-alternateur. En analysant ces données, on peut identifier des tendances, des points faibles dans le système et des opportunités d'amélioration pour prévenir de futures pannes et optimiser la maintenance.

IV.4. L'analyse FMD

IV.4.1. Fiabilité

IV.4.1.1. Calcul des paramètres de la loi de Weibull

Le tableau suivant présente les temps de bon fonctionnement (TBF) du groupe turbo-alternateur classés par ordre croissant. Les valeurs de la fonction de répartition théorique $F(i)$ sont calculées en utilisant la méthode des ranges médians. La formule appliquée est :

$$F(t) = \frac{Ni - 0.3}{N + 0.4} \quad (\text{Dans notre cas } N = 5 < 20).$$

Indice	TBF (h)	F(t)
1	192	0,0833
2	2400	0,2023
3	5685	0,3214
4	6588	0,4404
5	6696	0,5595

6	6840	0,6785
7	6938	0,7976
8	13488	0,9166

Tableau 3 Calcul de la fonction de répartition.

Le graphique suivant illustre la fonction de répartition de la distribution de Weibull en utilisant les valeurs de TBF et les (t) calculées précédemment. Cette fonction est tracée sur un papier logarithmique pour faciliter l'analyse. La distribution de Weibull est souvent utilisée pour modéliser les temps de défaillance des systèmes mécaniques et peut fournir des informations précieuses sur la fiabilité de l'équipement (figure IV.1).

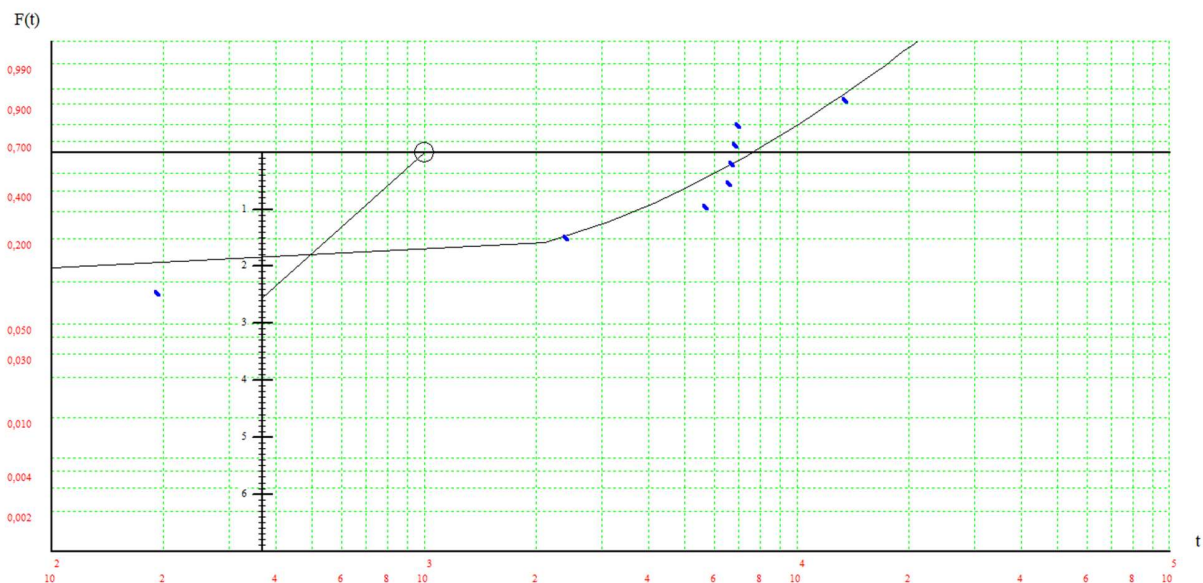


Figure IV-1 Papier fonctionnel de Weibull

En se référant au graphique (IV.1), les paramètres de la loi de Weibull, obtenus à l'aide du logiciel FIABOPTIM, peuvent être déterminés. Ces paramètres incluent généralement l'échelle (η) la forme (β) et la position (γ) de la distribution de Weibull. Une fois ces paramètres connus, il est possible de calculer la fonction de répartition réelle, ce calcul de $F(t)$ permet de modéliser le comportement de la fiabilité du système au fil du temps. L'objectif de cette démarche est de sélectionner le modèle de calcul le plus approprié, qui pourra être utilisé pour prédire les performances du système, planifier les maintenances et optimiser la gestion de la sûreté de fonctionnement. Cette approche statistique est essentielle pour assurer une maintenance proactive et efficace du groupe turbo-alternateur (TG01).

Les valeurs de ces paramètres sont résumées dans (le tableau 4) suivant :

Paramètres	Valeurs
Beta (β)	2,5570076
Eta (η)	11972,057
Gamma (γ)	-4360,0355

Tableau 4. Paramètres de calcul de fiabilité.

Pour valider l'adéquation du modèle pour le calcul des différentes fonctions telles que la fiabilité, la densité de probabilité et le taux de défaillance, il est conseillé d'utiliser le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce test permet de vérifier si les données observées correspondent à la distribution théorique proposée par le modèle. Il consiste à comparer la fonction de répartition empirique des données observées avec la fonction de répartition théorique. Si l'écart maximal entre ces deux fonctions est inférieur à une valeur critique déterminée par le test, alors le modèle est considéré comme acceptable pour les calculs souhaités.

IV.4.1.2. Test KOLMOGOROV-SMIRNOV

Avant de confirmer la validité des lois de fiabilité, il est crucial de soumettre l'hypothèse à un test pour déterminer si le modèle proposé devrait être accepté ou rejeté. Ce processus fait appel au test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), utilisé avec un seuil de confiance de $\alpha = 5\%$. Ce test implique le calcul de la différence entre la fonction théorique $F(i)$ et la fonction empirique $F(t)$, suivie de la sélection de la valeur maximale absolue de cette différence, notée $D_{n\max}$. Ensuite, cette valeur est comparée à $D_{n\alpha}$, qui est extraite de la table de Kolmogorov-Smirnov. Les résultats de comparaison entre les deux fonctions de réparation sont présentés dans le tableau (tableau 5)

Range	F(ti) théorique	F (t) réelle	Dni
1	0,0833	0,0809	0,0024
2	0,2023	0,2069	0,0046
3	0,3214	0,4718	0,1504
4	0,4404	0,5486	0,1082
5	0,5595	0,5577	0,0018
6	0,6785	0,5697	0,1088
7	0,7976	0,5778	0,2198
8	0,9166	0,9377	0,0211

Tableau 5. Estimation de la fiabilité et la fonction de répartition.

Le tableau (5) révèle un écart significatif entre les deux types de fonctions de répartition, observé au rang 7, où D_{7max} est égal à 0,2198. Selon le tableau de Kolmogorov-Smirnov (voir l'annexe), $D_{7,0.05}$ est égal à 0,486. Puisque D_{7max} est inférieur à $D_{7,0.05}$, cela suggère que le modèle de Weibull est acceptable

IV.4.1.3. Exploitation des paramètres de la loi de Weibull

IV.4.1.3.1 MTBF :

$$MTBF = A \cdot \eta + \gamma$$

Le tableau de MTBF donne la valeur A et B (A = 0,8882 B = 0,367)

Donc :

$$MTBF = 0,8882 * 11972,057 - 4360,0355 = 6273,5455 \text{ huers}$$

IV.4.1.3.2 La densité de probabilité en fonction de MTBF

$$f(t = MTBF) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (IV. 1)$$

$$f(t = MTBF) = \frac{2,5570}{11972,057} * \left(\frac{6273,5455+4360,0355}{11972,057}\right)^{2,5570-1} * e^{-\left(\frac{6273,5455+4360,0355}{11972,057}\right)^{2,5570}} = 0,000084$$

$$= 0,0084\%$$

IV.4.1.3.3 La fonction de réparation en fonction de MTBF :

$$F(t = MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (IV.2)$$

$$1 - e^{-\left(\frac{6273,5455+4360,0355}{11972,057}\right)^{2,5570}} = 0,5221 = 52\%$$

IV.4.1.3.4 La fonction de fiabilité en fonction de MTBF :

$$R(t = MTBF) = 1 - F(t = MTBF) = 1 - 0,5221 = 0,4779 = 47,79 \%$$

On remarque que la fiabilité de Turboalternateur est faible.

IV.4.1.3.5 Le taux de défaillance en fonction de MTBF

$$\lambda(t = MTBF) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (IV.3)$$

$$\lambda(t = MTBF) = \frac{2,5570}{11972,057} * \left(\frac{6273,5455+4360,0355}{11972,057}\right)^{2,5570-1} = 0,0001776 \text{ h}$$

IV.4.1.3.6 Etude de modèle de Weibull

L'utilisation du logiciel EXCEL permet de présenter graphiquement les fonctions pour l'étude le modèle de weibull

IV.4.1.3.7 Densité de probabilité f(t) :

La densité de probabilité est exprimée par la relation suivante :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Les résultats de calcul de la densité de probabilité en fonction des temps de bon fonctionnement sont résumés ans le (tableau 6) suivant :

TBF(h)	192	2400	5685	6588	6696	6840	6938	13488
f(t)×10⁻⁴	0,4355	0,6956	0,8582	0,8386	0,8345	0,8284	0,8239	0,2476

Tableau 6. Calcul de la densité de probabilité.

La courbe de la densité de probabilité f(t) est montrée par la figure suivante (Figure VI.2) :

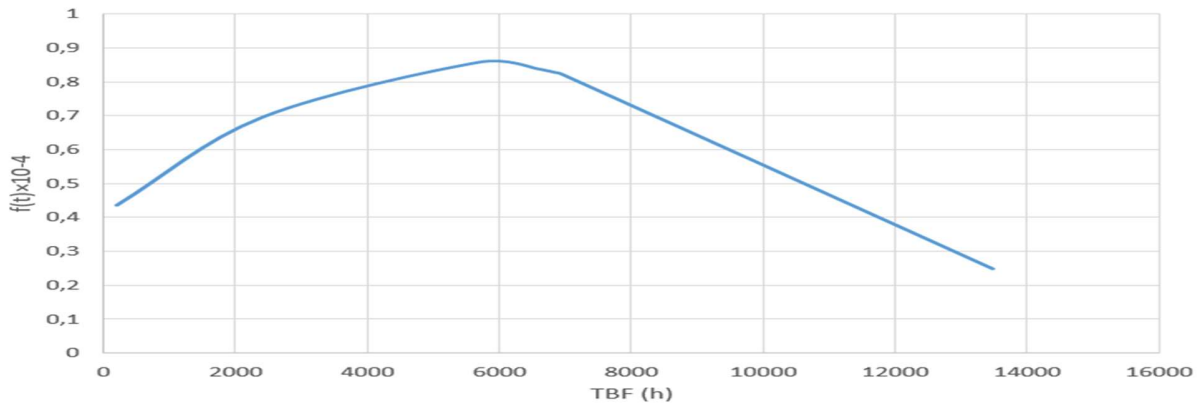


Figure IV-2 Densité de probabilité.

- On remarque d'après cette figure que la densite de probabilite augmente jusqu'a atteindre un pic apres quoi elle diminue, et tout cela augmente avec l'augmentation du temps de bon de fonctionnement (TBF).

IV.4.1.3.8 Fonction de répartition F(t)

La fonction de répartition est donnée par la relation suivante :

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

Les calculs de la fonction de répartition pour différents temps de bon fonctionnement ont été effectués et que les résultats sont présentés de manière organisée dans le (tableau 7) :

TBF (h)	192	2400	5685	6588	6696	6840	6938	13488
F(t)	0,0809	0,2070	0,4719	0,5487	0,5577	0,5697	0,5778	0,9377

Tableau 7 Calcul de la fonction de répartition F(t).

La courbe de fonction de répartition F(t) est présentée par la figure suivante (Figure IV.3)

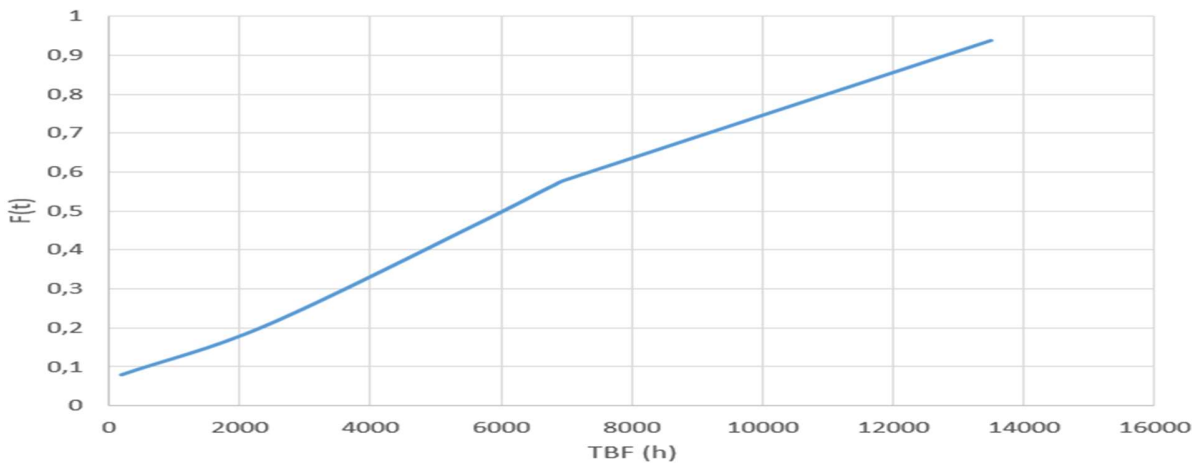


Figure IV-3 Fonction de répartition F(t).

D'après la figure IV.3, à mesure que le temps de fonctionnement du système augmente, la fonction de répartition du système augmente également. Cela reflète une notion fondamentale de la fiabilité des systèmes : plus le temps de fonctionnement s'allonge, plus il est probable que le système finisse par tomber en panne.

IV.4.1.3.9 Fonction de fiabilité :

La fonction fiabilité de celle de répartition: $R(t) = 1-F(t)$, après calcul la fiabilité de la turboalternateur aux temps $t=MTBF$, on déduit que la valeur n'est pas satisfaisante donc on peut dire que la turbine n'est pas fiable à $t=MTBF$ ($R(t = MTBF) = 0,2347$).

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

TBF (h)	192	2400	5685	6588	6696	6840	6938	13488
R(t)	0,9191	0,7930	0,5281	0,4513	0,4423	0,4303	0,4222	0,06228

Tableau 8 Fonction de fiabilité R(t).

Courbe de fonction de fiabilité R(t) donc

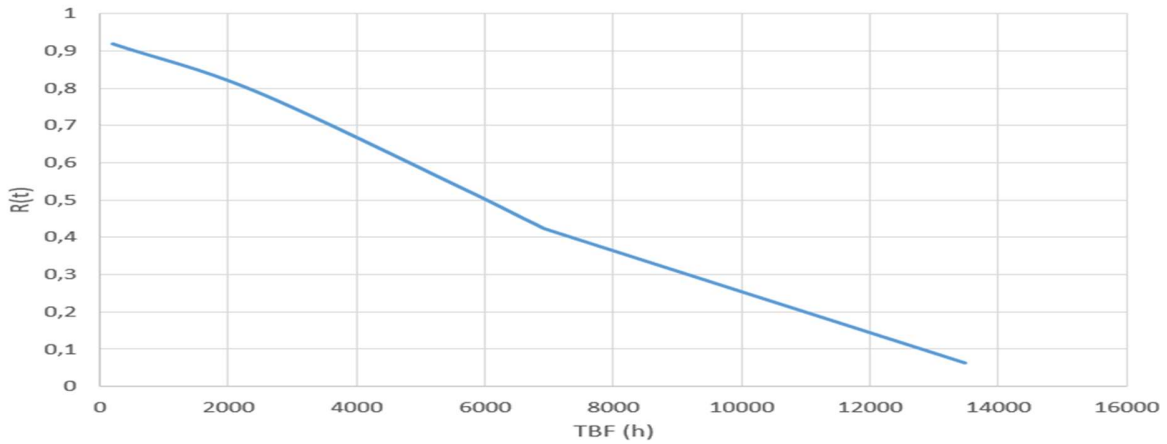


Figure IV-4 Fonction de fiabilité R(t).

❖ On remarque d'après cette figure que la fonction de fiabilité diminue avec l'augmentation du temps de bon fonctionnement (TBF).

IV.4.1.3.10 Le taux de défaillance $\lambda(t)$:

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

TBF (h)	192	2400	5685	6588	6696	6840	6938	13488
$\lambda(t) \times 10^{-3}$	0,0474	0,0877	0,1625	0,1858	0,1887	0,1925	0,1951	0,3977

Tableau 9. Taux de défaillance $\lambda(t)$.

Courbe de Taux de défaillance $\lambda(t)$ donc

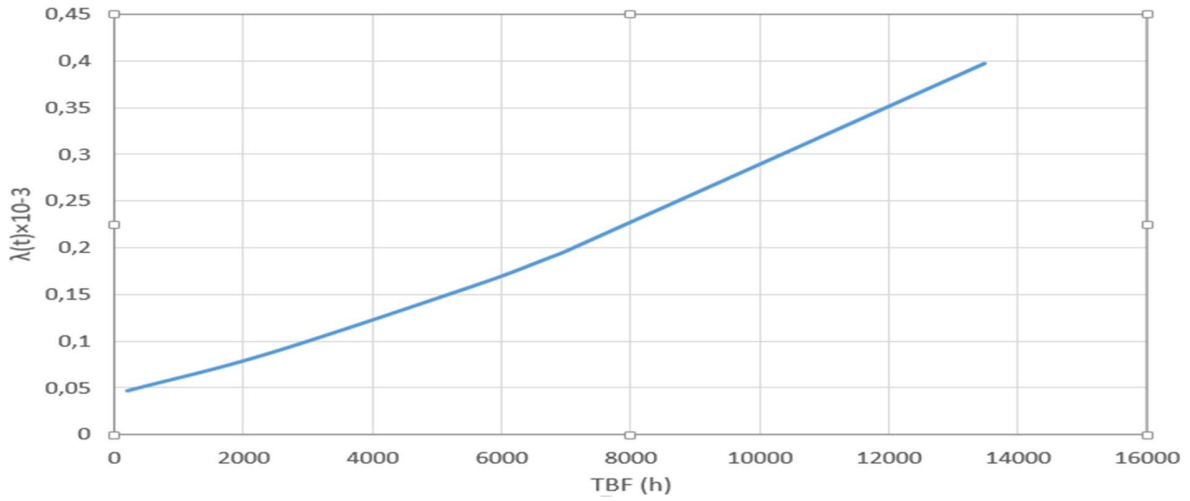


Figure IV-5 Taux de défaillance $\lambda(t)$.

On observe d'après cette figure que la Taux de défaillance augmente jusqu'a atteindre un pic apres quoi elle diminue, et tout cela augmente avec l'augmentation du temps de bon de fonctionnement (TBF).

IV.4.2. Maintenabilité

La fonction de maintenabilité est donnée par la relation suivante:

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

Le taux de réparation μ est exprimé par:

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

$$MTTR = \frac{1}{\mu} = \frac{\sum \text{temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{nombre des pannes}} = \frac{2492,75}{8} = 311,5937$$

$$\mu = \frac{1}{311,59375} = 0,0032 \text{ h}^{-1}$$

Le tableau suivant (Tableau 10) resume la maintenabilite pour l'historique des pannes de Turboalternateur,

Nous avons ordonner les TTR de manière croissant et calculer $M(t)$ de chaque TTR.

Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant

❖ On utilise le tableau, nous allons tracer la courbe graphique de la maintenabilité $M(t)$

N	TTR (h)	M(t)
1	32	0,0973
2	56	0,1641
3	320	0,6408
4	328	0,6499
5	367,75	0,6917
6	409	0,7299
7	428	0,7458
8	552	0,8291

Tableau 10. le calcul de la Maintenabilité.

en fonction des temps de réparation comme illustré la figure suivant :

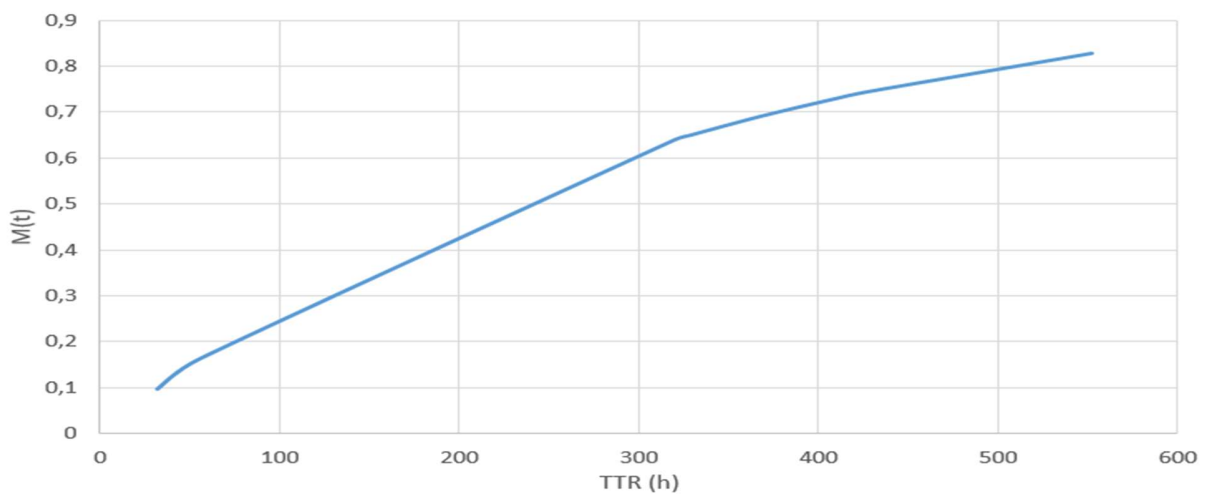


Figure IV-6. La Courbe de Maintenabilité.

❖ on remarque d'après cette figure que la maintenabilité augmente avec l'augmentation du temps de réparation (TTR).

IV.4.3. Disponibilité

Pour calculer la disponibilité intrinsèque ou asymptotique, il faut définir quelques concepts fondamentaux et présenter les équations pertinentes. La disponibilité intrinsèque ou asymptotique

mesure la performance à long terme d'un système en termes de disponibilité, en prenant en compte les taux de défaillance et de réparation, l'équation suivante permet de calculer ce type de disponibilité :

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Avec: MTBF = 6273,5455 et MTTR = 331,5937 donc

$$Di = \frac{6273,5455}{6273,5455 + 311,5937} = 0,9527$$

La disponibilité instantanée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation est exprimée comme suit :

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

$$\lambda(t = MTBF) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} = 0.0001776 \text{ h}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,0032 \text{ h}^{-1}$$

En résumant les calculs de la disponibilité instantanée dans le tableau suivant (tableau 11), on obtient une vue d'ensemble claire et concise de l'état opérationnel du système à différents moments. Cela facilite la compréhension et l'analyse de la performance du système en temps réel et sur une période prolongée.

N	Temps de réparation TTR (h)	Disponibilité
1	32	0,9946
2	56	0,9909
3	320	0,9653
4	328	0,9648
5	367,75	0,9626
6	409	0,9606
7	428	0,9598
8	552	0,9555

Tableau 11. Calcul de la disponibilité instantanée.

L'utilisation du (tableau 11) permet de tracer une courbe qui montre comment la disponibilité instantanée varie en fonction des temps de réparation. Cette courbe, illustrée dans la figure suivante, fournit une visualisation claire et informative de la relation entre ces deux variables, facilitant ainsi l'analyse et la compréhension de la performance du système (voir Figure VI.7).

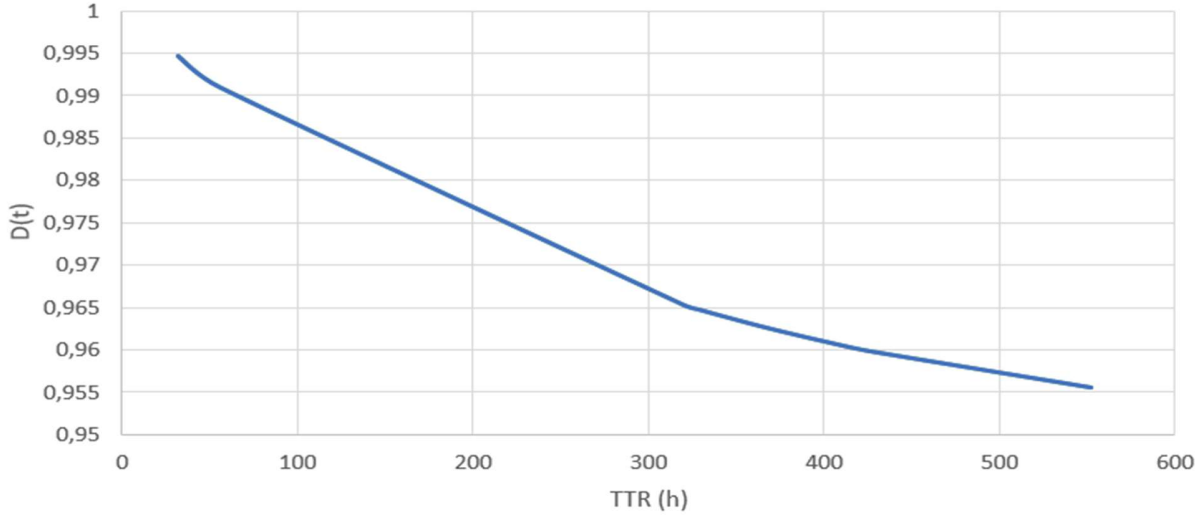


Figure IV-7. Courbe de la disponibilité instantanée.

À partir de la courbe présentée dans la figure IV.7, on peut conclure que pour maintenir une haute disponibilité, il faut minimiser le temps de réparation. Cette compréhension permet de mettre en place des stratégies visant à améliorer l'efficacité des processus de maintenance et de réparation pour maximiser le temps de bon fonctionnement des systèmes.

IV.4.4. Amélioration de fiabilité par l'application de la maintenance préventive systématique

Calcul du temps de bon fonctionnement souhaitable pour améliorer la fiabilité à 80%

$$R(t) = 80\% \rightarrow T_{sys} = ?$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \rightarrow \ln(R(t)) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta = \ln(0.8)$$

$$\rightarrow -[\ln(R(t))]^{\frac{1}{\beta}} = \frac{t-\gamma}{\eta} \rightarrow t = \eta \left[\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right) \right]^{\frac{1}{\beta}} + \gamma$$

$$T_{sys} = 2298,995h$$

IV.4.5. Méthodes d'analyse prévisionnelle ABC

La méthode ABC permet de prioriser les pannes en se basant sur leur impact et d'optimiser les stratégies de maintenance en se concentrant sur les pannes les plus critiques.

Pour appliquer la méthode ABC, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

Classement des Pannes : Commencer par classer les pannes par ordre décroissant en fonction de la durée des pannes (heures de pannes). Ce classement permet de hiérarchiser les pannes en fonction de leur impact sur le système.

- Calcul Cumulatif : Calculer le pourcentage cumulatif de la durée des pannes pour chaque catégorie de panne. Cela aide à identifier quelles pannes contribuent le plus au temps d'arrêt total.
- Catégorisation ABC : Diviser les pannes en trois catégories (A, B, et C) en fonction de leur contribution cumulée :
- Catégorie A : Comprend les pannes les plus critiques, représentant généralement environ 80% du temps d'arrêt total mais ne constituant qu'une petite fraction du nombre total de pannes (environ 20%).
- Catégorie B : Inclut les pannes moyennement critiques, représentant environ 15% du temps d'arrêt total.
- Catégorie C : Comprend les pannes les moins critiques, représentant environ 5% du temps d'arrêt total mais constituant la majorité des pannes (environ 50%).

N	cause	Temps d'arrêt (h)	Cumul Temps d'arrêt (h)	% Temps d'arrêt (h)	Fréquence de panne	Cumul Fréquence de panne	% Fréquence de panne
1	Révision générale	552	552	22,14	1	1	12,5
2	Réparation générale	428	980	39,31	1	2	25
3	Réparation générale	409	1389	55,72	1	3	37,5
4	Réparation générale	367,75	1756,75	70,47	1	4	50
5	IC + Réparation chambre de combustion	328	2084,75	83,63	1	5	62,5
6	HGPI (Hot Gaz Path Inspection) + RG alternateur	320	2404,75	96,46	1	6	75

7	IC approfondi et chargement brulleur N 07	56	2460,75	98,72	1	7	87,5
8	IC (inspection combustion)	32	2492,75	100	1	8	100

Le tableau suivant présente les pannes, les temps d'arrêt associés, ainsi que leurs fréquences. On peut trouver ces informations dans le Tableau 12, qui récapitule les données essentielles pour chaque panne répertoriée.

Tableau 12. Données nécessaires pour tracer la courbe ABC.

Ce tableau nous a permis de tracer la courbe ABC, présentée dans la figure suivante (Figure VI.8) :

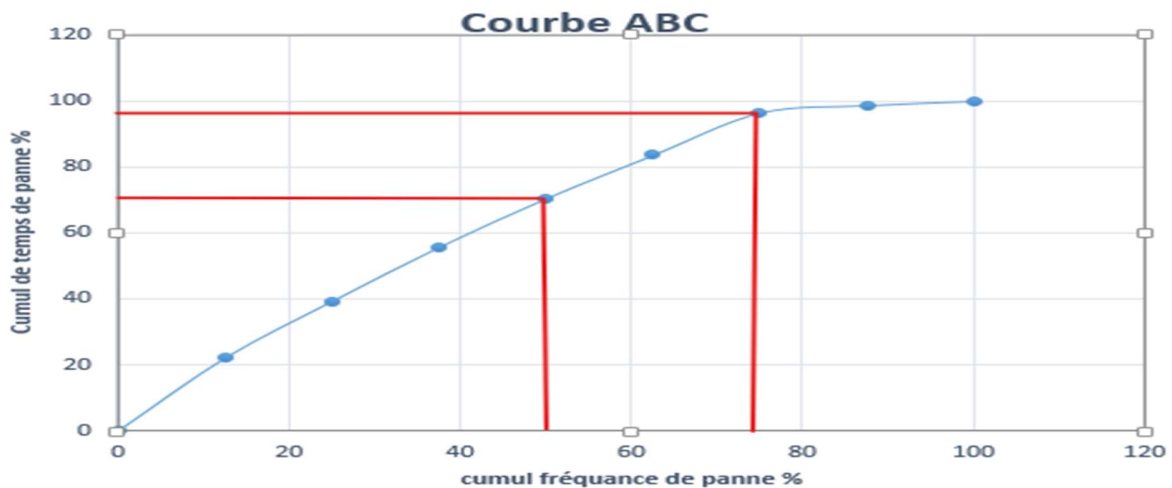


Figure IV-8. La courbe ABC.

D'après la figure IV.8, on peut déduire les trois zones de la courbe ABC :

- Zone A : Dans cette zone, nous constatons qu'environ 50 % des défauts représentent 70,47% des temps d'arrêt, c'est la zone prioritaire.
- Zone B : Dans cette zone, 25% des pannes représentent 25,99% des temps d'arrêt, c'est la zone la moins importance comparant avec la zone A.
- Zone C : Dans cette zone, les 25 % de pannes restantes ne représentent que 3.54% des temps d'arrêts.

Dans la section suivante, nous allons proposer des solutions spécifiques concernant les éléments identifiés dans la zone A de la courbe ABC. La zone A, généralement connue comme la phase de

défaillances précoces, représente les éléments qui ont un taux de défaillance élevé au début de leur cycle de vie.

IV.5. Proposition des solutions pour les éléments les plus défaillants

La proposition des solutions pour les éléments les plus défaillants implique une analyse minutieuse des données de défaillance, l'identification des principaux problèmes et la mise en œuvre de solutions spécifiques pour améliorer la fiabilité et la performance des composants concernés. Les solutions peuvent inclure des améliorations de la conception, des programmes de maintenance, la formation du personnel, l'amélioration des procédures opérationnelles, et une gestion efficace des pièces de rechange et des fournisseurs.

IV.5.1. Proposition d'une révision générale

La révision générale contient l'essentiel des opérations de maintenance et les inspections (IC, IB, IPC, etc.). Nous essaierons donc d'apporter des solutions pour améliorer la maintenance afin de suivre la disponibilité de ce système. Avant tout, nous devons mentionner certaines opérations effectuées par les exécutants lors de la révision générale du système

1. Rotor compresseur : changement de toutes les aubes mobiles des étages 5 à 15. Cette opération consiste à remplacer les pales rotatives dans les étages spécifiés du compresseur pour améliorer l'efficacité et la performance de la machine. La figure suivante illustre les aubes mobiles dégradées (Figure VI.9)



Figure IV-9 Dégradation des aubes mobiles.

2. Stator compresseur : Changement de toutes les aubes fixes avec diaphragmes des étages 1 à 15. (PDR ramenée de HMN3). Les aubes fixes et leurs diaphragmes, qui dirigent le

flux d'air à travers le compresseur, sont remplacés pour assurer une meilleure direction du flux et une meilleure performance. Les pièces de rechange (PDR) proviennent de HMN3. La figure suivante illustre les aubes fixes dégradées (Figure VI.10)



Figure IV-10 Dégradation des aubes fixes.

3. Chambre de combustion annulaire : Changement de tous les carreaux en céramique et de quelques autres pièces de protection thermique. Les carreaux en céramique et les pièces de protection thermique sont remplacés pour garantir que la chambre de combustion résiste aux hautes températures et maintienne son intégrité structurelle. La figure suivante montre les plaques céramiques dégradées (Figure VI.11) :



Figure IV-11 Dégradation des plaques céramiques.

4. Porte-aubages de la turbine : Remplacement par un jeu réparé chez PWPS des étages fixes de 01 à 03. L'étage turbine 4ème a été reconduit. Les supports des aubes fixes des

trois premiers étages de la turbine sont remplacés par des ensembles réparés par PWPS. Les composants du quatrième étage de la turbine sont maintenus en service sans changement.

5. Aubes mobiles de la turbine : Changement de toutes les aubes mobiles des 1er, 2ème, et 3ème étages par un jeu réparé. Les aubes mobiles du 4ème étage de la turbine ont été reconduites. Les aubes mobiles des trois premiers étages de la turbine sont remplacées par des ensembles réparés. Notamment, les aubes du troisième étage ont été prises d'un second jeu réparé par PWPS en raison de l'endommagement de deux aubes lors du montage du premier jeu. Les aubes du quatrième étage sont maintenues en service.
6. Auxiliaires principaux du groupe : Maintenance effectuée par les propres moyens de l'unité. Les auxiliaires principaux de l'unité, comme les systèmes de lubrification, de refroidissement, et de contrôle, ont été entretenus en interne par le personnel de l'unité, sans recours à des services externes.

Cette révision comprend des opérations principales pour la maintenance et la performance du système. Chaque composant clé, du rotor et stator du compresseur à la chambre de combustion et aux aubes de la turbine, est minutieusement entretenu ou remplacé. Ces actions sont essentielles pour garantir la fiabilité, l'efficacité et la disponibilité continue du système. En particulier, la maintenance des auxiliaires principaux par les moyens internes de l'unité démontre une autonomie et une compétence technique de l'équipe sur place.

IV.5.2. Proposition des techniques de contrôle non destructif (CND)

Pour contrôler et évaluer la qualité des pièces, telles que les plaques céramiques, les patins du palier turbine, et les aubes fixes et mobiles, diverses techniques et méthodes peuvent être employées pour détecter la dégradation, les fissures, et d'autres formes de détérioration. Voici une explication détaillée des méthodes de contrôle et d'évaluation de la qualité pour ces composants spécifiques :

1. Plaques céramiques

On peut détecter les fissures, l'usure thermique et d'autres signes de dégradation grâce aux méthodes suivantes :

- *Inspection visuelle* : Examen visuel des plaques pour repérer les fissures visibles, les éclats et les zones décolorées. L'avantage de l'inspection visuelle est qu'elle est rapide et peu coûteuse, mais son inconvénient est qu'elle se limite aux défauts visibles à l'œil nu.

- *Essais par ultrasons* : L'utilisation des ondes ultrasoniques est une technique efficace pour détecter les fissures internes et les délaminations dans les matériaux. Cette méthode fonctionne en envoyant des ondes sonores à haute fréquence à travers le matériau. Lorsque ces ondes rencontrent une discontinuité, telle qu'une fissure ou une délamination, elles sont partiellement réfléchies vers l'émetteur, où elles sont analysées pour déterminer la présence et la localisation des défauts (voire figure VI. 12).



Figure IV-12 Schéma définissant les axes repères pour un contrôle ultrasonore. [34]

L'avantage majeur de cette technique est sa capacité à détecter des défauts internes qui ne sont pas visibles à la surface, ce qui en fait un outil précieux pour l'évaluation de l'intégrité structurelle des composants.

Cependant, cette technique présente aussi des inconvénients. Elle nécessite des équipements spécialisés, souvent coûteux, ainsi que du personnel formé pour interpréter les résultats correctement. Ces exigences peuvent représenter un investissement important en termes de temps et de ressources pour les entreprises souhaitant adopter cette méthode.

- *Thermographie infrarouge* : L'utilisation de caméras infrarouges est une méthode efficace pour détecter les variations de température, ce qui permet de révéler d'éventuels défauts internes dans les matériaux ou les composants. Cette technique, connue sous le nom de thermographie infrarouge, repose sur l'analyse des émissions de chaleur pour identifier les anomalies thermiques qui pourraient indiquer des problèmes sous la surface. L'un des principaux avantages de la thermographie infrarouge est qu'elle est non destructive, ce qui signifie qu'elle n'endommage pas les pièces ou les matériaux inspectés. Elle peut être effectuée en temps réel, permettant ainsi une évaluation rapide et immédiate des conditions de l'objet inspecté. Cela la rend particulièrement utile pour les contrôles en cours de production ou les inspections sur site où des résultats rapides

sont essentiels. Cette technique présente également des inconvénients. Pour obtenir des résultats optimaux, certaines conditions spécifiques doivent être respectées. Par exemple, la température ambiante et les conditions environnementales doivent être contrôlées, et les objets inspectés doivent avoir des propriétés thermiques appropriées pour que les variations de température soient détectables. De plus, l'interprétation des images thermographiques peut nécessiter une expertise spécialisée, ajoutant ainsi une complexité supplémentaire à son utilisation.

2. Patins du palier turbine

Il faut utiliser les techniques suivantes pour détecter l'usure, les fissures, et les déformations :

- **Inspection magnétoscopique** : L'application d'un champ magnétique et d'une poudre magnétique est une méthode couramment utilisée pour révéler les fissures de surface dans les matériaux ferromagnétiques. Ce procédé, connu sous le nom d'inspection magnétoscopique, fonctionne en magnétisant la pièce à inspecter et en saupoudrant une fine poudre magnétique sur sa surface. Les fissures et autres discontinuités créent des perturbations dans le champ magnétique, attirant la poudre magnétique et rendant ainsi visibles les défauts de surface. L'un des principaux avantages de cette technique est son efficacité pour détecter les fissures de surface dans les matériaux ferromagnétiques. Elle permet de repérer rapidement et avec précision les défauts qui pourraient compromettre l'intégrité structurale du composant inspecté. De plus, cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de conditions environnementales strictes. Cependant, l'inspection magnétoscopique présente également des limitations. Elle est restreinte aux matériaux ferromagnétiques, ce qui signifie qu'elle ne peut pas être utilisée sur des matériaux non ferromagnétiques comme l'aluminium ou les alliages de titane. Cette technique ne permet de détecter que les défauts de surface, les fissures internes ou les défauts subsurfaces ne pouvant pas être identifiés par ce procédé.
- **Essais par courants de Foucault** : L'utilisation des courants de Foucault est une méthode de détection des fissures et des défauts sous la surface des matériaux conducteurs. Cette technique repose sur l'induction de courants électriques (appelés courants de Foucault) à l'aide d'une sonde magnétique. Lorsque ces courants rencontrent des discontinuités, comme des fissures ou des défauts, ils subissent des perturbations, ce qui permet de détecter ces anomalies. L'un des principaux avantages de l'utilisation des courants de Foucault est sa sensibilité aux défauts proches de la surface. Cette technique

est capable de détecter des fissures et des imperfections qui sont juste en dessous de la surface, offrant ainsi une grande précision pour l'inspection de matériaux conducteurs. Elle est également non destructive, ce qui signifie qu'elle n'endommage pas les composants inspectés. Cependant, cette méthode présente aussi des inconvénients. Le principal est qu'elle nécessite des équipements spécialisés, souvent coûteux et complexes à utiliser. De plus, l'interprétation des résultats obtenus peut nécessiter une expertise technique spécifique, augmentant ainsi la nécessité de personnel qualifié pour effectuer les inspections et analyser les données.

- **Mesure de la dureté :** L'utilisation d'appareils de mesure de la dureté est une technique efficace pour identifier les zones d'usure et la perte de matériaux sur les surfaces. Toutefois, elle est limitée par son incapacité à détecter les fissures internes, ce qui peut nécessiter l'utilisation de méthodes complémentaires pour une évaluation complète de l'intégrité des matériaux.

3. Aubes fixes et mobiles

On propose les techniques suivantes pour détecter les fissures, l'usure, et les déformations des aubes.

- **Inspection par rayons X :** L'utilisation de rayons X pour obtenir des images internes des aubes est une méthode avancée d'inspection non destructive. Cette technique permet de visualiser l'intérieur des composants en utilisant des rayons X, qui traversent le matériau et forment une image révélant les structures internes, les fissures et les inclusions. L'un des avantages de l'inspection par rayons X est son efficacité à détecter les défauts internes. Contrairement aux méthodes de surface, les rayons X peuvent révéler des fissures cachées, des inclusions et d'autres anomalies à l'intérieur des aubes. Cette capacité à voir à l'intérieur du matériau sans l'endommager est cruciale pour garantir l'intégrité et la fiabilité des composants critiques. Mais cette technique présente également des inconvénients, tels que le coût élevé des équipements et de l'installation nécessaires pour effectuer les inspections par rayons X. Les machines à rayons X, les écrans de protection et les logiciels d'analyse peuvent représenter un investissement substantiel. De plus, l'utilisation de rayons X nécessite des précautions de sécurité strictes pour protéger les opérateurs et l'environnement des radiations potentiellement dangereuses. Cela inclut la formation du personnel, l'utilisation d'équipements de protection individuelle et la mise en place de zones de sécurité autour des appareils.

- **Essais par ressuage :** L'essai par ressuage est une technique précieuse pour l'inspection des surfaces, offrant une solution simple et économique pour la détection des fissures et autres défauts de surface (voir figure VI.13). Cependant, pour une évaluation complète des matériaux, notamment pour détecter les défauts internes, cette méthode doit être complétée par d'autres techniques d'inspection non destructives telles que les ultrasons ou les rayons X.

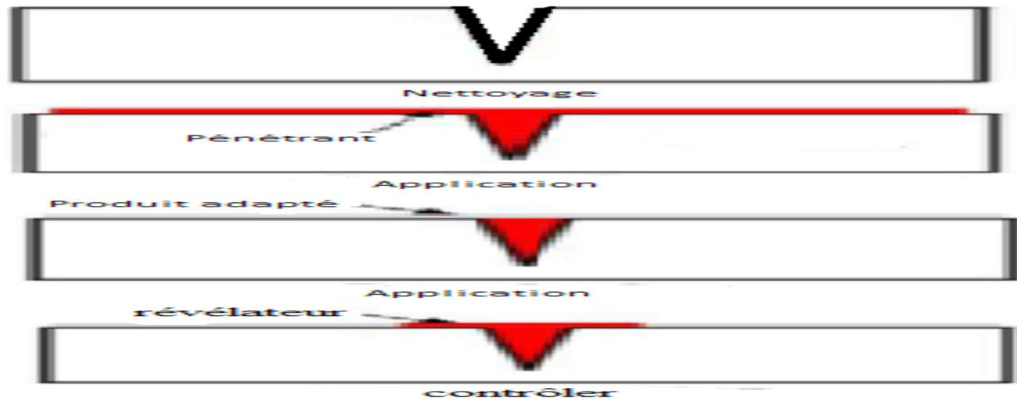


Figure IV-13 Etapes de contrôle par ressuage. [35]

Pour contrôler et évaluer la qualité des pièces comme les plaques céramiques, les patins du palier turbine, et les aubes fixes et mobiles, il est essentiel d'utiliser une combinaison de méthodes de contrôle non destructif (CND). Chaque méthode offre des avantages spécifiques et peut être choisie en fonction des besoins de détection des défauts visibles et internes. En utilisant ces techniques de manière complémentaire, on peut obtenir une évaluation complète de l'état des composants, garantissant ainsi la fiabilité et la sécurité du système.

IV.5.3. Proposition d'un plan des inspections préventives systématiques

Pour élaborer et améliorer la disponibilité du système, garantir sa sécurité, éviter les dommages et la détérioration des pièces, nous proposons ce programme d'amélioration. Ce programme a pour objectif de non seulement augmenter la disponibilité du système, mais également de protéger les composants, de garantir leur intégrité et, par conséquent, de générer des bénéfices significatifs.

Les objectifs du plan des interventions préventives sont :

1. Amélioration de la disponibilité du système : La disponibilité du système fait référence à la proportion du temps pendant lequel le système est opérationnel et prêt à l'emploi.

En augmentant la disponibilité, le système peut fonctionner plus souvent, réduisant les temps d'arrêt et améliorant la productivité.

2. Garantie de la sécurité : La sécurité du système et de ses opérateurs est primordiale. Des inspections régulières et une maintenance adéquate peuvent prévenir les accidents et les défaillances catastrophiques.
3. Prévention des dommages et de la dégradation des pièces : Les composants du système doivent être protégés contre l'usure prématurée et les dommages. Cela permet de prolonger la durée de vie des pièces et de réduire les coûts de remplacement.
4. Génération de bénéfices : En maintenant le système en bon état de fonctionnement, les coûts de maintenance non planifiée et les pertes de production sont minimisés, ce qui conduit à une meilleure rentabilité.

Pour atteindre ces objectifs, nous proposons un tableau d'inspections et de maintenance avec des modifications dans la fréquence des interventions.

Composant	Type d'inspection	Périodicité actuelle	Nouvelle périodicité	Actions proposées
Rotor compresseur	Inspection vibratoire	Tous les 6 mois	Tous les 3 mois	Vérifier les aubes pour des signes d'usure ou de dommages
Stator compresseur	Inspection approfondie	Annuellement	Semestriellement	Évaluer l'état des aubes fixes et des diaphragmes
Chambre de combustion annulaire	Inspection thermique	Annuellement	Trimestriellement	Contrôler les carreaux en céramique et les pièces de protection
Porte-aubages de la turbine	Inspection de performance	Tous les 2 ans	Annuellement	Tester les performances et remplacer les composants endommagés
Aubes mobiles de la turbine	Inspection ultrasonique	Annuellement	Tous les 6 mois	Détecter les fissures et les faiblesses structurelles

Auxiliaires principaux du groupe	Vérification des systèmes de lubrification	Tous les 6 mois	Trimestriellement	Vérifier et remplacer les lubrifiants, inspecter les systèmes
----------------------------------	--	-----------------	-------------------	---

Tableau 13. Plan des inspections préventives.

Le détail des actions proposées est :

1. Inspection visuelle du rotor compresseur : Effectuer des inspections visuelles plus fréquentes pour détecter les signes d'usure ou de dommages des aubes mobiles. Cette action permet de détecter et de corriger les problèmes avant qu'ils ne causent des pannes majeures.

2. Inspection approfondie du stator compresseur : Réduire l'intervalle entre les inspections pour évaluer plus régulièrement l'état des aubes fixes et des diaphragmes. On bénéficie l'amélioration de la fiabilité et la performance et l'identification les problèmes potentiels plus tôt.

3. Inspection thermique de la chambre de combustion annulaire : Augmenter la fréquence des inspections thermiques pour contrôler les carreaux en céramique et les pièces de protection thermique.

Le bénéfice de cette action est de prévenir les défaillances causées par des températures élevées, assurant ainsi une meilleure sécurité et une plus longue durée de vie des composants.

4. Inspection de performance des porte-aubages de la turbine : Effectuer des tests de performance annuels pour évaluer les porte-aubages et remplacer les composants endommagés. Cette intervention préventive permet de maintenir une performance optimale de la turbine et éviter les pannes imprévues.

5. Inspection ultrasonique des aubes mobiles de la turbine : Utiliser la technologie ultrasonique pour détecter les fissures et les faiblesses structurelles des aubes plus fréquemment. Elle permet de garantir l'intégrité structurelle des aubes, réduisant ainsi le risque de défaillances soudaines.

6. Vérification des systèmes de lubrification des auxiliaires principaux : Effectuer des vérifications plus fréquentes des systèmes de lubrification et remplacer les lubrifiants régulièrement. Cette action préventive assure une lubrification adéquate des composants, réduisant l'usure et prolongeant la durée de vie des pièces.

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser l'historique des pannes du turboalternateur afin de calculer les temps de bon fonctionnement et les temps de panne. En utilisant le logiciel Fiab-Optim, nous avons tracé la fonction de distribution réelle basée sur les temps de bon fonctionnement pour extraire les paramètres de la loi de Weibull. Ensuite, ces paramètres ont été utilisés pour vérifier la validité de cette loi à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. Par la suite, nous avons calculé la fiabilité, la densité de probabilité, le taux de défaillance, la maintenabilité et la disponibilité du turboalternateur.

Nous avons constaté que la fiabilité moyenne des temps de bon fonctionnement est réduite. Cela nous a conduit à utiliser la courbe ABC pour identifier les éléments les plus susceptibles de tomber en panne. Ensuite, nous avons proposé des solutions techniques pour minimiser le temps de panne et améliorer la fiabilité et la disponibilité du turboalternateur.

Nos propositions des solutions sont une révision majeure par la modification de la périodicité des inspections et en mettant en œuvre des actions spécifiques, ce plan d'amélioration vise à optimiser la disponibilité du système, garantir sa sécurité, protéger les composants et, finalement, générer des bénéfices significatifs, l'application des technique de contrôle non destructif telles que les ultrasons rayon X, le magnétoscopie....ext et implantation d'un plan des inspections préventive systématique.

Conclusion générale

Conclusion Générale

À la fin de notre travail, nous pouvons affirmer qu'il est important de définir clairement ce qu'est une panne et de comprendre les phénomènes de défaillance et de dégradation des équipements. En approfondissant l'analyse de la fiabilité et de la disponibilité, nous pouvons mieux appréhender les comportements des systèmes et ainsi choisir une politique de maintenance optimale. Cela permet de réduire les temps d'arrêt, l'indisponibilité et les coûts de maintenance, tout en assurant une organisation de maintenance plus efficace et performante.

Dans le cadre de ce projet, nous avons effectué un stage au sein de l'entreprise SPE, au cours duquel nous avons décidé de nous concentrer sur l'analyse du turboalternateur en raison de son importance pour l'entreprise. Pendant notre stage, notre principale tâche a été d'analyser l'historique des pannes du turboalternateur afin de déterminer les temps de bon fonctionnement et les temps de panne. Nous avons utilisé le logiciel Fiab-Optim pour tracer la fonction de distribution réelle basée sur les temps de bon fonctionnement du turboalternateur. Cette étape nous a permis d'extraire les paramètres nécessaires à l'application de la loi de Weibull. Ensuite, nous avons utilisé ces paramètres pour vérifier la validité de la loi de Weibull en utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov. Par la suite, nous avons procédé au calcul de diverses métriques de fiabilité, notamment la fiabilité elle-même, la densité de probabilité, le taux de défaillance, la maintenabilité et la disponibilité du turboalternateur.

Nos analyses ont révélé que la fiabilité de la moyenne des temps de bon fonctionnement est réduite, ce qui nous a incités à utiliser la courbe ABC pour identifier les éléments les plus à risque de panne. En conséquence, nous avons élaboré des solutions techniques visant à minimiser les temps d'arrêt et à améliorer la fiabilité et la disponibilité du turboalternateur.

Nos propositions de solutions comprennent principalement une révision majeure du processus, ce qui implique une modification de la périodicité des inspections et la mise en œuvre d'actions spécifiques. L'objectif de ce plan d'amélioration est de maximiser la disponibilité du système, tout en garantissant sa sécurité et en préservant l'intégrité de ses composants. Nous visons également à générer des bénéfices significatifs à long terme.

Parmi les actions recommandées, nous suggérons l'utilisation de techniques de contrôle non destructif telles que les ultrasons, les rayons X et la magnétoscopie. Ces techniques permettent une inspection approfondie des composants sans compromettre leur intégrité structurelle. De plus, nous proposons la mise en place d'un plan d'inspections préventives systématiques. Ce plan permettra

Conclusion Générale.....

d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent des sources de défaillance critique.

Références bibliographiques

- [1] CHEIKHI Omar, DJOUDI Ismail, « Amélioration des performances opérationnelles des systèmes de production en utilisant la théorie des chaînes de Markov » Mémoire de MASTER en génie électrique, université Mohamed Boudiaf de m'sila - M'sila, 2018.
- [2] BELOUADAH ABDENACEUR, « Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive » Mémoire de MASTER en génie électrique, université Mohamed Boudiaf de m'sila - M'sila, 2016.
- [3] DIF ZAKARYA, ADJISSI MEHDI, « Amélioration de la production d'un système par l'application de la maintenance préventive » Mémoire de MASTER en génie électrique, université Mohamed Boudiaf de m'sila - M'sila, 2018.
- [4] BELKHIR, T. & BEN SACI, M, « La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire » Mémoire de Master spécialité Maintenance Industrielle UNIVERSITE KASDI MARBAH (2016).
- [5] AKBI BRAHIM & HAMZAOU Med ESSAID, « Analyse vibratoire des défauts courants Dans le parc machine de la centrale thermique RAS-DJINET », Mémoire de Master spécialité MECATRONIQUE, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2016/2017.
- [6] L. BENALI. Maintenance Industrielle. Office des Publications Universitaires (OPU) 2006.
- [7] A. BELHOMME, Cours de stratégie de maintenance 2010/2011.
- [8] Abdelhadi BENKHELIFA ET Mourad MOHAMMEDI, « Fiabilité des équipements de D.T.M., analyse fonctionnelle et implications organisationnelles de la fonction maintenance de transport » Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2011.
- [9] CHERIFI, F. & SMAILI, Y, « Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive Conditionnelle », Mémoire de Master spécialité Électrotechnique, Université A. MIRA de Bejaia.
- [10] REZGI IMANE, Cours maintenance industriel université-Ouargla 2017.
- [11] OustaniMebrouk / Nedjaa Mohammed Mokhtar, « Etude maintenance préventive d'un turbocompresseur par analyse des huiles » Mémoire de master Génie mécanique, Université KasdiMerbah - Ouargla juin 2014.
- [12] A. BELHOMME, Cours de stratégie de maintenance 2010/2011.

[13] Landolsi Foued, « Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire ».

[14] GHEMARI ZINE, « Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre) », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013.

[15] SOUHEIL AYED, «Contribution au développement des stratégies de gestion»

[16] BEN DJAAFER Ahmed. « Réalisation d'un plan de maintenance préventive systématique pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique » Mémoire de MASTER ingénie électrique, université Mohamed Boudiaf de m'sila - M'sila, 2013

[17] A.villemeur. « Suereté de fonctionnement de systèmes industriel : fiabilité, facteurs humains, informatisation eyrolles, paris 1988 »

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

[19] Rabiai. A, Laichi.I, « Etude de la sureté de fonctionnement par analyse FMD application (PRESSE2500T) », Thèse d'ingénieur d'université m'sila, 2010.

[20] Olivier.B, Pierre. D, « Modélisation de fiabilité d'un system doumis a des sollicitations variables », Faculté Polytechnique de Mons, Service de Génie Mécanique Rue du Joncquois, 53 à B-7000 Mons, Belgique 2007.

[21] Pr. Ahmed BELLAOUAR. M.A. Salima BELEULMI « polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD) », polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD) UNIVERSITE Constantine 1, Constantine 2013

[22] DAFDAF.AbdElhak, FAID Omar, « Optimisation de la fiabilité d'un système électromécanique», Mémoire de MASTER en génie électrique, université Mohamed Boudiaf de m'sila - M'sila, 2018.

[23] Pr. Ahmed BELLAOUAR, « FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE », livre FMD, 24/12/2013. Doctorat << UNIVERSITED'ANGERS >>, 2005.

[24] BENNECIB SOFIANE, « Etude analytique FMD d'une BANC D'EPREUVE 500 », Mémoire de MASTER en génie mécanique, université Badji Mokhtar annaba - Annaba 2017

[25] Alin Gabriel MIHALACHE « Modélisation et évaluation de la fiabilité Des systèmes mécatroniques : application sur système embarque », thèse de doctorat « Université D'ANGERS >>,2007.

[26] HATHAT ABDELKADER, DEBLAOUI HICHAM, « Etude analytique FMD d'une turbine DR 990 », Mémoire de MASTER, université Kasdi Merbah, Ouargla 2014/2015.

[27] Guetatlia Mohamed, « Amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique : 'actionneur intelligent' » Mémoire de MASTER, Université 8Mai 1945 – guelma, 2020

[28] Mathieu.G, « Modélisation des coûts de cycle de vie prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l'aéronautique », Thèse de doctorat d'Ecole centrale de Lyon ,2005.

[29] Ouahiba TEBBI, « ESTIMATION DES LOIS DE FIABILITE EN MECANIQUE PAR LES ESSAIS ACCELERES », Thèse de doctorat, ECOLE DOCTORALE D'ANGERS, 2005

[30] François Monchy, Jean-pierre Vernier, « Maintenance Méthodes et organisations », livrer 3 eme édition, Dunod, Paris, 2000, 2003, 2010.

[31] Zouba Sid Ahmed Mustapha, Belkiseria Noreddine, Beladjal Abdelhafid, « Evaluation de la disponibilité d'une pompe de forage pétrolier », Mémoire de MASTER, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.

[32] Louis Houde, « lois de probabilité », PAF-1010, Analyse quantitative de problème de gestion, Université du Québec à Trois-Rivières, 2014.

[33] Hassan BENARIBA, « Cours Fiabilité et maintenance des systèmes électroniques », cours de MASTER, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2020/2021.

[34] Lorans, A. (2021). Contrôle non destructif par ultrasons appliqué aux pièces métalliques issues de la fabrication additive et conventionnelle [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.

[35] Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique : CONTRÔLE NON DESTRUCTIF.

ملخص

تعتبر صيانة الصناعات من أهم الجوانب التي يجب أن توليها الشركات اهتمامًا كبيرًا، لضمان استمرارية عمل المرافق الإنتاجية بشكل سلس. تعتبر هذه الوظيفة استراتيجية في مجال الأعمال التطبيقية، مرتبطة بشكل وثيق بالتطور التكنولوجي المستمر. في إطار هذا المشروع، سيكون هدفنا تحسين موثوقية التوربوالترناتور (V94.3A4) داخل محطة إنتاج الطاقة الكهربائية (SPE) في ولاية المسيلة. سنقوم بإجراء تحليل إحصائي للأعطال في هذا النظام ووضع توصيات لاقتراح حلول فعالة لتقليل هذه الحوادث خلال فترة التشغيل.

Résumé

L'entretien industriel revêt une importance capitale pour les entreprises, afin de garantir le bon fonctionnement continu des installations de production. Cette fonction est stratégique dans le domaine des affaires appliquées, étroitement liée à l'évolution technologique constante. Dans le cadre de ce projet, notre objectif sera d'optimiser la fiabilité du Turboalternateur (V94.3A4) au sein de la station de production d'énergie électrique (SPE) à M'sila. Nous réaliserons une analyse statistique des dysfonctionnements de ce système et formulerons des recommandations afin de proposer des solutions efficaces pour réduire ces incidents pendant la période d'exploitation.

Abstract

Industrial maintenance is of crucial importance for companies to ensure the continuous proper functioning of production facilities. This function is strategic in the field of applied business, closely related to constant technological evolution. In the context of this project, our objective will be to optimize the reliability of the Turboalternator (V94.3A4) within the electric power production station (SPE) in M'sila. We will conduct a statistical analysis of the malfunctions of this system and formulate recommendations to propose effective solutions to reduce these incidents during the operating period.

Les mots clés

Production, politique, maintenance, système, fiabilité

Test de Kolmogorov-Smirnov								
Nivel de significación α								
n	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540
18	0.24360	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	0.39380	0.42224	0.44234
19	0.23735	0.27136	0.30143	0.33685	0.36117	0.38379	0.41156	0.43119
20	0.23156	0.26473	0.29408	0.32866	0.35241	0.37451	0.40165	0.42085
21	0.22517	0.25858	0.28724	0.32104	0.34426	0.36588	0.39243	0.41122
22	0.22115	0.25283	0.28087	0.31394	0.33666	0.35782	0.38382	0.40223
23	0.21646	0.24746	0.27491	0.30728	0.32954	0.35027	0.37575	0.39380
24	0.21205	0.24242	0.26931	0.30104	0.32286	0.34318	0.36787	0.38588
25	0.20790	0.23768	0.26404	0.29518	0.31657	0.33651	0.36104	0.37743
26	0.20399	0.23320	0.25908	0.28962	0.30963	0.33022	0.35431	0.37139
27	0.20030	0.22898	0.25438	0.28438	0.30502	0.32425	0.34794	0.36473
28	0.19680	0.22497	0.24993	0.27942	0.29971	0.31862	0.34190	0.35842
29	0.19348	0.22117	0.24571	0.27471	0.29466	0.31327	0.33617	0.35242
30	0.19032	0.21756	0.24170	0.27023	0.28986	0.30818	0.33072	0.34672
31	0.18732	0.21412	0.23788	0.26596	0.28529	0.30333	0.32553	0.34129
32	0.18445	0.21085	0.23424	0.26189	0.28094	0.29870	0.32058	0.33611
33	0.18171	0.20771	0.23076	0.25801	0.27577	0.29428	0.31584	0.33115
34	0.17909	0.21472	0.22743	0.25429	0.27271	0.29005	0.31131	0.32641
35	0.17659	0.20185	0.22425	0.25073	0.26897	0.28600	0.30597	0.32187
36	0.17418	0.19910	0.22119	0.24732	0.26532	0.28211	0.30281	0.31751
37	0.17188	0.19646	0.21826	0.24404	0.26180	0.27838	0.29882	0.31333
38	0.16966	0.19392	0.21544	0.24089	0.25843	0.27483	0.29498	0.30931
39	0.16753	0.19148	0.21273	0.23785	0.25518	0.27135	0.29125	0.30544
40	0.16547	0.18913	0.21012	0.23494	0.25205	0.26803	0.28772	0.30171
41	0.16349	0.18687	0.20760	0.23213	0.24904	0.26482	0.28429	0.29811
42	0.16158	0.18468	0.20517	0.22941	0.24613	0.26173	0.28097	0.29465
43	0.15974	0.18257	0.20283	0.22679	0.24332	0.25875	0.27778	0.29130
44	0.15795	0.18051	0.20056	0.22426	0.24060	0.25587	0.27468	0.28806
45	0.15623	0.17856	0.19837	0.22181	0.23798	0.25308	0.27169	0.28493
46	0.15457	0.17665	0.19625	0.21944	0.23544	0.25038	0.26880	0.28190
47	0.15295	0.17481	0.19420	0.21715	0.23298	0.24776	0.26600	0.27896
48	0.15139	0.17301	0.19221	0.21493	0.23059	0.24523	0.26328	0.27611
49	0.14987	0.17128	0.19028	0.21281	0.22832	0.24281	0.26069	0.27339
50	0.14840	0.16959	0.18841	0.21068	0.22604	0.24039	0.25809	0.27067
n>50	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.73}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.85}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.95}{\sqrt{n}}$

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997

Tableau 14. la comparaison entre la fréquence relative $F(t_i)$ et la fonction de répartition $F_{th}(t_i)$.