



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance en Automatismes Industriels et Instrumentation

Thème

Optimisation des périodicités de maintenance préventive de l'étage 60 kV d'un poste de transformation électrique

Présenté et soutenu publiquement par :

ATALLAH Noura

Devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
Mr A. Adjeloua	MCA	IMSI-Univ.Oran2	Président
Mme H. Benaicha	MCB	IMSI-Univ. Oran2	Directrice de mémoire
Mme A. Boulekhras	MCB	IMSI-Univ. Oran2	Examinatrice

Année Universitaire: 2025/2026

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma directrice de mémoire, Mme Halima Benaïcha, pour son encadrement précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et sa patience tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses orientations pertinentes et son soutien constant ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse également mes plus vifs remerciements aux membres du jury, Mme A. Boulekhras et M. A. Adjeloua, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail et de participer à son évaluation. Je leur suis reconnaissant(e) pour le temps qu'ils consacreront à la lecture de ce mémoire ainsi que pour leurs remarques et suggestions qui contribueront à son enrichissement.

إهداء

إلى القلبين اللذين لا يعرفان التعب في حبي...إلى من كان دعاؤهما جناحَيَّ في كل صعود...أمي الحنونة.. وأبي العزيز

إلى سيني ومن حملوا اسمي في قلوبهم قبل أن أحمل نجاحي بين يدي...عطاء الله.. محمد.. وأحمد

إلى التي جعلت من عائلتنا أكثر دفئاً وجمالاً، سارة.. وحبيبتنا الصغيرة ردينة

إلى التي مدّت يدها لي حين احتجتها، وكان حضورها وحده يكفيني لأمضي...خالتي الغالية رشيدة

إلى اللواتي تجمعنا بهن دماء واحدة وقلوب متشابهة...سارة.. قمر .. ريحانة.. سندس.. وصغيرتي روضة الشريفة

إلى من عرفن أحلامي قبل أن تكتمل، ورافقنني في أصعب الليالي وأجمل اللحظات...خديجة.. حفصة.. وآية

إليكم جميعاً..أهدي هذا الجهد المتواضع، فأنتم كنتم الدافع، والسند، والمعنى.

شكراً لأنكم كنتم.. ولا تزالون.

Résumé

La maintenance préventive constitue un levier essentiel pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements électriques tout en maîtrisant les coûts d'exploitation. Ce mémoire s'intéresse à l'optimisation de la périodicité de maintenance préventive de l'étage 60 kV du poste de transformation 220/60/30 kV de Tiaret. L'étude repose sur l'analyse des données de défaillance des équipements et sur l'utilisation de la loi de Weibull pour la modélisation de leur comportement en fiabilité. Deux modèles d'optimisation de maintenance préventive, à savoir le modèle de remplacement par blocs (Type I) et le modèle de remplacement basé sur l'âge (Type II), sont présentés et appliqués afin de déterminer une politique de maintenance adaptée aux contraintes techniques et économiques de l'installation.

Mots-clés : Maintenance préventive ; Fiabilité ; Loi de Weibull ; Optimisation ; Périodicité de maintenance ; Poste de transformation ; Équipements électriques.

Abstract

Preventive maintenance is an essential tool for improving the reliability and availability of electrical equipment while controlling operating costs. This dissertation focuses on the optimization of preventive maintenance intervals for the 60 kV level of the 220/60/30 kV electrical substation in Tiaret. The study is based on the analysis of equipment failure data and the use of the Weibull distribution to model their reliability behavior. Two preventive maintenance optimization models, namely the Block Replacement Model (Type I) and the Age Replacement Model (Type II), are presented and applied in order to determine a maintenance policy adapted to the technical and economic constraints of the installation.

Keywords: Preventive maintenance; Reliability; Weibull distribution; Optimization; Maintenance interval; Electrical substation; Electrical equipment.

الملخص

تُعد الصيانة الوقائية أداة أساسية لتحسين موثوقية وتوافر المعدات الكهربائية مع التحكم في تكاليف التشغيل. يتناول هذا العمل تحسين دورية الصيانة الوقائية لمستوى 60 كيلو فولت بمحطة التحويل الكهربائي 30/60/220 كيلو فولت بمدينة تيارت. تعتمد الدراسة على تحليل بيانات أعطال المعدات واستخدام توزيع ويبيل (Weibull) لنمذجة سلوكها من حيث الموثوقية. كما تم عرض وتطبيق نموذجين لتحسين الصيانة الوقائية، وهما نموذج الاستبدال الدوري (النوع الأول) ونموذج الاستبدال المعتمد على العمر (النوع الثاني)، بهدف تحديد سياسة صيانة تتلاءم مع المتطلبات التقنية والاقتصادية للمنشأة.

الكلمات المفتاحية: الصيانة الوقائية؛ الموثوقية؛ توزيع ويبيل؛ التحسين؛ دورية الصيانة؛ محطة التحويل الكهربائي؛ المعدات الكهربائية.

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralités sur la maintenance	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Maintenance :	4
I.2.1 Définition normalisée :	4
I.2.2 Différentes formes de maintenance :	4
I.3 Méthodes de Maintenance :	5
I.4 Maintenance corrective :	6
I.5 Maintenance préventive :	6
I.5.1 But de la maintenance préventive :	7
I.5.2 Maintenance préventive systématique :	7
I.5.3 Cas d'application :	7
I.5.4 Maintenance préventive conditionnelle :	8
I.6 Avantage :	8
I.7 Opérations de maintenance :	9
I.7.1 Opérations de la maintenance corrective :	9
I.7.2 Opérations de la maintenance préventive :	10
I.7.3 Autres opérations :	11
I.8 Sûreté de fonctionnement (SDF ou F.M.D.S) :	12
I.8.1 Fondamentaux de la sûreté de fonctionnement :	12
I.8.2 But de la sûreté de fonctionnement :	13
I.9 Quelques indicateurs :	13
I.10 Etudes de la sûreté de fonctionnement :	14
I.11 Etape par étape :	15
I.11.1 Etude périphériques :	15
I.11.2 En pratique :	16
I.12 Conclusion :	17
Chapitre II : Concepts de fiabilité appliqués à la maintenance	18
II.1 Introduction :	19
II.2 Fiabilité :	19
II.2.1 Définition :	19
II.2.2 Fonction de fiabilité :	19
II.2.3 Fonction de densité de probabilité :	20
II.2.4 Fonction de risque instantané ou taux de panne :	21
II.3 Relation entre la fiabilité et la maintenance :	24
II.4 Analyse de la fiabilité par les lois de probabilité :	24
II.4.1 Analyse de la fiabilité à partir de la loi Gamma :	24

II.4.2	Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle :	25
II.5	Conclusion :	29
Chapitre III : Méthodes de détermination de la périodicité de maintenance préventive		30
III.1	Introduction :	31
III.2	Approche de détermination de la périodicité :	31
III.2.1	Méthode basée sur le seuil de fiabilité :	31
III.2.2	Modèles élémentaires de maintenance préventive :	31
III.3	Modélisation mathématique :	33
III.4	Modèles de remplacement par blocs (Block Replacement Model – type I) :	33
III.5	Modèles basés sur l'âge (Age Replacement Model – type II) :	36
III.6	Conclusion :	40
Chapitre IV : Application industrielle / Étude de cas		41
IV.1	Introduction :	42
IV.1	Description générale du poste 220 /60/30 KV :	42
IV.2	Schéma monophasé équivalent du poste existant :	42
IV.3	Historique des pannes de l'étage 60 kV du poste de transformation :	44
IV.4	Les paramètres essentiels de la loi de Weibull :	45
IV.5	Analyse des coûts de maintenance et modélisation économique :	46
IV.6	Détermination de la périodicité optimale T_0 :	48
IV.6.1	Modèle Type I — Remplacement par Blocs :	49
IV.6.2	Modèle Type II — Remplacement basé sur l'Âge :	49
IV.6.3	Courbes d'optimisation :	49
IV.7	Discussion et interprétation :	50
IV.7.1	Interprétation des courbes de coût et comparaison des deux modèles :	50
IV.7.2	Gains en fiabilité	51
IV.7.3	Gains économiques :	51
IV.7.4	Modèle recommandé :	51
IV.8	Conclusion :	52
Conclusion Générale		54
Bibliographie		55

Liste des figures :

Figure I. 1: Les méthodes de maintenance	6
Figure I. 2: Les opérations de maintenance	12
Figure I. 3: Les indicateurs de maintenance.....	14
Figure I. 4: Les volets complémentaires de SDF	16
Figure I. 5: La modélisation de système SDF	17
Figure II. 1: Courbes paramétriques de la fiabilité	21
Figure II. 2: La fonction densité de durée de vie	22
Figure II. 3: Courbe en baignoire du taux de défaillance.....	23
Figure II. 4: Graphes de deux densités de loi Gamma	25
Figure II. 5: Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de β	27
Figure II. 6: Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de α	27
Figure II. 7: Représentation théorique de l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps	29
Figure III. 1: Remplacement à période fixe T_0	33
Figure III. 2: Courbe d'optimisation du coût total de maintenance en fonction de la périodicité T (Allure en "U").....	36
Figure III. 3: Remplacement lorsque l'âge de la pièce T_0 est atteint	36
Figure III. 4: Cas de : $\beta > 1$	39
Figure III. 5: Allure de $C(t)$ dans le cas de $\beta > 1$	39
Figure IV. 1: Schéma synoptique du poste de transformation 220/60/30 kV	43
Figure IV. 2: Évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps de l'étage 60 kV.....	46
Figure IV. 3 : Optimisation des périodicités de maintenance préventive de l'étage 60 kV	50

Liste des tableaux :

Tableau IV. 1: Historique des pannes.....	45
Tableau IV. 2: Les paramètres essentiels de la loi de Weibull.....	45
Tableau IV. 3: Répartition des pannes et coûts de remplacement des composants de l'étage HT ..	47

Liste des Abréviations

AFNOR :	Association Française de Normalisation
BT :	Basse Tension
CCN :	Centre de Conduite du Réseau
DA :	Dinar Algérien
F(t) :	Fonction de Répartition (probabilité de défaillance)
f(t) :	Fonction de Densité de Probabilité
FMDS :	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité
HT :	Haute Tension
ISO :	Organisation Internationale de Normalisation
JDB :	Jeux De Barres
kV :	Kilovolt
M(T) :	Fonction de Renouvellement
MDT :	Mean Down Time (Temps Moyen d'Indisponibilité)
MT :	Moyenne Tension
MTBF :	Mean Time Between Failures (Temps Moyen Entre Défaillances)
MTTF :	Mean Time To First Failure (Temps Moyen à la Première Défaillance)
MTTR :	Mean Time To Repair (Temps Moyen de Réparation)
MUT :	Mean Up Time (Temps Moyen de Bon Fonctionnement)
MVA :	Mégavolt-Ampère
NF :	Norme Française
OMF :	Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité
R(t) :	Fonction de Fiabilité (fonction de survie)
Rs :	Seuil de Fiabilité
SDF :	Sûreté De Fonctionnement
SF6 :	Hexafluorure de Soufre
SONELGAZ	:Société Nationale de l'Électricité et du Gaz

STE :	Sous-station de Transformation Électrique
T₀ :	Périodicité Optimale de Maintenance Préventive
VLTT :	Véhicule de Liaison Tout-Terrain
C_p :	Coût de Remplacement Préventif
C_f :	Coût de Remplacement Correctif
C(T) :	Coût Moyen par unité de temps
C_r :	Ratio des Coûts (C _p /C _f)
K :	Ratio d'Impact Financier Moyen Pondéré
α:	Paramètre de forme de la loi de Weibull
β :	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull
γ:	Paramètre de Position de la loi de Weibull
λ(t) :	Taux de Défaillance instantané

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le paysage industriel contemporain, la performance globale des systèmes de production et de distribution d'énergie est devenue un levier stratégique de compétitivité, de sécurité et de continuité de service. Face à des exigences économiques de plus en plus strictes et à la nécessité de garantir une alimentation électrique sans faille, la fonction maintenance a profondément évolué. Autrefois cantonnée à un rôle purement réactif de réparation des avaries, elle s'affirme aujourd'hui comme une discipline d'ingénierie prédictive et décisionnelle, visant à maîtriser les risques de défaillance tout en optimisant les ressources financières de l'entreprise.

Parmi les infrastructures les plus critiques du réseau électrique national, les postes de transformation et d'interconnexion THT/HT/MT (Très Haute Tension / Haute Tension / Moyenne Tension) occupent une place névralgique. Agissant comme des nœuds stratégiques de transit et de répartition de l'énergie, ces sous-stations assurent l'interface indispensable entre les grandes lignes de transport d'énergie et les réseaux de distribution régionale. Au sein de ces structures hautement complexes exploitées par la SONEELGAZ, la survenue d'une panne brutale sur un constituant majeur, qu'il s'agisse d'un autotransformateur d'interconnexion, d'un départ de ligne, d'un disjoncteur ou d'un jeu de barres, engendre des conséquences systémiques immédiates. Au-delà des coûts directs de remplacement correctif d'urgence, souvent exacerbés par la complexité technique des équipements et la nécessité de mobiliser des équipes spécialisées sous haute tension, la mise hors service d'un tel poste menace directement la stabilité du réseau et la continuité de la fourniture d'énergie pour des régions entières.

Dès lors, l'application d'une politique de maintenance curative exclusive s'avère économiquement insoutenable. À l'inverse, une stratégie préventive aveugle ou excessive induit des dépenses massives en main-d'œuvre et en pièces de rechange, menant à une situation de sur-maintenance tout aussi inefficace. Le défi majeur des gestionnaires réside donc dans la résolution d'un arbitrage technico-économique permanent : déterminer avec précision le moment idéal pour intervenir.

C'est précisément dans ce cadre que s'inscrit notre travail de recherche. L'objectif central de cette étude est de déterminer la périodicité optimale (T_0) de remplacement à neuf des pièces d'usure et des composants critiques du poste THT/HT/MT, en exploitant les lois statistiques de la fiabilité.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons

Les généralités de la maintenance, en citons ses différentes formes et stratégies.

Dans le second chapitre, nous rappelons certains concepts de fiabilité, non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour mettre en place une stratégie de maintenance adéquate.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de deux approches fondamentales de la maintenance préventive : le modèle de remplacement par blocs (Type I) et le modèle basé sur l'âge (Type II). En ingénierie de la fiabilité, le but de ces stratégies est d'optimiser la périodicité de remplacement des composants industriels afin de minimiser les coûts et d'éviter les pannes soudaines.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique et à la validation industrielle des contributions théoriques formalisées précédemment. Ce cas d'étude applicatif s'appuie sur l'exploitation d'un historique de pannes réelles issu du poste de transformation THT/HT/MT de Tiaret, fourni par la société SONELGAZ. L'analyse statistique et technico-économique de ces données d'exploitation permet d'illustrer concrètement l'intérêt des modèles d'optimisation (Type I et Type II) et de proposer des recommandations opérationnelles directement applicables pour la planification de la maintenance du réseau.

Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités sur la maintenance

I.1 Introduction :

Dans n'importe quelle activité industrielle, la suspension de la production signifie des pertes coûteuses qui doivent être évitées impérativement. A partir de ce constat, la bonne maîtrise des équipements et de leurs défaillances, ainsi que les politiques et les techniques qui permettent de les rétablir, est devenue essentielle pour assurer la rentabilité sur le plan économique. Cela a conduit à la naissance d'une discipline stratégique, qui englobe l'ensemble des connaissances et procédures dans ce contexte, connue sous le nom de « maintenance industrielle ». Dans ce qui suit, nous introduisons quelques généralités de la maintenance, cela comprend quelques notions de base, les méthodes stratégiques et les opérations comprises dans ce domaine, ainsi que les modes de défaillances et leurs caractéristiques. Enfin, nous présenterons le concept de la sûreté de fonctionnement avec les paramètres fondamentaux sur lesquels il est fondé et les études qu'il intègre.

I.2 Maintenance :

I.2.1 Définition normalisée :

D'après l'AFNOR, la maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Cette définition AFNOR peut être complétée par le document d'introduction à la maintenance qui précise : « Bien maintenir, c'est assurer ces opérations à un coût optimal ». Notons que les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques : l'action technique est encadrée et pilotée par des actions de gestion (économie et administration) et de management, ce qui implique une large polyvalence. La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

Maintenir : comprend la notion de « surveillance » et « prévention » sur bien en fonctionnement normal.

Rétablir : comprend la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.

État spécifié ou service déterminé : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.

Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique[1].

I.2.2 Différentes formes de maintenance :

I.2.2.1 Concepts :

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

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Les événements qui sont à l'origine de l'action : référence à un échéancier, relation à un type d'événement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), l'apparition d'une défaillance.

Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.

Les opérations de maintenance proprement dites : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.

Les activités connexes : maintenance d'amélioration, rénovation, reconstruction, modernisation, travaux neufs, sécurité, etc.

Cette réflexion terminologique et conceptuelle représente une base de référence pour :

L'utilisation d'un langage commun pour toutes les parties (conception, production, prestataires de services, etc.)

La mise en place de systèmes informatisés de gestion de la maintenance .

I.3 Méthodes de Maintenance :

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

Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF X 60-000 les méthodes de maintenance [2]

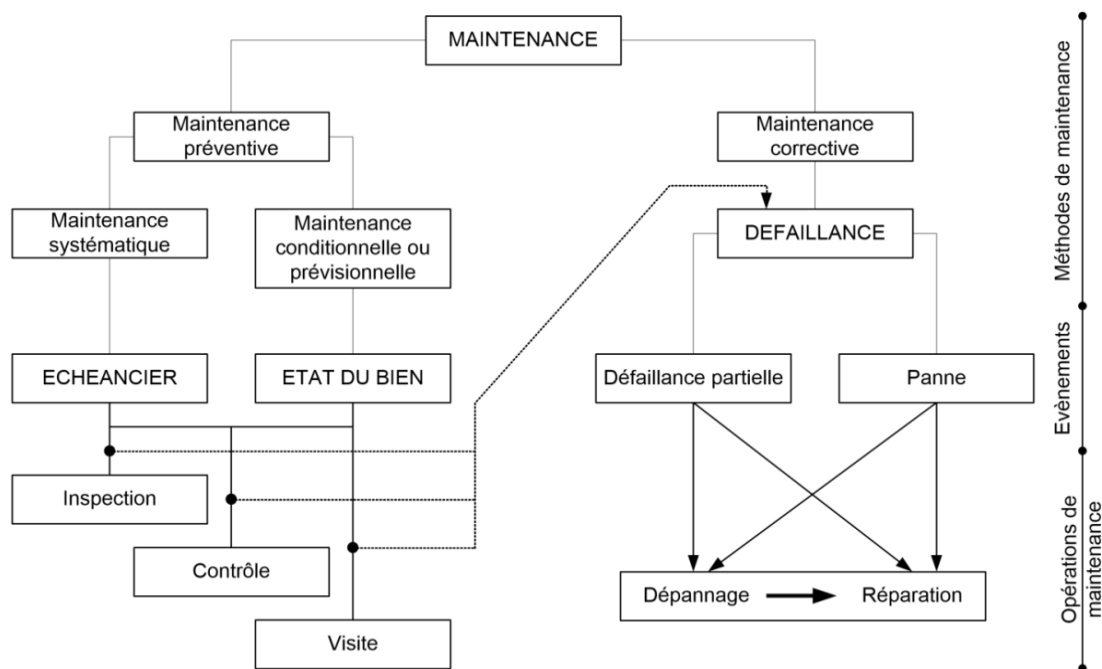


Figure I. 1: Les méthodes de maintenance

I.4 Maintenance corrective :

La maintenance corrective appelée parfois curative (terme non normalisé) a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation. Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus [3].

I.5 Maintenance préventive :

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation.

L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter [4].

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I.5.1 But de la maintenance préventive :

Augmenter la durée de vie des matériels

Diminuer la probabilité des défaillances en service

Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne

Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective

Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions

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

Améliorer les conditions de travail du personnel de production

Diminuer le budget de maintenance

Supprimer les causes d'accidents graves [5].

I.5.2 Maintenance préventive systématique :

Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage (produites). Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc.

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

Cette méthode nécessite de connaître :

Le comportement du matériel

Les modes de dégradation

Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries [6].

Remarque : de plus en plus, les interventions de la maintenance systématique se font par échanges standards.

I.5.3 Cas d'application :

Équipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc.

Équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avions, trains, etc.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Équipement ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimiques ou métallurgiques).

Équipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteurs thermiques), etc.

I.5.4 Maintenance préventive conditionnelle :

Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.)[7].

Remarque :

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé). La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tous les matériels sont concernés.

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

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

Le niveau et la qualité de l'huile

Les températures et les pressions

La tension et l'intensité des matériels électriques

Les vibrations et les jeux mécaniques Etc.

Certaines méthodes comme l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile, ... sont très riches quant aux informations recueillies. Leur compréhension autorise la prise à bon escient, de décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle. La surveillance est soit périodique, soit continue.

I.6 Avantage :

La connaissance du comportement se fait en temps réel à condition de savoir interpréter les résultats. A ce niveau, l'informatique prend une place primordiale. Le matériel nécessaire pour

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est

souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis il est rentabilisé rapidement. Cette méthode de maintenance, pour être efficace, doit dans tous cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel. Ces méthodes doivent être dans la mesure du possible standardisées entre les différents secteurs (production et périphériques) ; ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel. Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être de plus en plus fiables, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée.

La maintenance préventive diminuera quantitativement d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle.

I.7 Opérations de maintenance :

Ne sont vues ici que les opérations essentielles. Pour le reste, se référer à la norme NF X 60-010

I.7.1 Opérations de la maintenance corrective :

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- Test : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- Détection : ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- Localisation : ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- Diagnostic : ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- Dépannage, réparation : ou remise en état (avec ou sans modification).
- Contrôle : du bon fonctionnement après intervention.
- Amélioration éventuelle : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- Historique : ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure [8].

I.7.2 Opérations de la maintenance préventive :

- Inspection : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).

- Contrôle : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.

- Visite : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.

- Test : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

- Echange standard : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.

- Révision : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau 4.

Les trois premières opérations sont encore appelées « opérations de surveillance ». Elles caractérisent parfaitement la phase d'apprentissage et sont absolument nécessaires si on veut maîtriser l'évolution de l'état réel d'un bien. On accepte donc de payer pour savoir puis pour prévenir. Elles sont effectuées de manière continue ou à intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou sur le nombre d'unités d'usage[9] .

I.7.3 Autres opérations :

- 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.

- Échanges 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 spécification 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[10] .

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

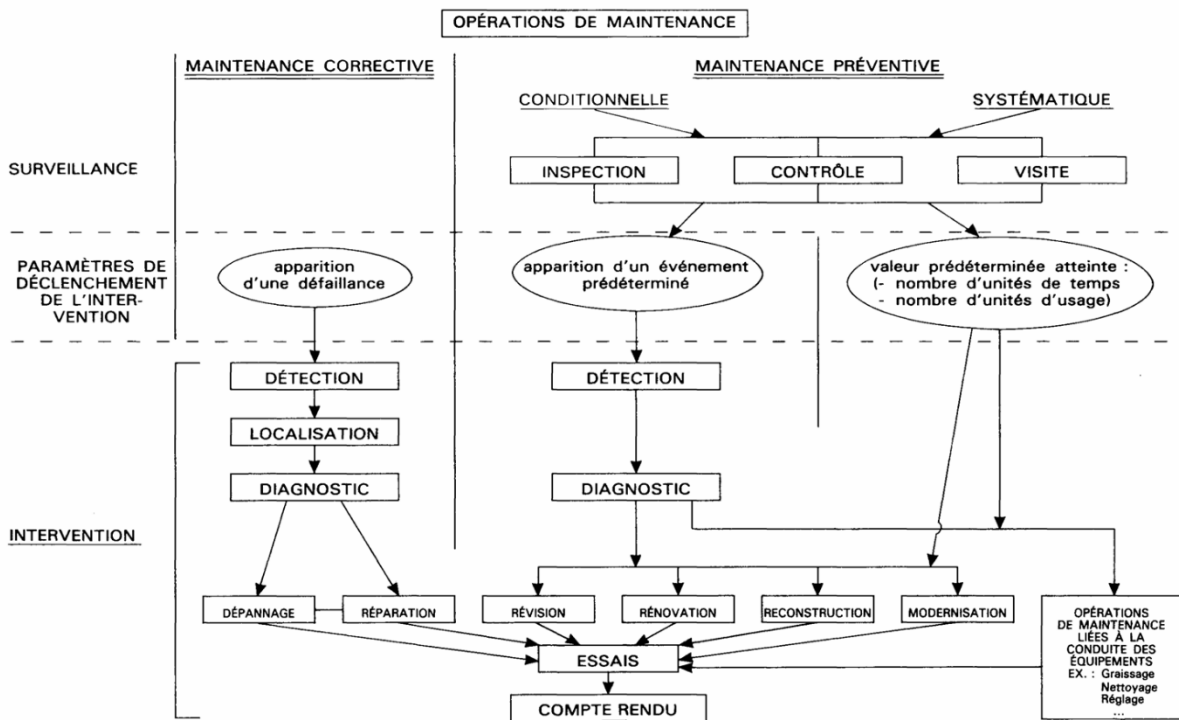


Figure I. 2: Les opérations de maintenance

I.8 Sûreté de fonctionnement (SDF ou F.M.D.S) :

Les préoccupations dites de sécurité sont très présentes dans le monde des machines-outils ou dans les procédés continus comme la pétrochimie. Dans les applications de type manufacturier ou batch, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Dès lors que la sécurité ou la

Disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, en cas de dysfonctionnement, il convient de remettre le système en conditions de fonctionnement initial : c'est là qu'intervient la maintenabilité. Ces quatre caractéristiques constituent la sûreté de fonctionnement d'un dispositif.

I.8.1 Fondamentaux de la sûreté de fonctionnement :

Quatre composantes Le terme "sûreté de fonctionnement", inventé voici trente ans pour englober plusieurs concepts, n'a pas d'équivalent exact en langue anglaise. En France, la sûreté de fonctionnement regroupe quatre notions [11] .

Fiabilité :

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminées. le terme « fiabilité » est utilisé comme une caractéristique indiquant une probabilité de succès. Maintenabilité :

Dans des conditions données d'utilisation, la maintenabilité est l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits. le terme « maintenabilité » est également défini comme une caractéristique indiquant une probabilité pour que le dispositif soit réparé dans un intervalle de temps donné. la maintenance ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

Disponibilité :

Aptitude d'un dispositif (équipement, système, service,...) sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de la logistique de maintenance, à remplir ou à être en état de remplir une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné.

Sécurité :

Aptitude d'un système à ne pas générer, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Probabilité que le système évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

I.8.2 But de la sûreté de fonctionnement :

La sûreté de fonctionnement est une notion générique qui mesure la qualité de service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée. Cette confiance justifiée s'obtient à travers une analyse qualitative et quantitative des différentes propriétés du service délivré par le système, mesurée par les grandeurs probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité [11].

I.9 Quelques indicateurs :

Certains indicateurs vont caractériser le fonctionnement prévu du système, tels que le MTTF, le MDT et le MUT[10].

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Le MTTF : (Mean Time To [first] Failure) est l'estimation de la durée moyenne s'écoulant entre la mise en service du système et la survenance de la première panne.

Le MDT : (Mean Down Time) est le temps moyen séparant la survenance d'une panne et la remise en état opérationnel du système. Il se décompose en plusieurs phases :

- durée de détection de la panne (1)
- durée de diagnostic de la panne (2).
- durée d'intervention jusqu'au début de la réparation (3)
- durée de la réparation (4).
- durée de remise en service du système (5).

Le MUT : (Mean Up Time) est le temps moyen qui sépare une remise en service opérationnelle du système de la survenance de la panne suivante.

Ces deux derniers indicateurs ne sont pertinents que dans le cas de systèmes réparables. Leur somme $MUT + MDT$ représente le temps moyen qui sépare deux pannes consécutives du système. On le note MTBF, comme Mean Time Between Failures.

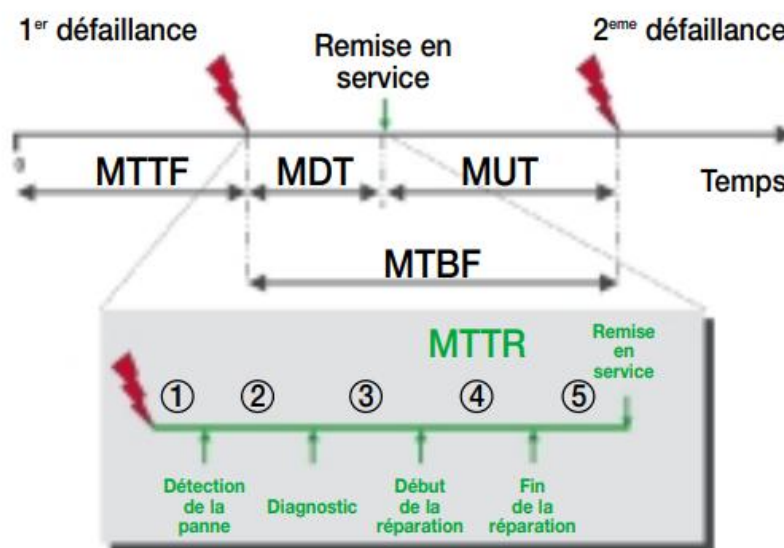


Figure I. 3: Les indicateurs de maintenance

I.10 Etudes de la sûreté de fonctionnement :

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Elles constituent un préalable indispensable à la conception d'un système voulu sûr, et permet d'aider à la décision en :

Comprenant et identifiant les risques.

Optimisant l'architecture et comparant des solutions différentes.

Optimisant les moyens de soutien en comparant des solutions.

Justifiant les choix de façon rationnelle et démontrée.

Vérifiant la bonne atteinte des objectifs de sûreté de fonctionnement.

Elles peuvent aussi aider à l'optimisation en :

Diminuant le nombre de pannes qui seront observées durant la vie du système.

Optimisant économiquement la conception par le dimensionnement des équipements et des architectures au "juste nécessaire".

Rendant la maintenance plus ciblée et plus efficace.

Dimensionnant au plus juste les moyens de soutien nécessaires (stocks de pièces de rechange)

I.11 Etape par étape :

La première étape consiste à analyser rigoureusement le besoin pour comprendre et identifier l'ensemble des risques, et envisager leurs conséquences. Ensuite, des niveaux d'acceptabilité sont attribués pour ces risques (on parle d'objectifs de F, M, D et/ou S selon les systèmes). L'identification précise de ces risques va aider à la rédaction du cahier des charges du système, précisément sur ses parties critiques. Il faudra alors imaginer des solutions techniques, des architectures adaptées qui, toutes, seront quantifiées d'un point de vue sûreté de fonctionnement, comparées entre elles et, si nécessaire, optimisées. Une fois la solution retenue, il sera nécessaire de préciser les conditions d'une exploitation la plus efficace possible en :

Définissant les opérations de maintenance préventive nécessaires pour maintenir les caractéristiques de sûreté de fonctionnement au niveau voulu, sans dégradation des équipements préjudiciable à l'une des quatre composantes.

Dimensionnant les stocks de pièces de rechange au plus juste, sans dégrader la disponibilité du système

I.11.1 Etude périphériques :

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Cette recherche de l'optimisation des tailles de stocks de pièces de rechange (suffisamment de pièces en regard de l'aptitude du système à tomber en panne, mais pas trop de pièces pour éviter des immobilisations financières inutiles) a fait l'objet d'études particulières où ce souci d'optimisation est couplé avec une démarche analogue sur :

La maintenance des équipements (pas trop fréquemment pour ne pas grever la disponibilité du système, mais suffisamment pour ne pas laisser se développer une dérive importante de la fiabilité).

L'ordonnancement des transports de pièces (par route, mer ou avion). Il en résulte une méthodologie d'approche globale, appelée soutien logistique intégré, complémentaire aux études de sûreté de fonctionnement dans les milieux industriels. Ainsi il en est de même de la compatibilité électromagnétique, science qui s'intéresse aux influences réciproques des équipements susceptibles d'émettre des ondes et ainsi de perturber le fonctionnement d'autres appareils physiquement proches ou reliés.

I.11.2 En pratique :

L'étude de sûreté de fonctionnement comporte deux volets complémentaires :

Une analyse fonctionnelle, qui va détailler la manière dont le système va opérer dans toutes ses phases de vie ainsi que les autres systèmes avec lesquels il va pouvoir interagir.

Une analyse dysfonctionnelle, qui vise à imaginer l'ensemble des défaillances pouvant survenir n'importe où dans le système, seules ou combinées entre elles, et à analyser l'impact de ces pannes.

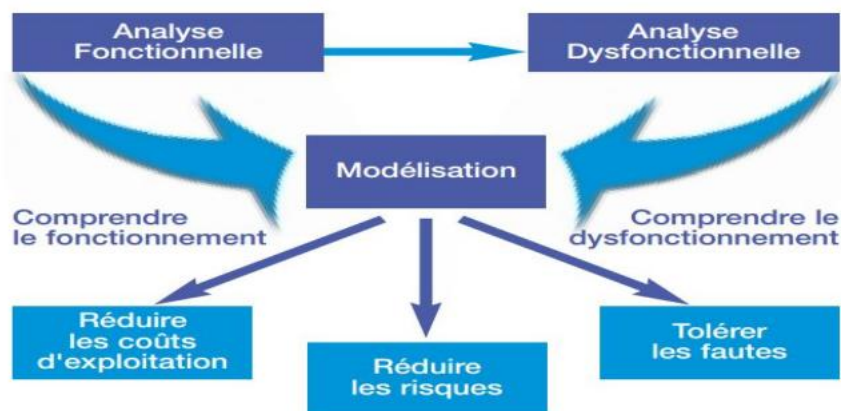


Figure I. 4: Les volets complémentaires de SDF

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Les résultats de ces deux études sont mis en commun dans une modélisation du système qui va représenter virtuellement celui-ci avant sa réalisation, tant dans son fonctionnement attendu que dans les pannes susceptibles de lui arriver.

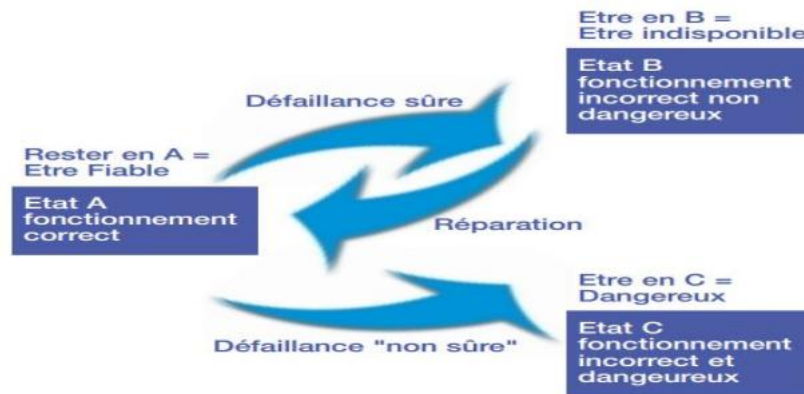


Figure I. 5:La modélisation de système SDF

En étudiant cette modélisation, il devient alors possible de valider ou invalider une solution technique, optimiser des choix architecturaux, remplacer des composants critiques, ceci dans le but de :

Réduire au maximum les risques.

Réduire au maximum les coûts d'exploitation.

Tolérer, dans la mesure du possible, certaines fautes en autorisant un fonctionnement en mode dégradé sous certaines conditions.

I.12 Conclusion :

La maintenance est une fonction essentielle de l'entreprise ; ses objectifs vont au-delà de remettre en état l'outil de travail, mais surtout d'anticiper des événements qui interviennent dans un environnement d'incertitudes, et de contribuer à la performance globale du système de production.

Chapitre II : Concepts de fiabilité appliqués à la maintenance

II.1 Introduction :

Après avoir présenté les notions générales de la maintenance dans le chapitre précédent, ce chapitre est consacré à l'analyse de la fiabilité et son rôle dans l'optimisation de la maintenance préventive.

II.2 Fiabilité :

II.2.1 Définition :

La fiabilité est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un temps donné (NF EN 13306).

Elle peut également être définie comme « la caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant un temps donné » [1][2]

La notion de temps peut prendre différentes formes :

Nombre de cycles effectués (machine automatique) ;

Distance parcourue (matériel roulant) ;

Tonnage produit (équipement de production).

II.2.2 Fonction de fiabilité :

La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée. Nous la désignons, dans ce qui suit par $R(t)$ où t désigne la durée de la mission.

La définition de la fiabilité montre bien que son domaine englobe les probabilités, donc les statistiques et les mathématiques.

Exprimé mathématiquement, c'est la probabilité que l'équipement fonctionne sans défaillance (ne tombe pas en panne avant l'instant t) jusqu'à l'instant t (fig2.1 (b)) :

$$R(t) = P\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (II.1)$$

Où T est une variable aléatoire qui caractérise les durées de vie d'un équipement.

La fonction de survie ou de fiabilité est décroissante en fonction de la variable t . Elle vérifie les propriétés :

$$\lim_{t \rightarrow 0} R(t) = 1 \quad (\text{II.2})$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad (\text{II.3})$$

Il existe deux types de fiabilité :

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

II.2.3 Fonction de répartition

La fonction de répartition de l'équipement est la probabilité complémentaire de la fonction de survie $R(t)$.

Cette fonction appelée aussi la fonction cumulative ou fonction de distribution définit la probabilité de défaillance de l'équipement avant l'instant t . (figII.1 (a)):

$$F(t) = P\{T \leq t\} = \int_0^t f(u) du \quad (\text{II.4})$$

La fonction de répartition $F(t)$ est une fonction croissante et bornée telle que :

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1 \quad (\text{II.6})$$

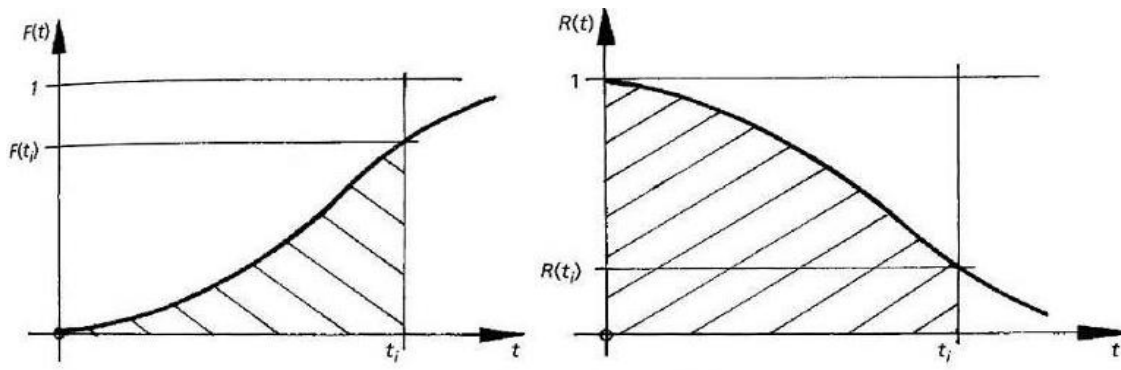
II.2.4 Fonction de densité de probabilité :

La fonction $f(t)$ définit la densité de probabilité des durées de vie de l'équipement à un instant donné. C'est une fonction mesurable et de mesure égale à l'unité. La probabilité de défaillance de l'équipement entre $[t, t + dt]$ est approximativement égale au produit $f(t)dt$:

Chapitre II : Concepts de fiabilité appliqués à la maintenance

La surface $F(t)$ définie sous la courbe de la figure II.2 représente la probabilité que le système soit en défaillance à l'instant t^* ; et la surface $R(t)$, la probabilité que le système soit en opération.

Logiquement, avec l'évolution du temps (déplacement de t^* vers la droite dans le graphique) la probabilité de défaillance augmente et la fiabilité décroît. (fig II.2).



(a) Fonction de Répartition

(b) Fonction de Fiabilité

Figure II. 1: Courbes paramétriques de la fiabilité

Si $F(t)$ est une fonction continue, alors on peut définir une fonction de densité $f(t)$

(II.7)

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt}$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{dF(t)}{dt} \\ &= - \frac{dR(t)}{dt} \end{aligned}$$

II.2.5 Fonction de risque instantané ou taux de panne :

Chapitre II : Concepts de fiabilité appliqués à la maintenance

La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Nous le désignons par $\lambda(t)$.

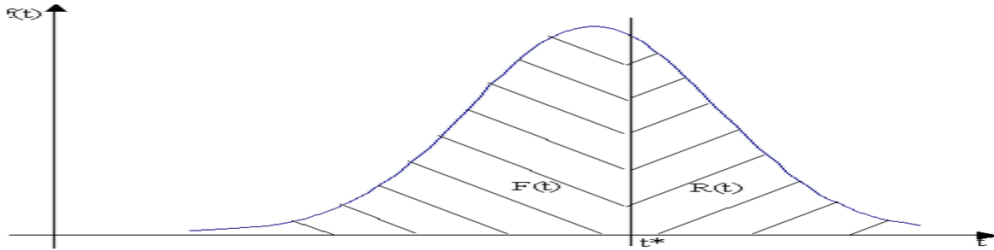


Figure II. 2: La fonction densité de durée de vie

La fonction $\lambda(t)dt$ est la probabilité conditionnelle de défaillance de l'équipement à un instant $t+dt$ sachant qu'il a survécu jusqu'à l'âge t sans défaillance. C'est une fonction positive, définie par :

$$\begin{aligned} \lim_{dt \rightarrow 0} \lambda(t)dt &= P(t < T \leq t + dt / T > t) \text{ (II.8)} \\ &= \frac{P(t < T \leq t + dt \cap T > t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{P(t < T \leq t + dt)}{P(T > t)} \end{aligned}$$

La fonction du taux de défaillance est très importante dans l'analyse de la fiabilité parce qu'elle indique le taux de vieillissement du système.

Des Équations (II.7) et (II.8), nous déduisons l'expression du taux de défaillance par :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{(II.9)}$$

L'allure du taux de panne en fonction du temps est souvent représentée par la fonction de la (fig II.3.) Le taux varie selon une courbe qui prend l'allure d'une baignoire.

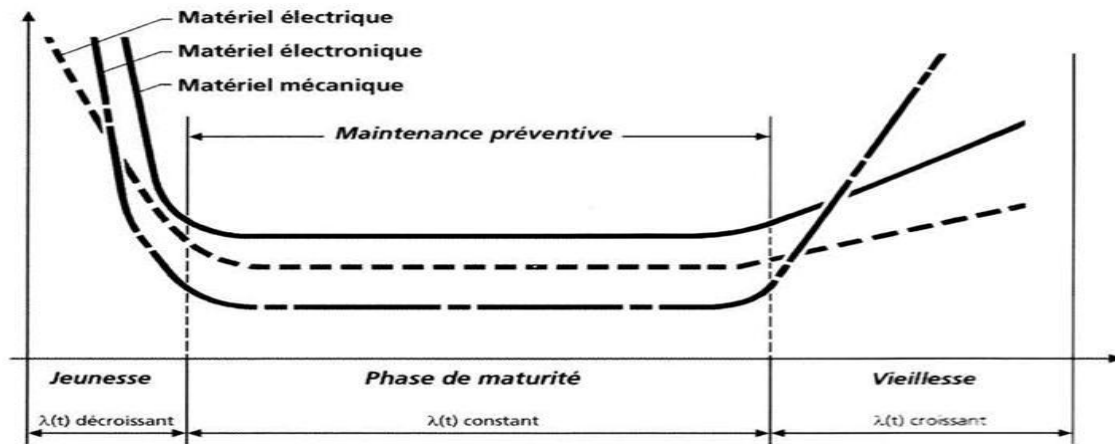


Figure II. 3: Courbe en baignoire du taux de défaillance

Cette courbe met en évidence trois périodes distinctes :

Zone (1). Période de jeunesse (rodage).

Le taux de défaillance décroît relativement vite après élimination des composants de qualité médiocre ou mal montés.

Zone (2). Période de maturité (pleine activité).

Le taux de défaillance est constant. C'est la période de vie utile (ou période de pannes fortuites).

Zone (3). Période de vieillesse ou d'usure.

Les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure des composants, $\lambda(t)$ croît avec le temps du fait de la dégradation du matériel (usures mécaniques, fatigue, etc....).

Cette courbe en baignoire montre bien que la maintenance préventive n'est réellement justifiée que pour la phase de maturité. Dans cette période, le taux de défaillance est sensiblement constant et égal à l'inverse de l'indice de fiabilité : MTBF (Mean Time Between Failure). La MTBF, ou moyenne des temps de bon fonctionnement, est la valeur moyenne des temps entre deux défaillances consécutives.

De l'équation (II.9) et sachant que :

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{II.10})$$

Nous obtenons :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (\text{II.11})$$

En intégrant les membres, on obtient :

Nous pouvons en déduire, une relation entre le taux de défaillance et la fiabilité :

$$\lambda(t) = -\frac{d \log R(t)}{dt} \quad (\text{II.12})$$

En intégrant les deux membres de 0 à t, sachant que $R(0) = 1$:

$$R(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(t) dt \right) \quad (\text{II.13})$$

Où t est la durée de la mission considérée.

II.3 Relation entre la fiabilité et la maintenance :

La maintenance et la fiabilité sont étroitement liées dans le domaine industriel. La fiabilité représente la probabilité qu'un équipement accomplisse sa fonction sans défaillance pendant une durée donnée, tandis que la maintenance regroupe l'ensemble des actions visant à maintenir ou à rétablir cet équipement dans un état de fonctionnement optimal.

Une politique de maintenance efficace, notamment la maintenance préventive, permet d'augmenter le temps moyen entre défaillances (MTBF), de réduire le taux de défaillance et, par conséquent, d'améliorer la disponibilité des systèmes.

La complémentarité entre les différents types de maintenance est essentielle : la maintenance préventive, qu'elle soit systématique ou conditionnelle, anticipe les défaillances, alors que la maintenance corrective intervient après leur apparition, influençant ainsi directement la fiabilité opérationnelle.

En résumé, la fiabilité est une caractéristique intrinsèque du système, tandis que la maintenance constitue le moyen principal de la préserver et de l'améliorer.

II.4 Analyse de la fiabilité par les lois de probabilité :

II.4.1 Analyse de la fiabilité à partir de la loi Gamma :

Chapitre II : Concepts de fiabilité appliqués à la maintenance

La loi gamma correspond à la distribution de l'instant d'occurrence du α -ième évènement dans un processus de Poisson.

Soit $\{T\}$ le vecteur représentant les durées inter évènements (les temps entre les défaillances successives d'un système). Si ces durées sont des variables aléatoires indépendantes et

identiquement distribuées selon une loi exponentielle de paramètre β , alors le temps cumulé d'apparition de ces défaillances suit une loi Gamma de paramètre (α, β) [4][6].

Sa fonction de densité de probabilité est :

$$f(t) = \frac{\beta^\alpha \cdot t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\beta t} \quad t \geq 0, \alpha \geq 1 \text{ et } \beta \geq 0 \quad (\text{II.14})$$

1. T est la variable aléatoire continue qui suit une loi gamma avec les paramètres α et β
2. α est le paramètre de forme (strictement positif)
3. β est le paramètre d'échelle (strictement positif)

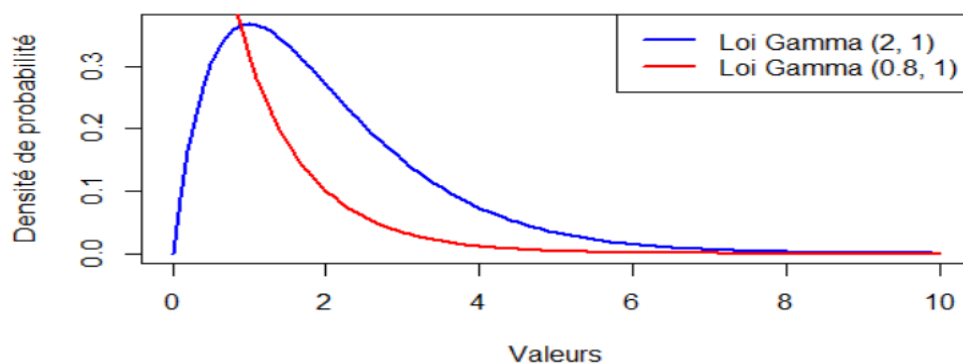


Figure II. 4: Graphes de deux densités de loi Gamma

II.4.2 Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle :

La loi exponentielle possède de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie, en particulier dans l'étude de fiabilité d'un équipement. Elle intervient également dans l'analyse des phénomènes d'attente.

Exemples :

La durée de vie utile d'un composant électronique

Le temps entre deux arrivées consécutives à un guichet automatique

Le temps entre deux défaillances consécutives d'un système informatique

Le temps de service à un guichet de pièces détachées d'une usine.

Soit λ un réel strictement positif. Une variable aléatoire T suit une loi exponentielle de paramètre λ . Si sa densité de probabilité f est définie sur l'intervalle $[0, +\infty[$ [Par : [3][5] .

$$f(x) = \lambda e^{(-\lambda x)} \quad (\text{II.15})$$

II.4.3 Analyse de la fiabilité à partir de loi de Weibull :

La loi la plus fréquemment utilisée dans le traitement des collectes des données est la distribution de Weibull et ceci pour plusieurs raisons :

elle décrit alternativement les trois phases de la vie d'un matériel, en fonction de son paramètre de forme β ;

elle se justifie par la théorie des valeurs extrêmes : la panne précoce d'un composant, détermine le bon fonctionnement du matériel, c'est le maillon (l'élément) le plus faible qui détermine le bon fonctionnement d'un dispositif.

Le principe de la distribution de Weibull est associé à l'étude de la probabilité de défaillance ou de succès. C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,). 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 [7].

Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend de ses deux paramètres suivants : α et β .

La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression :

$$f(t; \psi) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{II.16})$$

Où $t \geq 0, \psi = (\alpha; \beta), \alpha > 0, \beta > 0$

Le paramètre de forme β (sans unité) qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance.

Le paramètre d'échelle α (unité de temps) qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.

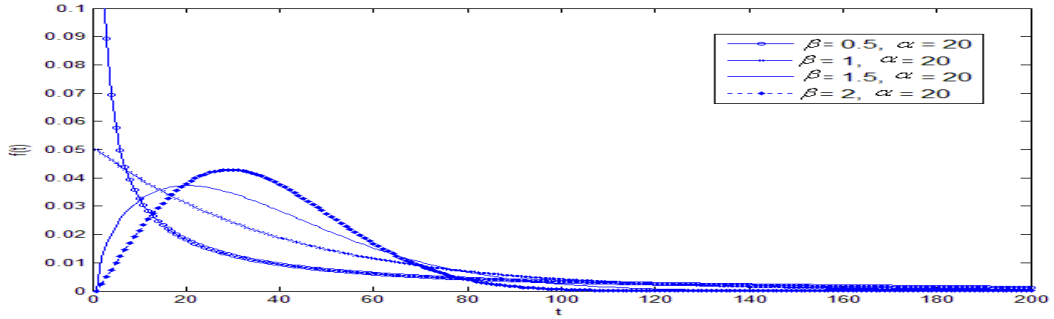


Figure II. 5: Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de β

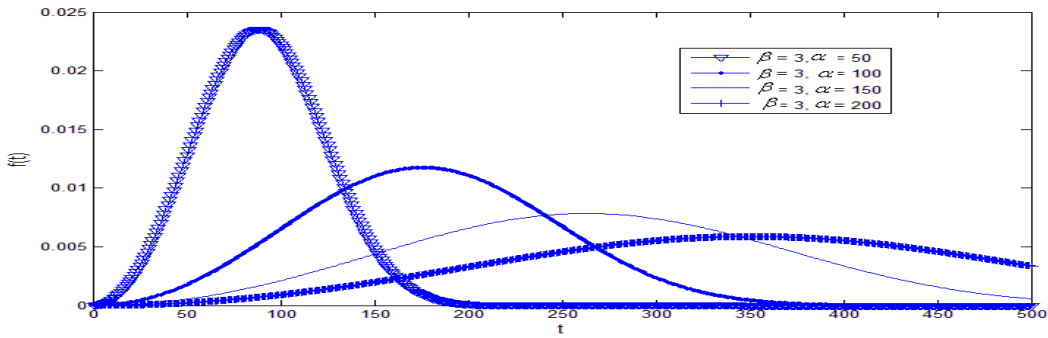


Figure II. 6: Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de α

La fonction fiabilité s'écrit :

$$R(t; \psi) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{II.17})$$

Le taux de défaillances

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.18})$$

La durée de vie moyenne ou MTTF :

Le temps moyen à la première panne (noté MTTF), lorsque les X_i suivent une loi de Weibull de paramètre $(\alpha; \beta)$, est défini par l'espérance des temps à la première défaillance :

$$MTTF = \alpha \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (\text{II.19})$$

Avec Γ la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (\text{II.20})$$

Le comportement des temps de défaillances issues de Collecte de données est souvent modélisé par une distribution de Weibull et une question fondamentale est de décider si [5] :

– $\beta < 1$ ($\lambda(t)$ décroît) : Le composant est dans sa période infantile ou de défauts de jeunesse. Certains composants d'un lot sont moins robustes que les autres (mauvaise fabrication, mauvais stockage, mauvais montage) ; leur défaillance se manifeste pour des contraintes plus faibles. Leur élimination et leur remplacement permettent de retrouver le taux de défaillances normal des composants.

– $\beta = 1$ ($\lambda(t)$ constant) : La période est dite de vie utile ou de panne fortuite. Les défauts matériels écartés, le système est dans sa phase de vie principale. Les défaillances qui surviennent durant cette période ont pour cause des événements aléatoires indépendants du temps et de l'âge du système.

Le modèle de Weibull se réduit à un modèle exponentiel.

– $\beta > 1$ ($\lambda(t)$ croît) : période de vieillissement, d'usure ou de dégradation. Le taux de défaillance est croissant en fonction du temps. Le stress, la fatigue, la corrosion etc. détériorent le système, ce qui accentue la probabilité qu'une défaillance est lieu durant cette période.

Cette évolution est connue sous le nom de « courbe en baignoire » comme le montre la figure (II. 7)

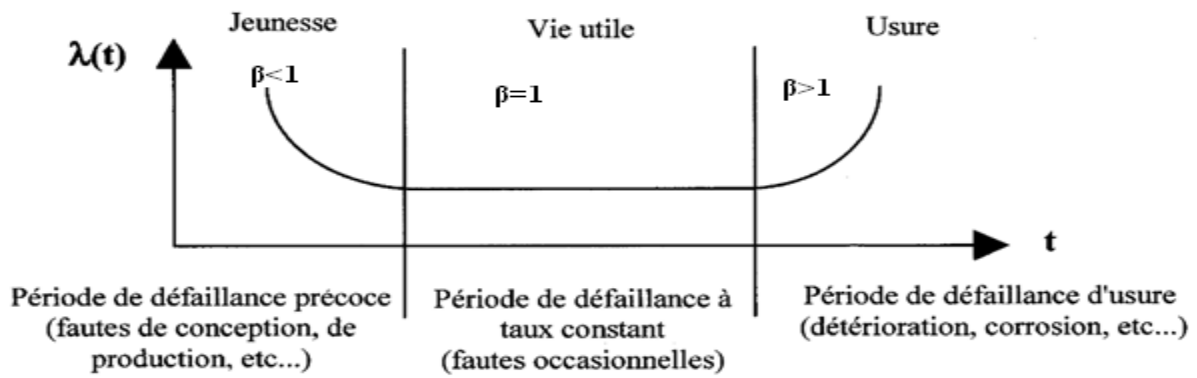


Figure II.7: Représentation théorique de l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps

II.5 Conclusion :

La maintenance, autrefois considérée comme une activité secondaire, s'impose aujourd'hui comme une fonction clé de l'entreprise. Par son impact, elle constitue un facteur de productivité, un élément de sécurité, ainsi qu'un levier de promotion et de valorisation de l'image de l'entreprise.

Toutefois, l'exploitant, pour la majorité de son parc de machines, dispose d'une influence limitée sur la fiabilité et la maintenabilité des équipements. En revanche, il peut s'organiser afin d'améliorer l'efficacité de la maintenance.

Chapitre III : Méthodes de détermination de la périodicité de maintenance préventive

III.1 Introduction :

L'un des problèmes économiques majeurs pouvant être traité à l'aide de la théorie de la fiabilité est la détermination de la périodicité optimale de la maintenance préventive. Dans ce cadre, on considère un système comportant un organe susceptible de défaillance, et l'on cherche à analyser les conséquences des différentes politiques de remplacement.

Deux stratégies principales peuvent être envisagées :

Soit attendre la défaillance de l'organe, ce qui peut entraîner une panne coûteuse et imprévue ;

Soit procéder à son remplacement à un instant prédéfini T_r , afin de limiter les interruptions non planifiées du service.

L'objectif est donc de déterminer une politique de maintenance permettant de minimiser les coûts tout en garantissant un niveau de fiabilité acceptable[1].

III.2 Approche de détermination de la périodicité :

III.2.1 Méthode basée sur le seuil de fiabilité :

Le seuil de fiabilité R_s représente la valeur critique à partir de laquelle un équipement est considéré comme présentant un risque élevé de défaillance. Lorsque la fonction de fiabilité $R(t)$ atteint ce seuil, une intervention de maintenance préventive est déclenchée afin d'éviter une panne. La détermination de ce seuil dépend de plusieurs facteurs, notamment les coûts de maintenance préventive et corrective, la criticité du système, ainsi que les exigences de sécurité et de disponibilité. Cette approche permet ainsi de baser les décisions de maintenance sur le comportement réel du système plutôt que sur un simple critère temporel. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite une estimation fiable de la fonction de fiabilité, ce qui peut constituer une limite dans certains contextes industriels[3] .

III.2.2 Modèles élémentaires de maintenance préventive :

Les interventions de maintenance préventive systématique reposent sur des opérations de remplacement planifiées en fonction du temps. Les modèles associés à ce type de maintenance visent à déterminer la date optimale de remplacement, en tenant compte de critères économiques et de disponibilité.

La détermination de la périodicité optimale du remplacement préventif des composants repose principalement sur deux approches : le modèle de remplacement basé sur l'âge et le modèle de remplacement par blocs. De nombreux travaux, tant expérimentaux que théoriques, ont été

développés afin d'identifier le moment le plus approprié pour effectuer ces opérations, dans le but de minimiser le coût global de maintenance.

L'objectif est de déterminer une périodicité optimale T_0 permettant de réduire les coûts liés aux interventions. On considère un ensemble de composants identiques installés sur plusieurs systèmes, avec :

C_p : le coût de remplacement préventif (composant en bon état),

C_f : le coût de remplacement correctif (composant défaillant), généralement supérieur à C_p

($C_f > C_p$).

Dans ce contexte, Barlow et Hunter ont proposé deux modèles fondamentaux pour optimiser les politiques de remplacement :

Les modèles de remplacement par blocs (Block Replacement Model), également appelés politiques à intervalle fixe ou politiques de type I ;

Les modèles de remplacement basés sur l'âge (Age Replacement Model), appelés aussi politiques de type II.

Dans le modèle de remplacement par blocs, les interventions préventives sont réalisées à intervalles réguliers T_0 , indépendamment de l'état ou de l'âge des composants. En cas de défaillance entre deux interventions planifiées, un remplacement correctif est effectué immédiatement. Ce modèle présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, car il ne nécessite pas de suivi individuel des équipements. Plusieurs variantes peuvent être envisagées, notamment le remplacement immédiat après défaillance, le report de l'intervention jusqu'à la prochaine échéance, ou la réalisation de réparations mineures.

À l'inverse, le modèle de remplacement basé sur l'âge repose sur le suivi individuel des composants. Chaque pièce est remplacée dès qu'elle atteint un âge prédéfini T_0 , sauf en cas de défaillance prématurée où un remplacement correctif est réalisé. Ce modèle permet une meilleure adaptation au comportement réel des équipements et conduit généralement à une optimisation plus précise des coûts.

Ainsi, ces deux approches constituent les bases des politiques de maintenance préventive, chacune présentant des avantages et des limites selon le contexte industriel et les objectifs recherchés[4].

III.3 Modélisation mathématique :

La modélisation mathématique des politiques de maintenance préventive consiste à représenter le comportement des défaillances des équipements ainsi que les coûts associés à l'aide de fonctions probabilistes. Elle permet d'exprimer le coût moyen de maintenance en fonction du temps et de

déterminer la périodicité optimale de remplacement. Dans ce cadre, deux modèles principaux sont utilisés : le modèle basé sur l'âge et le modèle de remplacement par blocs, qui seront présentés dans les sections suivantes.[5]

III.4 Modèles de remplacement par blocs (Block Replacement Model – type I) :

Le principe de la politique de remplacement basée sur le model – type I est représenté ci-dessus (figIII.1). Ce modèle consiste à remplacer l'ensemble des équipements à intervalles de temps fixes T , indépendamment de leur âge réel.

Si un composant subit une défaillance fortuite à l'intérieur de cet intervalle, un remplacement correctif d'urgence est immédiatement effectué, remettant l'équipement à neuf sans pour autant modifier le calendrier préventif initialement programmé (figIII.1). [6]

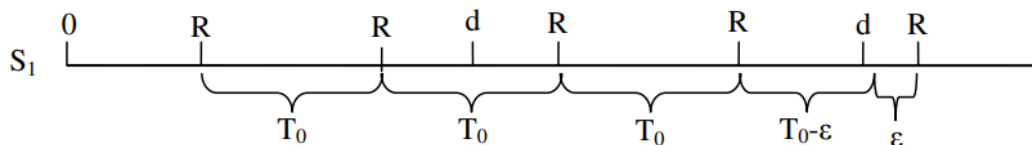


Figure III. 1: Remplacement à période fixe T_0

S_1 : système 1

R : remplacement

D : défaillance

T_0 : périodicité de remplacement

Le cas limite étant celui d'une pièce changée $\{T_0 - \epsilon\}$ pour défaillance et remplacée à T_0 pour maintenance préventive ($\epsilon \ll T_0$).

Le coût moyen attendu par unité de temps $C(T)$ associé à ce modèle, dans lequel les composants sont remplacés à l'âge T ou lors d'une défaillance, est donné par l'équation :

$$C(T) = \frac{C_p + C_f \times M(T)}{T} \quad (\text{III. 1})$$

C_p : le coût de remplacement préventif (composant en bon état),

C_f : le coût de remplacement correctif (composant défaillant), généralement supérieur à C_p ($C_f > C_p$).

$M(T)$: la fonction de renouvellement, représentant le nombre moyen attendu de pannes cumulées sur l'intervalle $[0, T]$.

Pour une loi de Weibull à deux paramètres (α, β) , la fonction de renouvellement $M(T)$ ne possède pas de forme analytique exacte simple. Cependant, pour des horizons opérationnels courants, elle est fidèlement modélisée par l'approximation directe de premier ordre :

$$M(T) \approx \left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta \quad (\text{III. 2})$$

En injectant cette expression dans la fonction objective, le coût moyen par unité de temps s'écrit :

$$C(T) = \frac{C_p + C_f \left(\frac{T^\beta}{\alpha}\right)}{T} \quad (\text{III. 3})$$

En séparant les termes pour mettre en évidence le comportement de la fonction, nous obtenons :

$$C(T) = \frac{C_p}{T} + \frac{C_f}{\alpha^\beta} T^{\beta-1} \quad (\text{III. 4})$$

Afin de minimiser le coût, on applique le principe fondamental en dérivant l'équation (III.4) par rapport au temps t , puis en annulant l'expression obtenue.

$$C'(T) = -\frac{C_p}{T^2} + (\beta - 1) \cdot \frac{C_f}{\alpha^\beta} T^{\beta-2} = 0 \quad (\text{III.5})$$

En multipliant l'ensemble de l'équation par T^2 pour éliminer les dénominateurs, nous obtenons la condition d'optimalité suivante :

D'où :

$$-C_P + (\beta - 1) \cdot C_f \left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta = 0 \quad (\text{III. 6})$$

$$(\beta - 1) \cdot \left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta = \frac{C_P}{C_f} \quad (\text{III.7})$$

On pose :

$$C_r = \frac{C_P}{C_f} \quad (\text{III. 5})$$

$$\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta = \frac{C_r}{(\beta - 1)} \quad (\text{III.6})$$

En appliquant l'exposant inverse $\frac{1}{\beta}$ de chaque côté pour isoler le rapport temporel, il vient :

$$\frac{T}{\alpha} = \left(\frac{C_r}{(\beta - 1)}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{III.7})$$

L'analyse du signe du dénominateur $(\beta - 1)$ permet de statuer sur l'existence et l'unicité de cet optimum économique :

Si $\beta \leq 1$: alors $(\beta - 1) \leq 0$. L'expression sous la puissance devient négative ou indéfinie, ce qui implique qu'aucune solution réelle positive n'existe. D'un point de vue économique, lorsque le taux de défaillance est constant ou décroissant ($\beta \leq 1$), le remplacement préventif n'est généralement pas justifié. La politique curative pure est alors optimale.

Si $\beta > 1$: alors $(\beta - 1) > 0$. Le terme devient strictement positif, garantissant l'existence et l'unicité d'un minimum réel T_0 . La courbe du coût global prend alors une allure caractéristique en "U", matérialisant le compromis parfait entre le coût de sur-maintenance (interventions préventives trop fréquentes) et le coût de sous-maintenance (subir la pénalité financière des pannes fortuites)

(Figure III. 1).



Figure III. 2: Courbe d'optimisation du coût total de maintenance en fonction de la périodicité T (Allure en "U")

III.5 Modèles basés sur l'âge (Age Replacement Model – type II) :

Le principe de la politique de remplacement basée sur l'âge est représenté ci-dessous (fig III.3.). Chaque composant est remplacé dès que son âge atteint la valeur prédéfinie T_0 , indépendamment de son état. En cas de défaillance avant cet instant, un remplacement correctif est effectué immédiatement. Après chaque intervention, l'âge du composant est remis à zéro, marquant ainsi le début d'un nouveau cycle de fonctionnement[7].

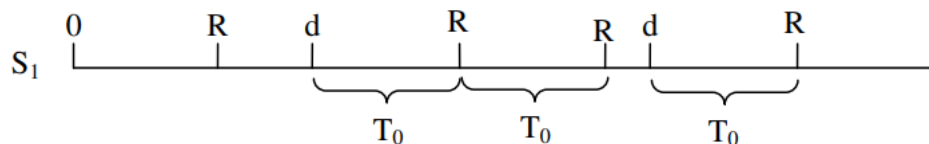


Figure III. 3: Remplacement lorsque l'âge de la pièce T_0 est atteint

S_1 : système 1

R : remplacement

D : défaillance

T_0 : âge de la pièce

Les différences par rapport au cas de remplacement par bloc sont les suivantes :

Le nombre de pièces à changer est réduit car on ne risque pas de changer une pièce qui vient d'être défaillante et remplacée.

Il faut connaître l'âge de chaque pièce, ce qui nécessite une organisation spéciale.

Les échanges préventifs sont plus coûteux car ils ne portent que sur une pièce à chaque fois.

Chapitre III : Méthodes de détermination de la périodicité de maintenance préventive

Le temps de défaillance est généralement modélisé par une loi de probabilité, notamment la loi de Weibull, ce qui permet de tenir compte du vieillissement du système.

Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(T_0) = \frac{C_p R(T_0) + C_f \cdot (1 - R(T_0))}{\int_0^{T_0} R(t) dt} \quad (\text{III. 8})$$

La valeur T_0 qui correspond à la périodicité de maintenance préventive est celle qui minimise $C(t)$.

$$C'(t) = \frac{[C_f f(t) - C_p f(t)] \int_0^t R(u) du - [C_f(1 - R(t)) + C_p R(t)] R(t)}{(\int_0^t R(u) du)^2} \quad (\text{III. 9})$$

$$C'(t) = 0 \quad (\text{III. 10})$$

$$\left[f(t) \int_0^t R(u) du \right] (C_f - C_p) - R(t) [C_f - R(t)(C_f - C_p)] = 0$$

$$\frac{1}{1 - \frac{C_p}{C_f}} = \frac{f(t) \int_0^t R(u) du + R(t)^2}{R(t)} \quad (\text{III. 11})$$

On pose :

$$C_r = \frac{C_p}{C_f} \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{1}{1 - C_r} = \lambda(t) \int_0^t R(u) du + R(t) \quad (\text{III. 13})$$

Dans le cas de loi de Weibull (qui est le cas le général : le matériel est mis en service à $t=0$)

Alors :

$$R(T)=e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{III. 14})$$

et l'équation (III.17) devient alors :

$$\frac{1}{1-C_r} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \int_0^t e^{-\left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta}} du + e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (\text{III. 15})$$

On pose :

$$y(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \int_0^t e^{-\left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta}} du + e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} = \frac{1}{1-C_r} \quad (\text{III.16})$$

Calculons la dérivée de $y(t)$

$$y'(t) = \frac{\beta}{\alpha} \frac{\beta-1}{\alpha^2} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-2} \int_0^t e^{-\left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta}} du + \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (\text{III. 17})$$

$$y'(t) = \beta \frac{\beta-1}{\alpha^2} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-2} \int_0^t e^{-\left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta}} du \quad (\text{III. 18})$$

Cas $\beta > 1$

$y'(t) \geq 0 ; \forall t > 0$ (Fig.III. 2)

L'équation :

$$y(t) = \frac{1}{1-C_r} \quad (\text{III. 19})$$

$y(t)$ a une solution unique pour $0 < C_r < 1$

Vérifions que la solution de l'équation correspond à un minimum pour le coût[2] .

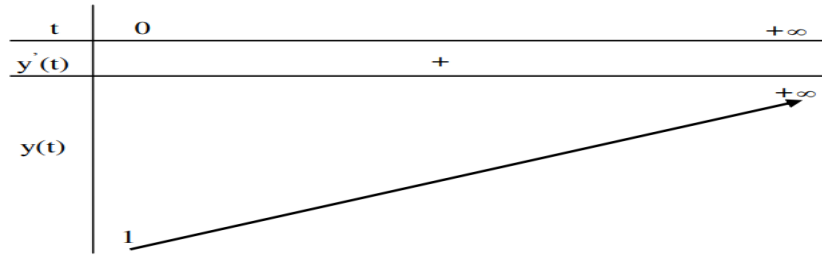


Figure III. 4: Cas de : $\beta > 1$

On étudie la limite de : $\lim_{t \rightarrow 0} C(t)$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} C(t)$.

$$\lim_{t \rightarrow 0} C(t) = +\infty \quad (\text{III. 20})$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (c(t)) = \frac{C_f}{\alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (\text{III. 21})$$

Dans ce cas, le cout moyen $C(t)$ a l'allure qui est représentée sur la (fig.III.3) Dans le cas d'un matériel d'usure ($\beta > 1$), ce type de maintenance préventive possède un intérêt $\forall C_r \in]0,1]$.

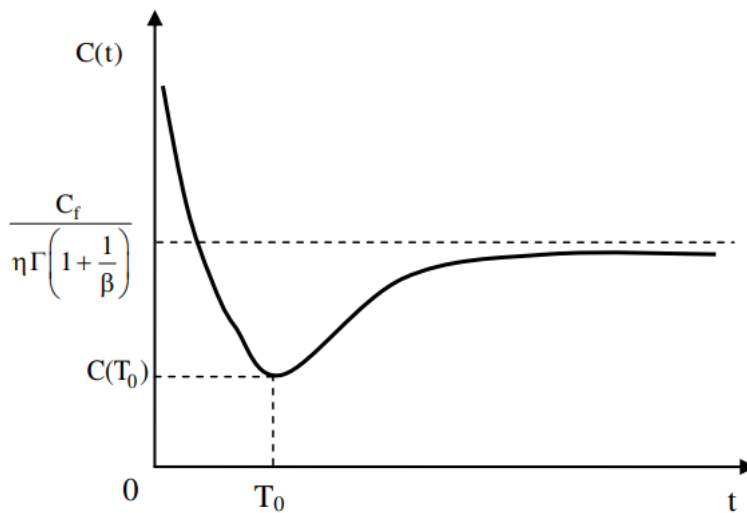


Figure III. 5: Allure de $C(t)$ dans le cas de $\beta > 1$

Cas $0 < \beta \leq 1$

Dans ce cas, ce type de maintenance préventive n'a pas d'intérêt.

III.6 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre montre que la détermination de la périodicité optimale de maintenance repose sur un compromis entre les considérations techniques (fiabilité) et économiques (coûts). Ces méthodes constituent une base essentielle pour l'application industrielle, qui sera développée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Application industrielle / Étude de cas

IV.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer les méthodes d'optimisation de la maintenance préventive, développées dans les chapitres précédents, à un cas industriel réel : l'étage 60 kV du poste de transformation 220/60/30 kV de SONEGAS à Tiaret. Sur la base de l'historique des 24 pannes enregistrées entre 2022 et 2025, les paramètres de la loi de Weibull sont estimés, puis les deux modèles d'optimisation (Type I et Type II) sont appliqués afin de déterminer la périodicité optimale de maintenance préventive T_0 qui minimise les coûts d'intervention tout en garantissant un niveau de fiabilité acceptable.

IV.2 Description générale du poste 220 /60/30 KV :

Le poste 220 /60/30 kV a été construit par Kharakib durant les années 70. Il assure trois fonctions principales.

L'interconnexion : Grâce à ses trois lignes 220 kV, ce poste assure l'interconnexion entre les wilayas de Tissemsilt, Saïda et Oued Sly. Il contribue également à l'alimentation des différentes zones de la wilaya de Tiaret à travers les départs 60 kV desservant Tiaret-ville, Sougueur et Frenda.

La distribution : Le poste de Tiaret présente une caractéristique particulière : il est directement relié à une centrale de production par trois arrivées 220 kV et quatre arrivées 60 kV.

Il joue ainsi un rôle essentiel dans la distribution de l'énergie électrique vers plusieurs wilayas et postes électriques de la région. Il assure notamment l'alimentation des postes de Tiaret-ville, Sougueur, Frenda et Tissemsilt, ainsi que de certains clients industriels raccordés au réseau 60 kV, tels que Sonacome et l'usine véhicule de liaison tout-terrain (VLTT).

La transformation : Le poste dispose de deux transformateurs 220/60 kV d'une puissance de 80 MVA chacun ainsi que de deux transformateurs 60/30 kV de 40 MVA chacun. Il assure ainsi la transformation de l'énergie électrique vers les niveaux de tension requis pour l'alimentation des réseaux de distribution et des installations industrielles de la région.

IV.3 Schéma monophasé équivalent du poste existant :

Le poste est composé de trois étages de tension 220 kV, 60 kV, 30 kV reliés entre eux par des transformateurs de puissance. Les niveaux 220 kV et 60 kV sont configurés selon un schéma à double jeu de barres avec un disjoncteur par départ. Ils sont également équipés d'un disjoncteur de couplage permettant le transfert des départs d'un jeu de barres à l'autre en cas de besoin.

La partie 220 kV est formée par :

Chapitre IV: Application industrielle / Étude de cas

Trois arrivées groupes 220 kV.

Deux transformateurs 220/60 YN/yn de 80 MVA chacun.

Deux travées lignes 220 kV : Oudi Sily et Saida.

Une travée de couplage.

Deux travées réserves équipées 220 kV.

La partie 60 kV est formée par :

Quatre arrivées groupes 60 kV.

Deux transformateurs 60/30 40 MVA chacun.

Sept travées ligne.

Une travée de couplage.

Deux travées réserves équipées 60 kV.

Une travée partiellement équipée.

La partie 30 kV existante est formé par des cellules 30 kV placées dans un bâtiment « bâtiment MT ». Ces cellules (arrivée transfo, couplage, départ) servent à alimenter 12 départs aériens en 30 kV.

Le système existant est occupé par un ensemble de protections électriques pour les départs ligne, transfo, couplage, avec une protection différentielle pour JDB (jeux de barres) 220 kV.

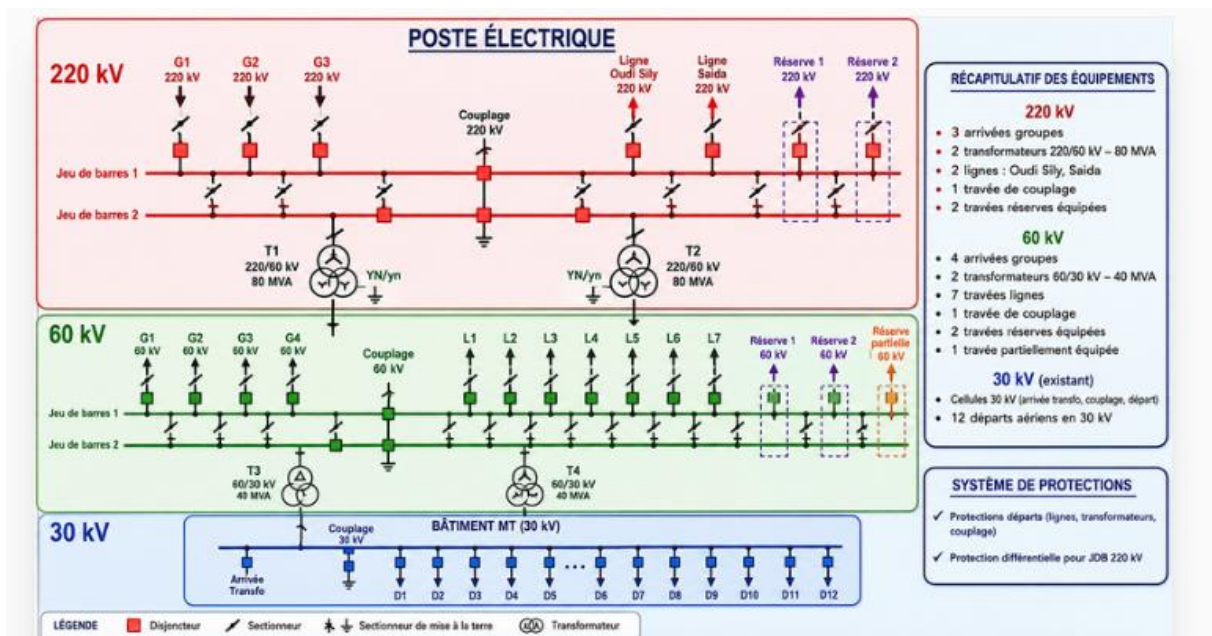


Figure IV. 1:Schéma synoptique du poste de transformation 220/60/30 kV

Dans le cadre de notre étude, nous avons délibérément opté pour l'étage 60 kV en raison de son rôle stratégique essentiel au sein du poste 220/60/30 kV. En effet, cet étage constitue un niveau

intermédiaire crucial assurant la liaison entre le réseau de transport haute tension et le réseau de distribution moyenne tension. Il regroupe un nombre important d'équipements critiques tels que les transformateurs de puissance, les départs lignes et les dispositifs de protection, ce qui en fait une zone particulièrement sensible aux défaillances. De plus, la diversité des équipements présents ainsi que l'importance des charges alimentées par les départs 60 kV offrent un cadre pertinent pour l'analyse de la fiabilité et l'optimisation de la maintenance. Enfin, la disponibilité des données d'exploitation et de maintenance relatives à cet étage a également motivé ce choix.

IV.4 Historique des pannes de l'étage 60 kV du poste de transformation :

Le tableau suivant présente l'historique des pannes enregistrées au niveau de l'étage 60 kV du poste STE de Tiaret durant la période allant du 12/02/2022 au 30/09/2025.

N°	Description de la panne	Date de défaillance	Date de remise en service	Temps d'arrêt
1	Dysfonctionnement des ventilateurs de transformateur 60/30kV N°1	12.02.2022	12.02.2022	9h
2	Déclenchement de ligne 60kV Tiaret ville	03.04.2022	03.04.2022	55min
3	Blocage de la protection différentielle transformateur N°1	24.04.2022	24.04.2022	7h
4	Manque courant continu sur la protection Défaillance disjoncteur de la travée transformateur 60/30 kV N°1	05.05.2022	06.05.2022	22h
5	La protection PP1 de la ligne Sougueur ne communique pas avec CCN	02.06.2022	05.06.2022	67h
6	Défaut au niveau de relais Buchholz transformateur 60/30kV N°1	15.07.2022	15.07.2022	18h
7	Manque de tension sur jeux de barre 60kV N°2	21.07.2022	21.07.2022	48min
8	La commande de sectionneur de barre 60 kV N°2 ne fonctionne pas à distance	05.08.2022	07.08.2022	46h
9	Déclenchement départ 60kV Frenda	09.08.2022	09.08.2022	18min
10	Blocage de la protection de distance Travée transformateur 60/30 kV N°1	28.12.2022	30.12.2022	46h
11	Claquage d'une boîte 60kV d'extrémité ph N°04	16.04.2023	17.04.2023	17h

	Travée ligne Sougueur			
12	Dysfonctionnement des ventilateurs transformateur 60/30kV N°1	05.08.2023	05.08.2023	9h
13	Déclenchement départ 60kV Tiaret ville	12.09.2023	12.09.2023	41min
14	Déclenchement arrive 60kV transformateur 60/30 kV N°1	03.11.2023	03.11.2023	19min
15	Déclenchement transformateur 60/30kV N°2	16.06.2024	16.06.2024	8h
16	Claquage d'une boîte 60kV tête de ligne Travée ligne Frenda	20.08.2024	20.08.2024	16h
17	Amorçage sur la chaine d'isolateurs ligne 60 kV Tiaret ville	27.09.2024	27.09.2024	14h
18	Déclenchement transformateur 60/30 kV N°1	13.01.2025	13.01.2025	5h
19	Déclenchement transformateur 60/30 kV N°2	24.02.2025	24.02.2025	4h
20	Déclenchement transformateur 60/30 kV N°2	18.04.2025	18.04.2025	5h
21	Défaut Protection neutre MT du transformateur 60/30 kV N°2	17.05.2025	17.05.2025	11h
22	Claquage d'une boîte sur la partie secondaire de transformateur 60/30kV N°2	27.05.2025	27.05.2025	14h
23	Déclenchement transformateur 60/30kV N°1	11.08.2025	11.08.2025	58 min
24	Baisse pression gaz SF6 sur le disjoncteur 60KV travée transformateur 60/30 kV N°2	30.09.2025	30.09.2025	13h

Tableau IV. 1: Historique des pannes

Les deux modèles cherchent à déterminer une période optimale de remplacement T_0 . Pour calculer cette période, il faut connaître :

La fonction de fiabilité $R(t)$.

IV.5 Les paramètres essentiels de la loi de Weibull :

Le Tableau suivant presente les paramètres essentiels de la loi de Weibull :

Les paramètres	La valeur
Paramètre de forme : Beta (β)	1.56
Paramètre d'échelle Alpha (α)	1825.09 jours
Paramètre de position Gamma (γ)	0

Tableau IV. 2: Les paramètres essentiels de la loi de Weibull

La valeur estimée du paramètre de forme $\beta=1,56 >1$, ce qui traduit un phénomène de vieillissement des équipements et un taux de défaillance croissant avec le temps.(fig IV.3).

Le remplacement de l'équipement à un âge prédéterminé permet d'intervenir avant l'entrée dans la phase de vieillissement critique, où le risque de défaillance devient significativement plus important.

Le taux de défaillance

$$\lambda(t) = 0.0008548 \cdot \frac{t^{0.56}}{1825,09}$$

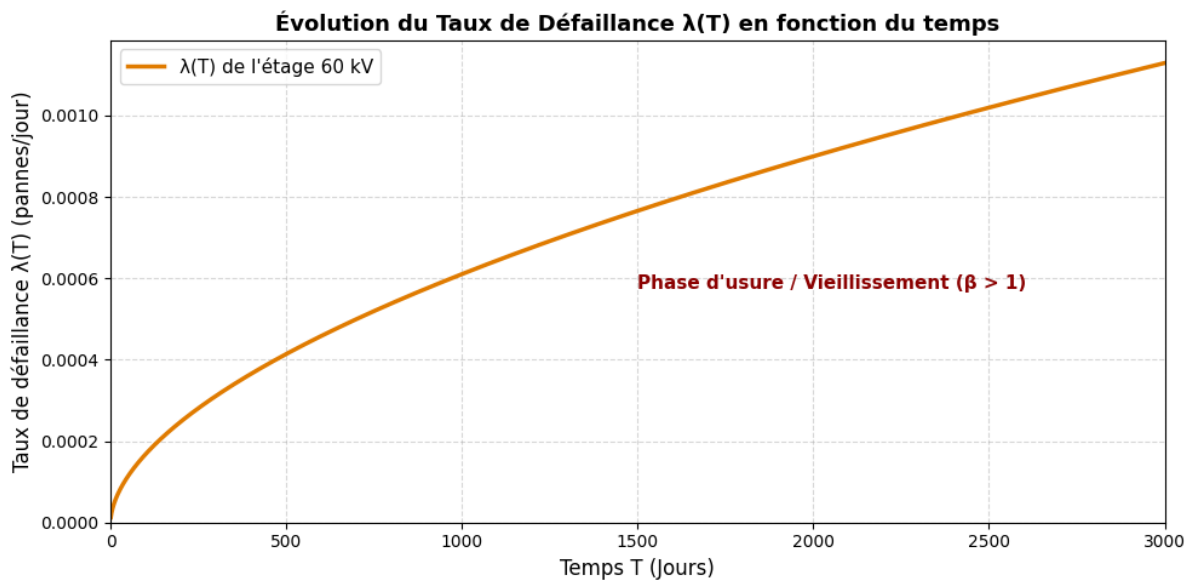


Figure IV. 2: Évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps de l'étage 60 kV

Ce taux croissant confirme que la maintenance préventive est techniquement et économiquement justifiée ($\beta > 1$), et que les deux modèles de remplacement peuvent être appliqués de manière pertinente.

IV.6 Analyse des coûts de maintenance et modélisation économique :

Afin d'associer l'analyse de la fiabilité, fondée sur les modèles de Weibull, à une évaluation économique concrète, nous présentons dans cette section la modélisation des coûts de maintenance appliquée à l'étage 60 kV du poste de Tiaret. Les paramètres économiques utilisés dans cette étude sont directement issus des données d'exploitation et de maintenance fournies par la SONEGGAZ.

Le **tableau IV.3** présente la répartition des 24 défaillances réelles enregistrées sur le site d'étude durant la période 2022-2025, ainsi que les coûts associés aux interventions de maintenance corrective et préventive.

Composants	Nombre de pannes	Coûts de remplacement correctif C_f (DA)	Coût de Remplacement Préventif C_p (DA)
Transformateur	11	7760	1500
Ligne de transmission	7	1528	400
Disjoncteurs	4	1347	400
Jeux de barre	2	1170	350

Tableau IV. 3: Répartition des pannes et coûts de remplacement des composants de l'étage HT

Afin d'associer l'analyse de la fiabilité à une évaluation économique concrète, nous présentons dans cette section la modélisation économique des stratégies de maintenance appliquées au poste HT de Tiaret. Les paramètres de coûts utilisés dans cette étude sont directement issus des données d'exploitation et de maintenance fournies par la SONELGAZ et sont résumés dans le tableau IV.3.

Le coût unitaire de remplacement correctif (C_f) représente la charge financière globale supportée par l'entreprise lorsqu'une défaillance imprévue survient. Dans la pratique, ce coût peut augmenter considérablement en raison du caractère critique des interventions correctives, principalement sous l'effet de deux facteurs.

La mobilisation d'urgence : dès l'apparition d'une panne, la SONELGAZ doit mobiliser immédiatement les équipes d'intervention ou les agents de permanence afin de rétablir le service dans les meilleurs délais. Ces interventions ont souvent lieu en dehors des heures normales de travail (travail de nuit, week-ends ou jours fériés), ce qui entraîne une augmentation significative des coûts de main-d'œuvre.

La logistique d'urgence et les dommages collatéraux : la nécessité de rétablir rapidement l'alimentation électrique impose fréquemment l'acheminement accéléré des pièces de rechange. Par ailleurs, une défaillance soudaine d'un équipement haute tension peut engendrer des contraintes électriques et mécaniques importantes, telles que des courants de court-circuit ou des arcs électriques, susceptibles d'endommager d'autres équipements connectés et d'accroître ainsi le coût global des réparations.

Le cas du transformateur de puissance illustre parfaitement cette situation. Lorsqu'une défaillance brutale survient, le coût unitaire de remplacement correctif atteint 7760 DA. En revanche, lorsqu'un remplacement préventif planifié est réalisé avant l'apparition de la défaillance ($C_p = 1,500$) DA), l'intervention s'effectue dans des conditions maîtrisées, sans mobilisation

d'urgence ni risque de dommages collatéraux. Le coût préventif ne représente alors qu'environ 20 % du coût correctif.

Cette logique économique s'applique à l'ensemble des équipements du poste. L'analyse des coûts montre que les transformateurs constituent les équipements les plus critiques sur le plan financier, puisqu'ils représentent plus de 81 % du coût total des remplacements correctifs.

Bien que l'arbitrage technico-économique diffère selon la nature des équipements, la détermination d'une périodicité optimale de maintenance préventive (T) à l'échelle globale du poste nécessite la définition d'un indicateur économique unique. À cette fin, nous introduisons le ratio moyen pondéré d'impact financier, noté ($\bar{k}$), qui permet de représenter de manière synthétique l'impact économique des défaillances de l'ensemble des équipements étudiés.

$$\bar{k} = \frac{\text{Coût de remplacement Correctifs cumulés}}{\text{Coût de remplacement Préventifs cumulés}} \quad (\text{IV.1})$$

Le calcul des coûts cumulés sur les 24 pannes donne :

Total des Coûts de remplacement Correctif Cumulés :

$$(11 \times 7760) + (7 \times 1528) + (4 \times 1347) + (2 \times 1170) = 103784 \text{ DA}$$

Total des Coûts de remplacement préventif Cumulés :

$$(11 \times 1500) + (7 \times 400) + (4 \times 400) + (2 \times 350) = 21600 \text{ DA}$$

Le vrai ratio moyen pondéré $\bar{k}$:

$$\bar{k} = \frac{103784}{21600} = 4,80$$

$\bar{k}$: Signifie qu'un remplacement correctif d'urgence coûte en moyenne 4,8 fois plus cher qu'un remplacement préventif à l'échelle du poste.

IV.7 Détermination de la périodicité optimale T_0 :

Pour déterminer la périodicité optimale T_0 , nous avons utilisé le langage de programmation Python. Pour le modèle Type I, la valeur de T_0 a été calculée directement à partir d'une formule analytique. En revanche, pour le modèle Type II, la valeur de T_0 a été obtenue en cherchant numériquement le minimum de la fonction de coût $C(T)$, c'est-à-dire la valeur de T qui rend le coût le plus faible possible. Les courbes d'optimisation ainsi que le taux de défaillance ont également été représentés graphiquement grâce au même programme.

IV.7.1 Modèle Type I — Remplacement par Blocs :

Dans le modèle de remplacement par blocs, tous les équipements sont remplacés à intervalles de temps fixes T_0 , indépendamment de leur état réel. En cas de défaillance entre deux remplacements planifiés, un remplacement correctif est effectué immédiatement sans modifier le calendrier préventif. Le coût moyen par unité de temps est alors calculé en se basant sur la fonction de renouvellement $M(T_0)$:

En appliquant la condition d'optimalité (équation III.11) avec $\beta = 1,56$, $\eta = 1825,09$ et $C_r = 0,208$:

$$T_0 = \eta \times \left[\frac{C_r}{\beta - 1} \right]^{\left(\frac{1}{\beta}\right)} \quad (\text{IV. 1})$$

$$T_0 = 1825,09 \times \left[\frac{0,208}{0,56} \right]^{\left(\frac{1}{1,56}\right)} \quad (\text{IV. 2})$$

$T_0 \approx 970 \text{ jours } (\sim 31,9 \text{ mois})$

IV.7.2 Modèle Type II — Remplacement basé sur l'Âge :

Dans le modèle de remplacement basé sur l'âge, chaque composant est remplacé dès que son âge atteint la valeur T_0 indépendamment de son état. En cas de défaillance avant cet instant, un remplacement correctif est effectué immédiatement. Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{1825,09}\right)^{1,56}} \quad (\text{IV. 3})$$

La périodicité optimale T_0^* est obtenue par résolution numérique (minimisation de $C(T_0)$) :

$T_0 \approx 1197 \text{ jours } (\sim 39,4 \text{ mois})$.

IV.7.3 Courbes d'optimisation :

Les deux courbes de coût moyen par unité de temps $C(T)$ présentent la forme caractéristique en cuvette, avec un minimum clairement identifiable correspondant à la périodicité optimale T_0^* de chaque modèle. La zone à gauche de T_0^* représente la sur-maintenance, tandis que la zone à droite représente la sous-maintenance.

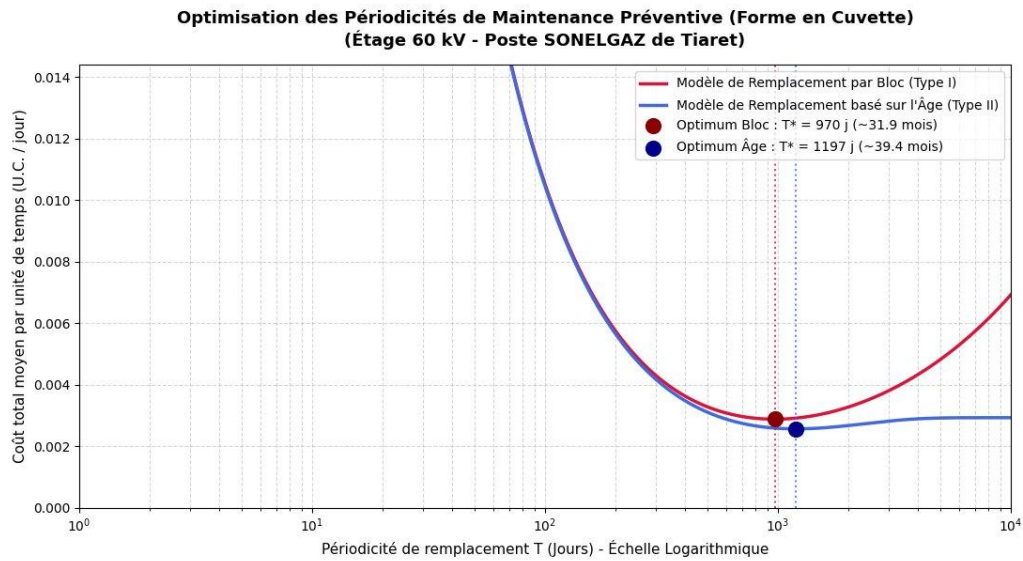


Figure IV. 3 : Optimisation des périodicités de maintenance préventive de l'étage 60 kV

IV.8 Discussion et interprétation :

IV.8.1 Interprétation des courbes de coût et comparaison des deux modèles :

La (Figure IV.3) présente les courbes du coût moyen de maintenance par unité de temps $C(T)$ en fonction de la périodicité d'intervention T , pour les deux modèles d'optimisation appliqués à l'étage 60 kV du poste SONELGAZ de Tiaret. Ces courbes présentent toutes les deux une forme caractéristique en cuvette, qui traduit un compromis fondamental : si l'on intervient trop fréquemment, on multiplie les coûts préventifs inutilement alors que les équipements fonctionnent encore bien ; à l'inverse, si l'on attend trop longtemps, les équipements se dégradent et les pannes imprévues génèrent des coûts d'urgence bien plus élevés. Entre ces deux extrêmes se trouve le point optimal T_0 , correspondant au fond de la cuvette, qui minimise le coût total de maintenance. Pour le Modèle Type I (remplacement par blocs), ce minimum est atteint à $T_0 = 970$ jours (~ 32 mois), tandis que pour le Modèle Type II (remplacement basé sur l'âge), il est atteint à $T_0 = 1197$ jours (~ 40 mois). Ce dernier modèle est recommandé car il tient compte de l'état réel de chaque équipement, et à l'instant de l'intervention préventive, le niveau de fiabilité des équipements est encore de 62,3%, garantissant ainsi une marge de sécurité suffisante. De plus, sur la base du ratio $\bar{k} = 4,80$, chaque panne imprévue évitée grâce à une intervention préventive planifiée permet d'éviter une dépense 4,8 fois supérieure à celle d'un remplacement systématique.

IV.8.2 Gains en fiabilité

L'adoption de la périodicité optimale $T_0 = 1197$ jours (modèle Type II) permet d'intervenir avant que le taux de défaillance n'atteigne des niveaux critiques. La fiabilité résiduelle au moment de l'intervention préventive est :

$$R(T_0) \approx 0,623 \quad \text{Soit } 62,3 \%$$

La comparaison des deux modèles sur le plan de la fiabilité révèle un avantage net du modèle Type II. En effet, le modèle Type I (remplacement par blocs, $T_0 = 970$ jours) impose un remplacement systématique à intervalle fixe, indépendamment de l'état réel de l'équipement. Cela peut conduire à remplacer un composant récemment installé après une défaillance corrective, ce qui dégrade artificiellement le niveau de fiabilité moyen du parc. À l'inverse, le modèle Type II (remplacement basé sur l'âge, $T_0 = 1197$ jours) tient compte de l'âge effectif de chaque composant : l'intervention n'est déclenchée que lorsque l'équipement a réellement atteint l'âge T_0 , garantissant ainsi une fiabilité résiduelle de $R(T_0) \approx 62,3 \%$ au moment de l'intervention. Cette marge assure que le système reste opérationnel avec un risque de défaillance maîtrisé, tout en évitant les remplacements prématurés inutiles.

IV.8.3 Gains économiques :

L'analyse économique met en évidence des gains substantiels liés à l'adoption de la périodicité optimale T_0 :

Élimination des coûts d'urgence : les interventions planifiées suppriment les majorations liées aux travaux de nuit et de week-end, ainsi que les frais de logistique express ;

Réduction des avaries en chaîne : la maintenance préventive élimine le risque de dommages en cascade sur les équipements adjacents (court-circuit, arcs électriques) ;

Optimisation du stock de pièces de rechange : une périodicité fixe T_0 permet d'anticiper les besoins et d'éviter les ruptures de stock critiques ;

Sur la base du ratio $\bar{k} = 4,80$, chaque remplacement correctif évité permet d'économiser en moyenne 4,8 fois le coût d'une intervention préventive planifiée.

IV.8.4 Modèle recommandé :

Le modèle de remplacement basé sur l'âge (Type II) est recommandé pour le poste de Tiaret avec une périodicité optimale $T_0 = 1\,197$ jours (~ 39 mois), pour les raisons suivantes :

Il offre une meilleure adaptation au comportement réel des équipements en tenant compte de leur âge effectif plutôt qu'un simple calendrier fixe ;

Il évite le remplacement inutile de composants récemment installés après une défaillance corrective ;

La périodicité $T_0 \approx 1\,197$ jours (~ 39 mois) est compatible avec les cycles de maintenance grands travaux pratiqués dans le secteur de l'énergie électrique.

IV.9 Conclusion :

Ce chapitre a constitué le cœur applicatif de notre mémoire, en traduisant les développements théoriques des chapitres précédents en résultats concrets et exploitables pour l'étage 60 kV du poste de transformation 220/60/30 kV de SONEGAS à Tiaret.

Dans un premier temps, la présentation du système et l'analyse de l'historique des 24 pannes enregistrées entre 2022 et 2025 ont permis de dresser un diagnostic précis de l'état de l'étage 60 kV. La répartition des défaillances a mis en évidence la prédominance des transformateurs, qui représentent à eux seuls 45,8% des pannes et 81% des charges correctives.

L'ajustement de la loi de Weibull aux données d'exploitation a conduit à l'estimation des paramètres $\beta = 1,56$ et $\alpha = 1\,825,09$ jours. La valeur $\beta > 1$ confirme un comportement de vieillissement des équipements, ce qui justifie scientifiquement l'adoption d'une politique de maintenance préventive systématique.

L'application des deux modèles d'optimisation a permis de déterminer les périodicités optimales suivantes :

Modèle Type I (Remplacement par Blocs) : $T_0 = 970$ jours (~ 32 mois), obtenu analytiquement par l'équation de Barlow et Hunter ;

Modèle Type II (Remplacement basé sur l'Âge) : $T_0 = 1\,197$ jours (~ 39 mois), obtenu par résolution numérique.

Le modèle Type II est recommandé pour sa meilleure adaptation au comportement réel des équipements. La comparaison avec la pratique actuelle (maintenance corrective réactive) révèle des gains significatifs : un ratio $\bar{k} = 4,80$ confirme que chaque intervention préventive planifiée permet d'éviter une dépense 4,8 fois supérieure en cas de panne. À cela s'ajoute une fiabilité résiduelle de 62,3% au moment de l'intervention, garantissant une marge de sécurité opérationnelle confortable.

En définitive, l'adoption de la périodicité optimale $T_0 = 1197$ jours constitue une recommandation opérationnelle directement applicable par les équipes de maintenance de SONELGAZ, permettant de concilier fiabilité du réseau électrique, maîtrise des coûts d'exploitation et disponibilité des équipements.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Arrivé au terme de ce travail de recherche, il convient d'en dresser la synthèse globale et d'ouvrir des perspectives futures. L'objectif de ce mémoire était d'appliquer une approche probabiliste rigoureuse afin d'optimiser la périodicité de la maintenance préventive systématique.

Sur le plan méthodologique, la démarche a permis de coupler l'analyse statistique des défaillances (par la loi de Weibull) aux critères économiques de l'exploitant (à travers les modèles de renouvellement par blocs et selon l'âge).

L'application industrielle, menée sur l'étage 60 kV du poste de transformation de SONELGAZ à Tiaret, a validé l'intérêt de cette approche :

Sur le plan technique : L'étude statistique a mis en évidence un comportement d'usure et de dégradation des équipements, justifiant scientifiquement la transition d'une politique réactive (corrective) vers une planification préventive.

Sur le plan économique : La confrontation des modèles montre que la stratégie basée sur l'âge est la mieux adaptée. Elle engendre des gains financiers substantiels en évitant les surcoûts des pannes imprévues, tout en garantissant une excellente marge de sécurité et la continuité du service sur le réseau électrique.

En somme, ce travail prouve que l'alliance entre les outils fiabilistes et les critères financiers constitue un levier d'aide à la décision incontournable pour concilier performance technique et maîtrise des coûts d'exploitation.

Perspectives

Pour prolonger cette étude, plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés :

Modélisation de la maintenance imparfaite : Introduire des modèles d'âge virtuel pour simuler l'impact réel des interventions sur le terrain, souvent moins parfaites que la théorie du "remplacement à neuf".

Segmentation par criticité : Appliquer une démarche de Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF / RCM) pour isoler les lois de comportement spécifiques aux composants les plus critiques, comme les transformateurs de puissance.

Transition vers la maintenance prévisionnelle : Intégrer des données de surveillance en temps réel (analyses des gaz dissous, thermographie) pour faire évoluer la périodicité systématique vers une maintenance conditionnelle.

Bibliographie

- [1] AFNOR, «NF EN 13306 – Maintenance – Terminologie,» *AFNOR*, 2017.
- [2] H. Siyad, «A Comprehensive Review of Maintenance Strategies,» *Journal of Industrial Engineering Research*, 2025.
- [3] H. Siyad, «Maintenance Strategies and Industrial Performance,» *International Journal of Production Maintenance*, 2025.
- [4] A. Benhanifia, «Predictive Maintenance Practices Review,» *Predictive Maintenance Practices Review*, 2025.
- [5] A. & A. B. Ali, «Condition-Based Maintenance Review,» *Journal of Reliability Engineering*, 2022.
- [6] E. Quatrini, «Condition-Based Maintenance: A Review,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020.
- [7] J. W. F. Z. W. Lee, «Prognostics and Health Management Design,» *Annual Reviews in Control*, 2024.
- [8] ISO, «ISO 14224:2016 (Reliability & Maintenance Data Collection),» *International Standard*, 2017.
- [9] J. e. al., «Condition-Based Maintenance Review,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019.
- [10] A. & Kamaruddin, «Reliability and Maintenance Decision Models,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019.
- [11] E. Zio, «The future of risk assessment,» *Reliability Engineering & System Safety*, 2018.
- [12] P. D. O'Connor, *Practical Reliability Engineering*, Wiley , 2012.
- [13] M. Modarres, *Reliability Engineering and Risk Analysis*, CRC Press, 2016.
- [14] A. Villemeur, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Eyrolles , 1997.
- [15] C. E. .. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill, 1997.
- [16] A. & T. Jardine, «A.H.C Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications,» *Theory and Applications* , 2013.
- [17] P. K. A. O'Connor, «Practical Reliability Engineering,» *Wiley*, 2021.
- [18] M. D. S. R. A. Ben-Daya, «Handbook of Maintenance Management and

Engineering,»*Springer (Book)*, 2016.

- [19] H. Pham, «System Reliability and Failure Prevention,» *Springer* , 2019.
- [20] A. & Z. Y. Hosseini, «Reliability Modeling Based on Weibull Distribution and Its Applications in Industrial Maintenance,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 136–151 , 2020.
- [21] K. A. H. & M. D. N. P. (. Kobbacy, «Complex System Maintenance Handbook,» *Springer* , 2022.
- [22] T. Nakagawa, « Maintenance Theory of Reliability,» *Springer* , 2021.