

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue

de l'obtention d'un master en recherche opérationnelle



*Optimisation de la maintenance préventive des équipements
informatiques au niveau de l'entreprise NAFTAL Béjaia*

Réalisé par :

Tahir Akila
Rahmi Nassima

Devant le jury composé de :

Président : *M^r* Larbi. A
Encadreur : *Pr* Aissani. D
Co-encadreur : *M^{me}* Kendi Kara. S
Examinatrice : *M^{me}* Touche. A
Examineur : *M^r* Kassa. A. F

Promotion : 2015-2016

Remerciement

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

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

A nos chers amis qui ont toujours été présents et fidèles.

A notre encadreur, le professeur AISSANI. D de l'université de Béjaia, laboratoire " LAMOS" pour son suivi, ses remarques qui ont mené à bien les travaux de notre projet.

A notre co-promotrice *M^{me}* Kendi Kara. S, pour son suivi attentif pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier vivement *M^r* Kassa Ali Farrouk, pour ses conseils, sa patience et ses encouragements tout au long de la réalisation de notre travail.

Nous tenons aussi à remercier, l'ensemble du district GPL, pour le temps qu'ils nous ont consacré durant la collecte des données.

Nos remerciements vont également à *M^{me}* Touche. A, *M^r* Kassa Ali Farrok et *M^r* Larbi. A pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

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

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié à :

Mes chers parents que Dieu les protège tout les deux.

Mon frère Abdennour et mes soeurs : Zina, Mariem, Nassima et souad.

Mes belles soeurs.

Mes beaux frères.

Ma belle-mère.

Mon cher époux.

Toute ma famille.

Ma chère amie que j'adore Nassima.

Mes amis (surtout Karim) et collègues et tous ceux qui nous ont aidé.

Tahir. A

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents.

Mon frère Amar et mes soeurs que j'adore.

Mes grands pères et mes grandes mères.

Mes oncles Hacene et Belaid.

Toute ma famille.

Ma chère amie et soeur Akila.

Tous mes amis.

RAHMI. N

Table des matières

Introduction générale	1
1 Présentation générale de l'entreprise NAFTAL	3
1.1 Présentation de la société NAFTAL	3
1.1.1 Historique	3
1.1.2 Mission	4
1.1.3 Les activités de l'entreprise	4
1.1.4 Organigramme	5
1.2 District GPL	5
1.2.1 Missions de la branche GPL	5
1.2.2 Organisation de la branche GPL	5
1.2.3 Activité commerciale et marketing du district	7
1.3 Description du matériel informatique au niveau du district GPL	9
1.3.1 Hardware	9
1.3.2 Software	11
1.4 Présentation du plan de maintenance au niveau du district	12
1.5 Position du problème	13
2 Les concepts de la théorie de la fiabilité utilisés en maintenance	14
2.1 Concepts élémentaires de la théorie de fiabilité	14
2.1.1 Enjeux de la sûreté de fonctionnement	14
2.1.2 Indices de fiabilité	16
2.1.3 Défaillance de matériel ou de système	18
2.2 Processus aléatoires en théorie de fiabilité	20
2.2.1 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité	20
2.2.2 Processus de comptage (ou de dénombrement)	24
2.2.3 Processus de renouvellement	24

2.2.4	Processus de Poisson homogène	25
2.2.5	Processus de Poisson non homogène	25
2.3	L'estimation des paramètres des lois	25
2.3.1	Estimateurs de maximum de vraisemblance	25
2.4	Validation (Tests d'adéquation)	26
2.4.1	Test de Khi-deux	26
2.4.2	Test d'ajustement de Kolmogorov - Smirnov	27
2.5	Modélisation de l'efficacité de la maintenance	28
2.5.1	Les modèles de base	28
2.6	Conclusion	31
3	Généralités sur la maintenance et ses politiques	32
3.1	Introduction	32
3.2	Généralités sur la maintenance	32
3.2.1	Définition de la maintenance	32
3.2.2	Objectifs de la maintenance	33
3.2.3	Effets de la maintenance sur les systèmes	33
3.2.4	Types de maintenance	33
3.3	Politiques de la maintenance	35
3.3.1	Politiques de maintenance préventive pour les systèmes élémentaires	35
3.3.2	Autres politiques de maintenance périodique	37
3.3.3	Politique de regroupement des maintenances préventives	37
3.4	L'optimisation de la maintenance	39
3.5	conclusion	40
4	Modélisation et optimisation de la période des révisions générales	41
4.1	Traitement statistique des données	41
4.1.1	Historique des données et stratégie de récolte	41
4.2	Choix des équipements à étudier	42
4.2.1	Les données des durées de vie	42
4.2.2	Estimation des paramètres de la fonction d'intensité de défaillance	43
4.2.3	Validation	45
4.3	Choix de la politique à appliquer sur les équipements choisis et le modèle correspondant	46
4.3.1	Choix de la politique	46
4.3.2	Modèle proposé	46
4.4	Optimisation de la périodicité des révisions générales	47

4.4.1	Estimation des coûts	48
4.4.2	Résultat de l'optimisation	50
4.5	Impact de l'efficacité de la maintenance sur la période de renouvellement des ordinateurs	51
4.5.1	Interprétation des résultats	55
4.6	conclusion	56
	conclusion générale	57
	Bibliographique	58

Table des figures

1.1	Organigramme général de NAFTAL	6
1.2	Organigramme général du district GPL	8
1.3	Le schéma d'un ordinateur de bureau	10
1.4	La structure des ordinateurs du district	11
2.1	Chronogramme d'un équipement réparable	15
2.2	Allure de l'évolution de l'intensité de défaillance $\lambda(t)$ (Courbe en baignoire) . . .	18
2.3	La fonction $f(t)$ de la loi exponentielle	21
2.4	La fonction $R(t)$ de la loi exponentielle	21
2.5	Intensité dans le modèle de maintenance minimale (ABAO)	28
2.6	Intensité dans le modèle de maintenance parfaite (AGAN)	29
3.1	La maintenance préventive et la maintenance corrective	34
3.2	Stratégie de maintenance de type Bloc (Bagayoko, 2009)	38
3.3	L'équilibre entre la maintenance préventive et la maintenance corrective	39
4.1	L'allure de la fonction des coûts de maintenance	51
4.2	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 5%	52
4.3	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 15%	52
4.4	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 25%	53
4.5	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 55%	53
4.6	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 75%	54
4.7	L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 80%	54

Liste des tableaux

1.1	Quelques équipements existants dans quelques services du district GPL de Béjaia	12
4.1	Données de retour d'expérience	43
4.2	Validation de test	45
4.3	Les coûts de la maintenance corrective	49
4.4	Les coûts de la maintenance préventive	50

Introduction générale

De nos jours, la sûreté de fonctionnement est devenue une préoccupation majeure dans la plupart des domaines industriels. En effet, les risques techniques qui peuvent mettre en cause la fiabilité, la disponibilité ou la sécurité d'un matériel ou d'une installation doivent être maîtrisés. Des activités de maintenance se développent donc, avec une mission de garantir le bon fonctionnement des systèmes.

Avec un personnel de plus de 2800 agents, l'entreprise NAFTAL (intégrée dans le groupe SONATRACH) est le premier distributeur des produits pétroliers en Algérie. Elle contribue à hauteur de 51% de l'énergie finale en fournissant 8 millions de tonnes de produits pétroliers par an sous forme de carburant, (gaz de pétrole liquifié, bitumes et lubrifiant). La branche GPL est créée par la décision N.S.754 du 27.08.2003. Elle est chargée des activités liées au transport, stockage, enfûtage, distribution, promotion et développement des GPL sur tout le territoire national.

Le district GPL de Béjaia dispose d'un nombre considérable des équipements informatiques. Ces derniers sont devenus une partie intégrante dans la vie de toutes les entreprises. A travers lesquels les utilisateurs peuvent faire des transactions commerciales facilement et avec précision tout en gardant la trace de tous les profits et les pertes. Nous pouvons acheter, vendre et payer les factures et les taxes en ligne. Cependant, dans le district, ces équipements se caractérisent par un certain vieillissement engendrant des pannes indésirables, donc la perte de données, les lenteurs administratives, le ralentissement des services, les retards de livraison, etc. Donc, il est extrêmement important de tout mettre en oeuvre pour éviter la défaillance en fonctionnement. Par conséquent, la maintenance devient une nécessité pour l'amélioration de la fiabilité de ces équipements, la prévention de défaillance et la réduction des coûts de maintenance. Il est intéressant aussi d'établir un plan de maintenance des équipements tout en tenant compte de leurs état de fonctionnement (fiabilité) et le nombre d'heures de fonctionnement. Pour cela le département technique et maintenance du district GPL adopte une politique de maintenance préventive qui consiste à faire subir aux machines des révisions partielles et générales. Une révision est une intervention sur la machine après avoir réalisé un certain nombre d'heures de fonctionnement.

L'objectif de notre travail est l'optimisation de cette maintenance préventive des équipements informatiques au niveau du district GPL de Béjaia. Plus précisément, ce travail concerne l'optimisation de la périodicité des révisions générales. Il s'agit de trouver la période optimale entre les révisions générales qui minimise le coût de la maintenance préventive tout

en considérant l'efficacité de cette dernière .

Nous avons construit un échantillon de "durées de vie" pour certains équipements, à partir de l'analyse des données de retour d'expérience. Par la suite, nous avons supposé que cette variable aléatoire "durée de vie" suit la loi Weibull à deux paramètres pour la modélisation de la fiabilité de ces équipements. Nous avons estimé ces paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance. L'ajustement à la loi (Weibull) a été fait par le test de Kolmogorov-Smirnov. Enfin, un plan de maintenance optimal basé sur la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance, est proposé.

De ce fait, notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la société NAFTAL, le district GPL de Béjaia, la présentation de la politique de maintenance appliquée au niveau de ce dernier, ainsi qu'à la position de la problématique rencontrée.

Nous définissons dans le second chapitre, les principaux concepts de la théorie de fiabilité utilisés en maintenance, les lois de distribution de survie, ainsi que les méthodes d'estimation des paramètres et les tests d'ajustement. Nous introduisons les principaux modèles traitant l'efficacité de la maintenance. Par la suite, nous choisissons un modèle afin de l'injecter dans une politique d'optimisation de la maintenance.

Le troisième chapitre est réservé à la définition de la maintenance, ses objectifs et ses différents types. Les politiques de maintenance préventives et les modèles mathématiques correspondants sont également présentés.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons un modèle adéquat à la politique de la maintenance préventive, adoptée sur les équipements informatiques au niveau du district GPL de Béjaia. Nous optimisons la périodicité des révisions générales en minimisant le coût de la maintenance préventive tout en considérant l'efficacité de cette dernière.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion.

Présentation générale de l'entreprise NAFTAL

Introduction

De nos jours, la maintenance est beaucoup plus une politique, un ensemble de stratégies et non un simple entretien. Afin d'aborder cette thématique et de pouvoir l'exploiter dans l'entreprise NAFTAL, il est utile de présenter cette entreprise, de mettre en évidence sa politique de maintenance actuelle, et de choisir des composants sur lesquels nous devons effectuer des applications et enfin répondre aux besoins de l'entreprise par rapport à cette thématique.

1.1 Présentation de la société NAFTAL

1.1.1 Historique

Jusqu'au 21 février 1971, le monopole du raffinage et de distribution des produits pétroliers était sous la main des entreprises étrangères. Après cette date là, celle de la nationalisation des entreprises SONATRACH fut apparaître en plusieurs directions, 18 entreprises issues de SONATRACH.

L'entreprise ERDP (Entreprise de Raffinage et de la Distribution Pétrolière) a été créée par le décret n° 80/101 du 06/04/1980. Entrée en activité le 01 Janvier 1982 et chargée de l'industrie du raffinage et la distribution des produits pétroliers sous le sigle de NAFTAL.

En 1985, une nouvelle restriction et réorganisation a donné L'UND (Unité NAFTAL de Distribution) qui regroupe les unités GPL et CPL. Deux ans après 1987, l'activité de raffinage est séparée de l'activité de distribution. La raison sociale de la société change suite à cette

séparation des activités.

NAFTAL est désormais chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers et dérivés. A partir de 1998, elle change de statut et devient société par action filiale à 100% de SONATRACH.

En 2001, L'UND a été dissoute, répartie en trois organismes à part GPL, CPL et Bitumes. Le seul statut qui reste inchangé est le district GPL de Bejaia. Ce dernier est constitué de 40 centres remplisseurs, 59 dépôts relais de stockage et de 1787 points de vente GPL.

1.1.2 Mission

Avec un personnel de plus de 2800 agents. NAFTAL est le premier distributeur des produits pétroliers en Algérie, elle contribue à hauteur de 51% de l'énergie finale en fournissant 8 millions de tonnes de produits pétroliers par an sous forme de carburant, (gaz de pétrole liquifié, bitumes et lubrifiant). NAFTAL a pour mission principale la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national. Elle intervient dans les domaines suivants :

- Enfûtage des GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié).
- La formulation de bitumes.
- La distribution, stockage et commercialisation des produits GPL.
- Transport des produits pétroliers.

1.1.3 Les activités de l'entreprise

Les principales activités de l'entreprise NAFTAL sont :

1. La commercialisation des carburants pour la motrice essence et diesel :
 - Essence normale.
 - Essence Super.
 - Essence Super Sans plomb.
 - Gasoil/GPL/C.
2. Commercialisation des pneumatiques de grandes marques.
3. Commercialisation d'une gamme de lubrifiants : ce dernier couvre toutes les applications d'un secteur automobile et industriel.
4. Le traitement du gaz naturel ou gaz associé.
5. Le raffinage du pétrole.
6. La liquéfaction du gaz naturel.

1.1.4 Organigramme

Suite a son intégration dans le groupe SONATRACH, NAFTAL s'est réorganisée autour de quatre divisions de produits (division CPL, division GPL, division AVM et division Bitumes). Les divisions ont pour mission de définir avec la direction générale, La stratégie de distribution et de commercialisation des produits pétroliers en veillant à rassembler toutes les conditions de son application dans les centres opérationnels de la société.

1.2 District GPL

1.2.1 Missions de la branche GPL

La branche GPL est créée par la décision N.S.754 du 27.08.2003, elle est chargée des activités liées au transport, stockage, enfûtage, distribution, promotion et développement des GPL sur tout le territoire national. Elle a pour missions :

- Commercialiser des GPL vrac et conditionnés, leurs emballages et accessoires.
- Veiller au respect des normes et consignes de sécurité sur toute la chaîne GPL (transport, installation d'enfûtage et de stockage, bouteilles, citernes, accessoires, etc).
- Organiser et développer le réseau commercial et de distribution.
- Développer et valoriser les GPL sous toutes ses formes particulièrement, vrac et gaz carburant.
- Distribuer les GPL aux utilisateurs aux meilleures conditions de coût, de qualité, des délais et de sécurité.
- Moderniser les infrastructures pour améliorer la productivité, la sécurité et la gestion.
- Développer le partenariat et la coopération dans le domaine des GPL.

1.2.2 Organisation de la branche GPL

a) Au niveau central

La branche GPL comprend les directions suivantes :

- Direction des ressources humaines.
- Direction administration et moyens.
- Direction finance et comptabilité.
- Direction technique et maintenance.
- Direction hygiène, sécurité et environnement.
- Direction marketing et exploitation.

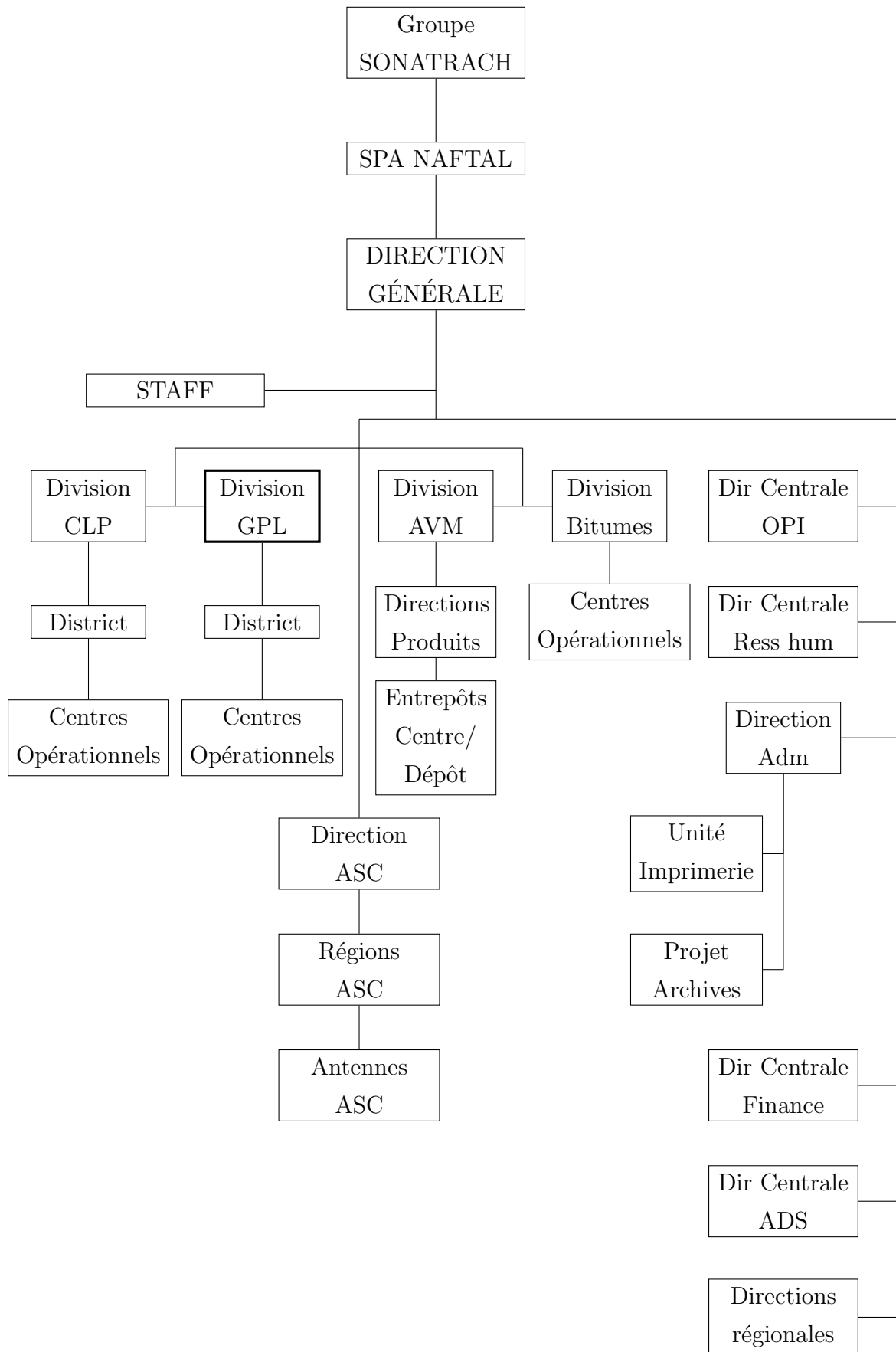


FIGURE 1.1 – Organigramme général de NAFTAL

b) Au niveau opérationnel

A travers le territoire national, l'activité est organisée en 19 districts (régionaux) couvrant les centres opérationnels qui sont les centres emplisseurs (CE et MCE), centre vrac (CV) et dépôt relais (DR). Les districts fonctionnent dans l'optique de décentralisation. Ils sont entièrement autonomes, sur le plan opérationnel de la distribution, sur le plan comptable et sur le plan personnel. Ils exécutent et animent toutes les fonctions : stockage, livraison, vente, assistance technique, entretien, gestion financière et gestion des ressources humaines. Une direction maintenance et réalisation (DMR) assiste les districts pour les nouvelles installations et les gros travaux de maintenance des véhicules, chariots élévateurs, pompes et autres équipements.

1.2.3 Activité commerciale et marketing du district

- Organiser et développer la commercialisation et la distribution des produits GPL.
- Connaitre les différents marchés du GPL et les besoins actuels.
- Satisfaire sa clientèle dans les meilleures conditions d'efficacité et de coût.
- Satisfaire et coordonner les activités de programmation des approvisionnements, de ravitaillement et de distribution des différents centres de stockage répartis à travers les trois wilayas (BEJAIA , JIJEL , BOUIRA).
- Assurer l'approvisionnement et la commercialisation des produits GPL sur l'ensemble des trois wilayas.
- Elaborer des plans en liaison avec d'autres districts visant la couverture du marché national en produits GPL.

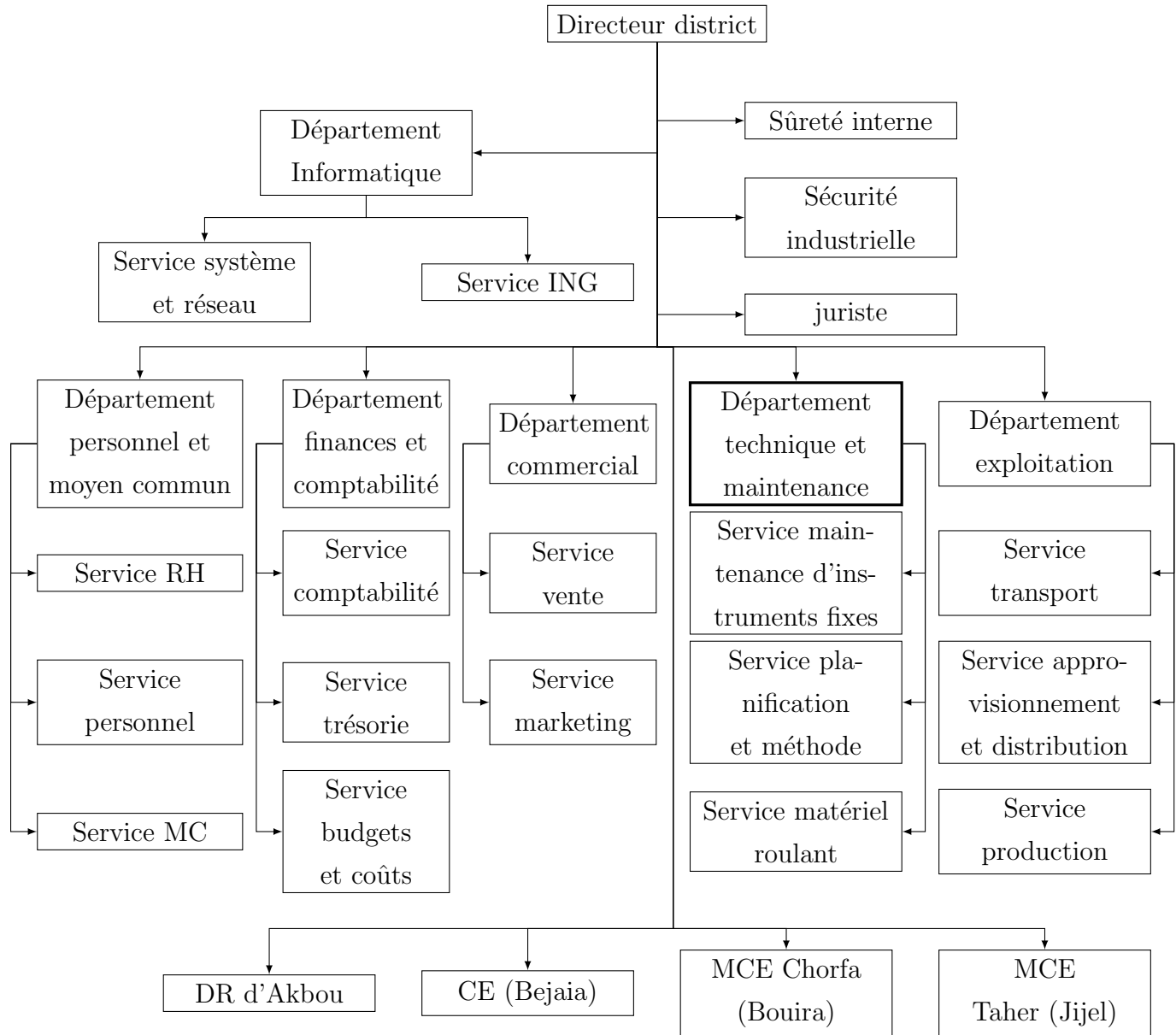


FIGURE 1.2 – Organigramme général du district GPL

1.3 Description du matériel informatique au niveau du district GPL

Le district GPL de l'entreprise NAFTAL, dispose d'un nombre important de matériel informatique. Il possède 70 ordinateurs, 39 imprimantes et 69 onduleurs.

1.3.1 Hardware

Le matériel informatique (hardware) est l'ensemble des pièces détachées des appareils informatiques. Il y a des pièces situées à l'intérieur du boîtier de l'ordinateur aussi bien qu'à l'extérieur (les périphériques).

Les pièces intérieures sont montées sur des circuits imprimés. Différentes pièces sont construites par différentes marques et connectées entre elles. Le respect des normes par les différentes marques permet le fonctionnement de l'ensemble.

Les pièces servent soit à recevoir des informations, les envoyer, les échanger, les stocker, ou les traiter. Toutes les opérations sont effectuées conformément aux instructions contenues dans les logiciels et aux manipulations des périphériques de l'interface homme-machine. Voici quelques définitions des différents composants d'un ordinateur :

1. Boîtier

Contient les principaux composants de l'ordinateur (carte mère, processeur, disque, etc). Un boîtier est souvent composé d'acier, d'aluminium ou de plastique.

– Carte mère

C'est elle qui accueille l'ensemble des composants internes d'ordinateur (processeur, mémoire, etc) et gère les différentes interfaces avec les périphériques (prise pour les éléments internes et ports USB pour les périphériques externes).

– Processeur (CPU)

Souvent qualifié le cerveau de l'ordinateur, le processeur permet de manipuler et de traiter les données qui lui sont fournies. Sa puissance a une influence sur la vitesse d'exécution des logiciels et des opérations qu'on effectue.

– Disque dur

Ce dernier stocke des données, qui sont permanentes et ne sont pas effacées à l'arrêt de l'ordinateur. Comme il conserve les systèmes d'exploitation (Linux, MacOS, Windows, etc), les logiciels et les documents. Donc c'est un espace de stockage permanent.

– Alimentation

L'alimentation a pour rôle d'assurer la fourniture en électricité à tous les composants de l'ordinateur.

– **Mémoire vive**

Partenaire de travail du processeur, la mémoire vive (appelée aussi RAM) stocke temporairement les données à traiter par le processeur. Ainsi, plus il y a de mémoire disponible, plus il est possible d’y conserver des données temporairement. La mémoire vive est vidée à chaque arrêt ou redémarrage de l’ordinateur.

2. **Onduleur**

Les onduleurs sont des outils très importants pour les structures professionnelles actuelles. Cet appareil fonctionne comme un micro générateur qui permet d’obtenir l’électricité nécessaire pour sauvegarder les données bureautiques et fermer l’application en cas de coupures subites.

3. **Imprimante**

Une fois que l’ordinateur a traité les données (BFL : Bilan de livraison des factures, demande d’intervention, documents de source, demandes clients, PV des conseils de direction, etc), il les envoie sur divers périphériques de sortie, le plus utilisé est l’imprimante.

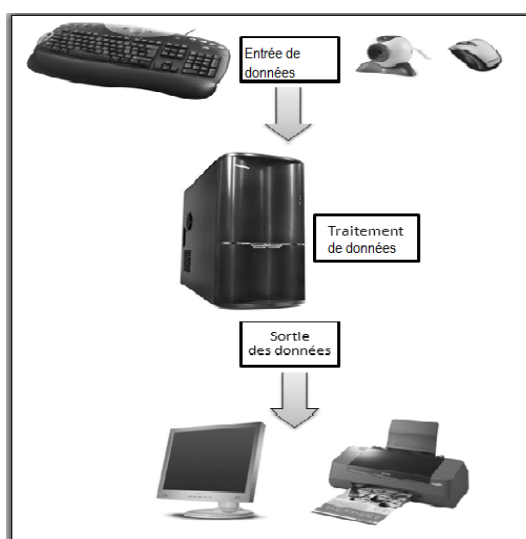


FIGURE 1.3 – Le schéma d’un ordinateur de bureau

Au niveau de tous les départements du district GPL, les ordinateurs sont montés en parallèle (tous les ordinateurs du système sont indépendants) (fig 1.4).

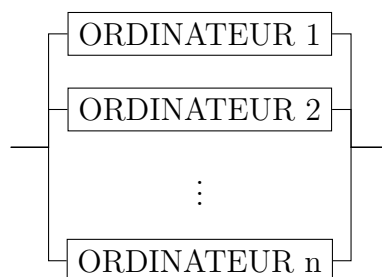


FIGURE 1.4 – La structure des ordinateurs du district

1.3.2 Software

Le Software représente les logiciels et les différents programmes qui construisent des séquences d'instructions interprétantes par une machine et d'un jeu de données nécessaires à ces opérations. Le logiciel détermine donc les tâches qui peuvent-être effectuées par la machine, ordonne son fonctionnement et lui procure ainsi son utilité fonctionnelle. Et parmi les logiciels les plus importants, le système d'exploitation, son rôle est de :

- contrôler le matériel, faire appel au processeur, gérer la mémoire vive,
- fournir aux autres logiciels l'environnement nécessaire pour leur utilisation. Sans système d'exploitation, aucun logiciel ne peut fonctionner.

Le seul système d'exploitation qui existe dans le district est le Windows 7, et cela pour uniformiser le système d'exploitation. Quelques équipements existants dans quelques services du district sont donnés dans la table (1.1).

Service	Équipements informatiques
Service Maintenance	Deux ordinateurs (HP)
	Imprimante matriciel (Epson)
	Onduleur (APC)
Service Approvisionnement	Deux Ordinateur (HP)
	Imprimantes (LEXMARK, EPSON)
	Onduleurs (INFOSEK, APC)
Service Finance	Ordinateur (HP) et deux ordinateurs (LENOVO)
	Imprimantes Laser (CANON)
	Onduleurs (APC, INFOSEC)
Service RH	Ordinateur (HP) et deux ordinateurs (LENOVO)
	Onduleurs (INFOSEK, APC)
	Imprimantes laser (CANON)

TABLE 1.1 – Quelques équipements existants dans quelques services du district GPL de Béjaia

1.4 Présentation du plan de maintenance au niveau du district

Dans ce district, la maintenance du matériel informatique est l'une des activités du département technique et maintenance, que ce soit le côté software (installation des différents outils tel que les systèmes d'exploitation et d'autres outils de gestion et de la messagerie), ou bien le côté hardware (diagnostic des différentes pannes et leurs réparations). Le service maintenance est chargé de la conservation du bon état des équipements informatiques. En cas de défaillance d'un de ces équipements, le personnel de ce service intervient pour une réparation. La stratégie de maintenance au niveau de GPL se présente sous deux types :

- Une maintenance préventive périodique (entretien) chaque 720h. On peut citer quelques actions : le nettoyage, les mises à jours, le renouvellement des systèmes d'exploitation, etc. On considère que cette maintenance est sans effet sur la fonction d'intensité du système.
- Une maintenance préventive chaque 2160h (révision générale). On considère qu'après cette action, la fonction d'intensité du système est réduite d'un facteur α .

1.5 Position du problème

Au niveau du district GPL de Béjaia, les agents du département technique et maintenance enregistrent un nombre important de pannes des équipements informatiques, cela représente un signe de vieillissement de ces derniers. C'est la raison pour laquelle les agents de maintenance envisagent de faire un renouvellement de ces équipements, mais qu'après avoir bénéficié encore de leurs services. Ainsi, une nouvelle politique de maintenance s'avère nécessaire pour l'optimisation de la période de renouvellement. Dans notre travail nous allons examiner la possibilité de pouvoir la prolonger.

Les concepts de la théorie de la fiabilité utilisés en maintenance

Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons définir quelques concepts élémentaires de la théorie de fiabilité et ses différents indices. Nous rappellerons les notions de base et les principales lois de probabilité qui décrivent le comportement des matériaux. Ceci peut être obtenu grâce à l'ajustement des lois de fiabilité à partir des données d'exploitation prenant en compte les conditions réelles d'utilisation. Le jugement sur ces données se trouve alors confronté à deux contraintes. L'estimation, où nous devons chercher les valeurs des paramètres dont dépend la distribution d'origine. Les tests d'hypothèse, où nous devons s'assurer que la distribution choisie est représentative des données d'exploitation, cela avec un risque consenti.

Enfin, il est important de construire des modèles des effets des maintenances des systèmes réparables et de développer des méthodes permettant d'évaluer leur efficacité.

2.1 Concepts élémentaires de la théorie de fiabilité

2.1.1 Enjeux de la sûreté de fonctionnement

Définition (Sûreté de fonctionnement)

La sûreté de fonctionnement représente "l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permettent de disposer des performances fonctionnelles, au moment voulu, pendant la durée voulue, sans dommage pour lui-même et son environnement" [1]. Ainsi la sûreté de fonctionnement englobe dans son périmètre les quatre grandeurs :

Fiabilité : la fiabilité représente "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [01].

Disponibilité : la norme NF EN 13306 définit la disponibilité comme l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions déterminées, à un instant ou un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée.

Sécurité : la sécurité est "l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé" [01].

Maintenabilité : suivant la norme CEN 13306, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

Matériel réparable [17]

C'est un matériel qui peut être remis en fonctionnement après avoir subi une défaillance. La vie d'un tel matériel peut être décrite à l'aide du chronogramme de la (fig 2.1).

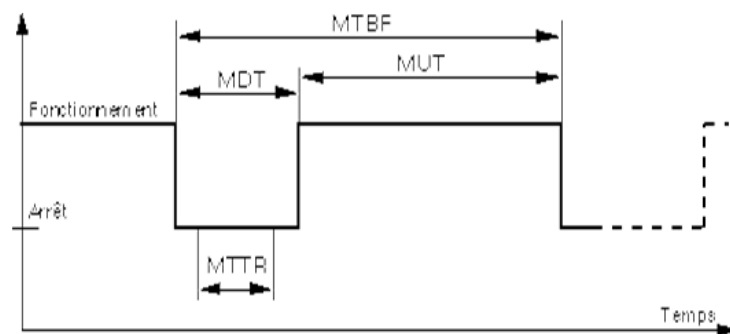


FIGURE 2.1 – Chronogramme d'un équipement réparable

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

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

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

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

Matériel irréparable [17]

Le matériel irréparable ne peut être remis en fonctionnement.

MTTF : Le temps moyen de bon fonctionnement (ou de défaillance ou de panne) correspond à l'espérance de la durée de vie T , on le note MTTF (Mean Time To Failure)

$$MTTF = E[t] = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \int_0^{+\infty} R(u)du$$

2.1.2 Indices de fiabilité

Fonction fiabilité

Admettons qu'à la date $t = 0$, un élément est mis en fonctionnement et qu'à la date $t = T$, il tombe en panne. La durée de vie T de cet élément est assimilée à une variable aléatoire non négative, vu que la défaillance est la conséquence de divers facteurs aléatoires. La fonction de fiabilité, notée $R(t)$, représente la probabilité que l'élément fonctionne sans défaillance dans l'intervalle $[0, t]$. Elle est donnée par :

$R(t) = p(T > t) = 1 - F(t)$. $F(t)$ est la fonction de répartition de la variable aléatoire T .

Fonction de répartition

En fiabilité, la fonction de répartition $F(t)$ représente la probabilité d'avoir au moins une défaillance avant l'instant t . La fonction de distribution de probabilité associée aux durées de vie est donnée dans [15] :

$$F(t) = P(T \leq t)$$

La fonction $F(t)$ est une fonction croissante.

Fonction densité de probabilité

Elle est notée $f(t)$, c'est la fonction dérivée de la fonction $F(t)$ [15]. Elle représente la probabilité de défaillance de l'élément à l'instant t , elle est définie par :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

L'espérance mathématique

L'espérance de la variable aléatoire T , représente la durée de vie moyenne de l'élément.

$$E(T) = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \int_0^{+\infty} R(u)du$$

Taux de défaillance instantané

Notant par $\lambda(t)$, le taux de défaillance à l'instant t , tel que :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t R(t)} - \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \right)$$

Le terme $\lambda(t)\Delta t$ mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$, sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant t [15]. Le taux de défaillance d'un dispositif à l'instant t est donc défini dans [05] :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Qui nous permet de déduire la fonction de fiabilité $R(t)$, donnée par :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(s) ds\right)$$

Courbe en baignoire

La courbe en baignoire (fig 2.2) donne l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$, en fonction de l'âge du matériel. Elle comprend trois phases, chacune avec un sens de variation différent.

– **Période de jeunesse**

Elle est caractérisée par des pannes précoces (prématurées), $\lambda(t)$ est décroissant.

– **Période de maturité**

Correspond à la vie utile de l'élément, $\lambda(t)$ est constant.

– **Période de vieillesse**

Correspond à la période d'usure (détérioration, corrosion, etc) de l'élément, $\lambda(t)$ est croissant.

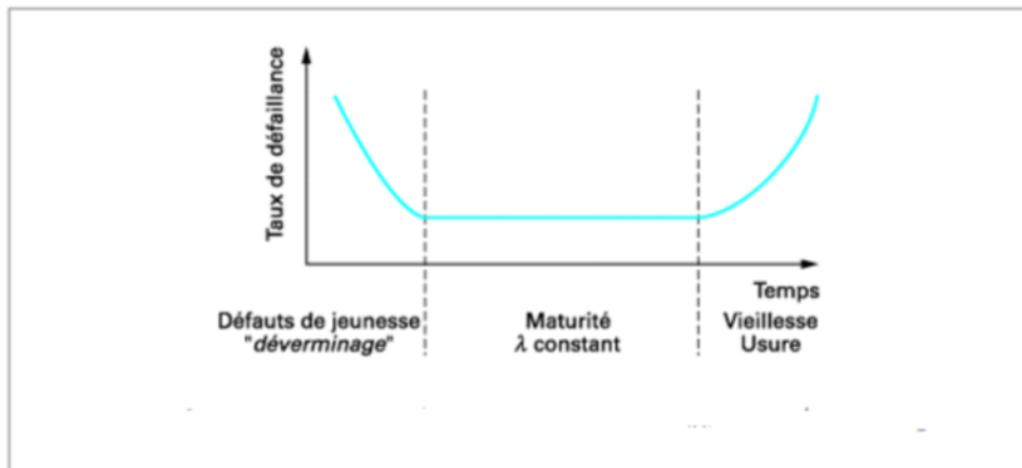


FIGURE 2.2 – Allure de l'évolution de l'intensité de défaillance $\lambda(t)$ (Courbe en baignoire)

2.1.3 Défaillance de matériel ou de système

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

Paramètres d'identification de défaillance de matériel ou de système [03][21]

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

– **Causes fondamentales d'apparitions de la panne**

1. La faiblesse inhérente (intrinsèque) :
Défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au matériel lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données de celui-ci.
2. Le mauvais emploi :
Défaillance attribuable à l'application de contraintes au delà des possibilités données du matériel.
3. Défaillances premières :
Défaillance d'un matériel dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre équipement.
4. Défaillance seconde :
Défaillance d'un matériel dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre équipement.

– **La vitesse de manifestation des défaillances**

1. Les défaillances graduelles :

Elle se caractérise par une variation progressive des paramètres déterminant la fiabilité du système. Ce type de défaillance est prépondérant pour le matériel mécanique, pour lequel se manifeste l'usure des composants après une certaine durée de fonctionnement.

2. Les défaillances subites :

Elles sont dues à une perte totale des propriétés du système entraînant son incapacité de fonctionnement. Ce type de défaillance caractérise spécialement le matériel électronique.

– **En fonction de leur amplitude**

1. Les défaillances partielles :

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

2. Les défaillances complètes :

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

– **L'âge**

1. Les défaillances précoces :

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

2. Les défaillances aléatoires :

Elles apparaissent durant la période de vie utile de l'équipement. Ce sont des défaillances accidentelles. Elles ont la même probabilité d'apparition.

3. Défaillances par usures :

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

– **L'aptitude à être constatée**

1. Défaillance fugitive (systématique) :

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

2. Défaillance intermittente :

Défaillance non permanente, mais plus au moins facilement reproductible.

3. Défaillance permanente :
Défaillance constable à tout moment.

– **Conséquences**

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

2.2 Processus aléatoires en théorie de fiabilité

2.2.1 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

L'évaluation de la fiabilité d'un équipement passe obligatoirement par la connaissance déterministe ou plus ou moins approximative, soit de la distribution de probabilité des durées de vie de cet équipement, soit des paramètres de son taux de défaillance. Cela est généralement déterminé à travers des essais de fiabilité, ou des données de retour d'expérience. Plusieurs distributions paramétriques peuvent être utilisées. Nous présentons celles les plus utilisées en pratique.

Distribution exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité, notamment dans le domaine de l'électronique. Elle est applicable pendant la période de vie utile du dispositif pendant laquelle le taux instantané de défaillance $\lambda(t) = \lambda$ est constant et les défaillances surviennent de façon aléatoire. Il est à noter que dans le cas d'une distribution exponentielle, la maintenance préventive est inadéquate. Une variable aléatoire T est distribuée suivant une loi exponentielle si sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{2.1}$$

Et sa fonction de répartition est donnée par :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

La fonction de fiabilité de la loi exponentielle est définie pour tout $t \geq 0$ par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

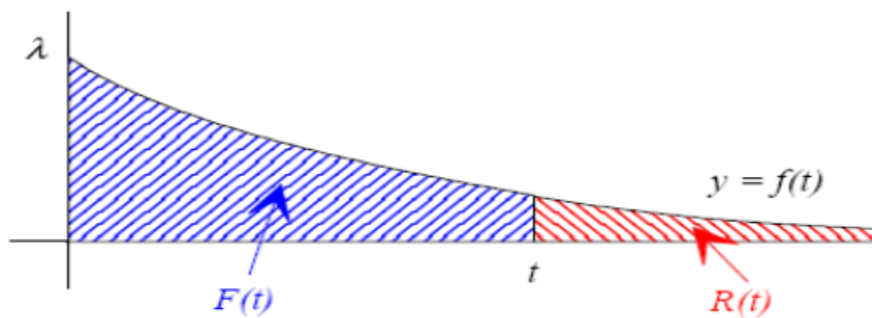


FIGURE 2.3 – La fonction $f(t)$ de la loi exponentielle

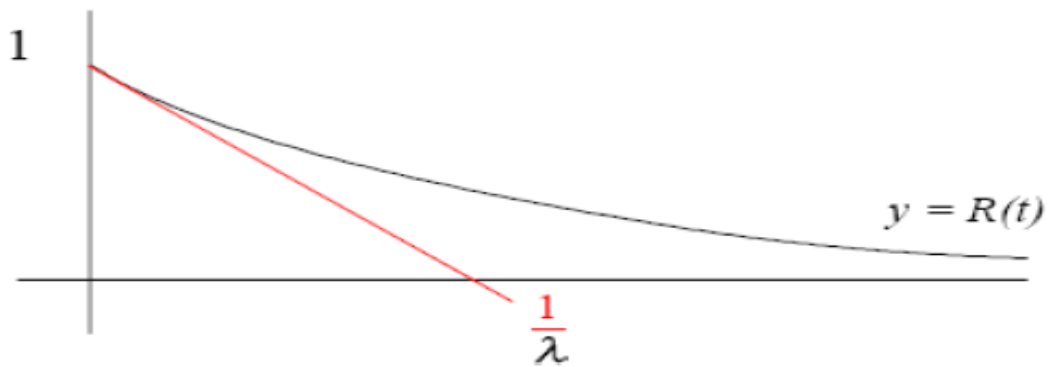


FIGURE 2.4 – La fonction $R(t)$ de la loi exponentielle

Propriété sans mémoire de la loi exponentielle

Une propriété principale de la loi exponentielle est d'être sans mémoire ("memoryless property"). La loi conditionnelle de la durée de vie d'un dispositif qui a fonctionné sans tomber en panne jusqu'à l'instant t est identique à la loi de la durée de vie d'un nouveau dispositif. Ceci signifie qu'à l'instant t , le dispositif est considéré comme neuf ("as good as new"), de durée de vie exponentielle de paramètre λ [25].

La distribution weibull

C'est la loi la plus utilisée dans le domaine de la fiabilité des équipements (mécanique, électronique, informatique, etc). Elle a l'avantage d'être très souple et pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentation. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie :

- période de jeunesse,
- période de vie utile,
- période d'usure ou vieillissement.

La loi de Weibull est caractérisée par :

Fonction de fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \forall t \geq \gamma. \quad (2.4)$$

Densité de probabilité [12] :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \forall t \geq \gamma. \quad (2.5)$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.6)$$

Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres (β, η, γ) où :

- β est le paramètre de forme. Il est le plus important car il joue sur la variation du taux de défaillance. Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance peut être décroissant ($\beta < 1$), constant ($\beta = 1$) ou croissant ($\beta > 1$). La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de vie d'un dispositif décrites par la courbe en baignoire de la (fig 2.2).
- η est un simple paramètre d'échelle de temps.
- γ est le paramètre de localisation. Il est dans la même unité que le temps, très souvent, on choisit $\gamma = 0$ et la loi de Weibull est ramenée à deux paramètres.

La loi de Poisson

La loi de Poisson est une loi de probabilité discrète qui décrit le comportement du nombre d'évènements qui se produisent dans un laps de temps fixé, si ces évènements se produisent avec une fréquence moyenne connue et indépendamment du temps écoulé depuis l'évènement précédent. Sa fonction de fréquence est :

$$p(k) = p(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad \text{avec} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.7)$$

On dit alors que la variable aléatoire X suit la loi de Poisson de paramètre λ . Sa fonction de répartition est donnée dans [16] :

$$P(X \leq k) = \sum_{i=0}^{i=k} e^{-\lambda} \frac{\lambda^i}{i!} \quad (2.8)$$

Son espérance mathématique est donnée par :

$$E(X) = \lambda$$

Sa variance est donnée par :

$$Var[X] = \lambda$$

La loi normale

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie d'un dispositif en fin de vie (usure), car le taux de défaillance est

toujours croissant. On ne l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure 3 fois à l'écart type. En effet, t est toujours positif, alors que la variable normale est définie de $-\infty$ à $+\infty$, la restriction imposée réduit la probabilité théorique de trouver une durée de vie négative à environ 0.1% [12].

La densité de probabilité de la loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ [12]

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.9)$$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.10)$$

La fiabilité est donnée dans [12] :

$$R(t) = 1 - \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.11)$$

Où ϕ est la fonction de répartition de la loi normale centrée ($\mu = 0$) et réduite ($\sigma = 1$).

2.2.2 Processus de comptage (ou de dénombrement)

Si $\{X_i\}$ sont des variables aléatoires non négatives, alors le processus $\{N(t), (t > 0)\}$ est dit processus de comptage, si $N(t)$ représente le nombre total d'évènements dans l'intervalle $[0, t]$ [04]. Si nous observons les défaillances d'une pièce d'une machine, alors la première défaillance aura lieu après une durée X_1 , la deuxième défaillance après une durée X_2 et ainsi de suite. Le nombre total de défaillances $N(t)$ dans un intervalle de temps $[0, t]$ est donc une variable aléatoire et une famille de variables aléatoires $\{N(t), (t > 0)\}$ est un processus aléatoire de comptage. Les variables $\{X_i\}$ sont souvent appelées "les durées de vie" du processus [04].

2.2.3 Processus de renouvellement

Si $\{X_i\}$ sont des variables aléatoires non négatives indépendantes et identiquement distribuées, alors le processus de comptage $N(t) = \{\max n : S_n = t_1 + t_2 + \dots + t_n \leq t\}$ est dit processus de renouvellement [16].

En d'autres termes, le processus de renouvellement compte le nombre d'intervalles X_i dans $[0, t]$.

Si $E[X_i] = \lambda$ alors, par la loi des grands nombres, $\frac{S_n}{n} \rightarrow \lambda$, quand $n \rightarrow +\infty$ avec une probabilité de 1.

2.2.4 Processus de Poisson homogène

Un processus de poisson avec intensité λ est un processus de renouvellement dont la distribution des durées de vie est la loi exponentielle de paramètre λ [04]. On peut le définir aussi comme étant un processus de dénombrement $\{N(t), t > 0\}$, avec accroissements stationnaires et indépendants, et avec $N(t) - N(s)$ qui suit une loi de poisson de paramètre $\lambda(t - s)$ pour tout $0 \leq s \leq t < \infty$.

2.2.5 Processus de Poisson non homogène

Lorsque la fonction d'intensité du processus de poisson dépend du temps, on dit que c'est un processus de poisson non homogène. Ou bien un processus de poisson avec fonction d'intensité $\lambda(t)$ est un processus de dénombrements, disons $\{N(t), t > 0\}$, avec accroissements indépendants et avec $N(t) - N(s)$ qui suit une loi de poisson de paramètre $m(t) - m(s)$ pour tout $0 \leq s \leq t < \infty$ où $m(t)$ est la fonction moyenne définie par[03] :

$$m(t) = \int_0^t \lambda(\mu) d\mu$$

2.3 L'estimation des paramètres des lois

L'estimation consiste à donner des valeurs approchées aux paramètres $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ d'une population à l'aide d'un échantillon de n observations issues de cette population. Cependant le même paramètre peut être estimé à l'aide de différents estimateurs [21][23].

2.3.1 Estimateurs de maximum de vraisemblance

On appelle vraisemblance d'un échantillon, la densité de probabilité de cet échantillon. Prenons le cas d'un échantillon de n observations indépendantes t_i dont la densité de probabilité est $f(t_i, \theta)$, $\theta \in \Theta$ où Θ est un ensemble de paramètres.

La vraisemblance L s'écrit :

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (2.12)$$

La méthode du maximum de vraisemblance consiste à prendre comme estimateur $\hat{\theta}$ de θ . La valeur de θ qui rend maximale la vraisemblance $L(t_1, t_2, \dots, t_n, \theta)$ est :

$$L(t, \hat{\theta}) \geq L(t, \theta), \quad \forall \theta \in \Theta$$

Cet estimateur doit donc vérifier les conditions suivantes :

$$\frac{\partial L(t, \hat{\theta})}{\partial \theta_j} = 0, \quad \forall j = 1, \dots, r. \quad (2.13)$$

et

$$\frac{\partial^2 L(t, \hat{\theta})}{\partial \theta_j^2} < 0, \quad \forall j = 1, \dots, r. \quad (2.14)$$

Lorsque la fonction L est convexe, la condition (2.13) est nécessaire et suffisante.

La condition (2.13) est équivalente à :

$$\frac{\partial \text{Log}L(t, \hat{\theta})}{\partial \theta_j} = 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, r$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance possède les propriétés suivantes :

1. Il est convergent mais pas forcément sans-biais.
2. S'il existe un estimateur exhaustif $\hat{\theta}$ de θ , l'équation du maximum de vraisemblance admet une solution unique.
3. Il est asymptotiquement normal et asymptotiquement efficace.

2.4 Validation (Tests d'adéquation)

Les modèles que l'on peut établir sont issus d'un échantillon de population, puis on pose l'hypothèse qu'ils suivent une loi particulière. Ainsi, il reste à vérifier la validité de cette loi [02].

2.4.1 Test de Khi-deux

Soit X_1, X_2, \dots, X_n un n -échantillon issu d'une variable aléatoire X . On partage le domaine D de la variable aléatoire X , partie de l'ensemble des réels R , en r classes C_1, C_2, \dots, C_r .

Soient :

n_i : l'effectif de la classe C_i

p_i : la probabilité de se trouver dans la classe C_i . Elle est déduite à partir de la loi de probabilité à tester (définie à priori).

np_i : effectif théorique de la classe C_i .

Pearson a démontré que la variable aléatoire :

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

suit asymptotiquement un Khi-deux à $(r - 1)$ degré de liberté, N_i étant la variable aléatoire qui représente l'effectif de la classe C_i et dont la réalisation est n_i . Soit k_n^2 la réalisation de la variable aléatoire K_n^2 . La règle de décision est alors :

- Si $k_n^2 < \chi_{(r-1, \alpha)}^2$, on accepte l'ajustement de la variable aléatoire X par la loi définie.
- Si $k_n^2 > \chi_{(r-1, \alpha)}^2$, on rejette l'ajustement de la variable aléatoire X par la loi définie.

Lorsque les paramètres de la loi à valider sont estimés à partir de l'échantillon, le degré de liberté du Khi-deux est alors égal à $(r - q - 1)$, q étant le nombre de paramètres estimés.

L'application du test de Khi-deux doit satisfaire les conditions suivantes :

- Le nombre de classe doit être supérieur ou égal à 8.
- L'effectif théorique np_i de chaque classe doit être supérieur ou égal à 8.

2.4.2 Test d'ajustement de Kolmogorov - Smirnov

Le test d'ajustement de Kolmogorov - Smirnov est un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse h_0 selon laquelle les données observées sont engendrées par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable. Dans ce test, les calculs sur les lois de probabilité se font sur les fonctions de répartition : on mesure l'écart entre la fonction de répartition théorique et la fonction de répartition observée. On considère ainsi une variable aléatoire X de fonction de répartition F , que l'on veut comparer à une fonction de répartition théorique F_0 [13].

On souhaite tester :

- l'hypothèse h_0 : " $F = F_0$ " contre :
- l'hypothèse h_1 : " $F \neq F_0$ "

Si (X_1, X_2, \dots, X_n) est un n -échantillon de X , la fonction de répartition empirique associée à cet échantillon est [13] :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} 1_{]-\infty; x]}(X_k)$$

$F_n(x)$ est la proportion des observations dont la valeur est inférieure ou égale à x .

Le plus grand écart entre les valeurs observées et les valeurs théoriques du modèle déduites de la fonction de répartition F_0 peut donc être mesuré par la variable aléatoire [13] :

$$\Delta_n = \max_{x \in R} |F_n(x) - F_0(x)|$$

qui sera la variable de décision, ou fonction discriminante du test.

2.5 Modélisation de l'efficacité de la maintenance

2.5.1 Les modèles de base

Le modèle de maintenance minimale

Le modèle de maintenance minimale suppose que l'effet de la maintenance est de remettre le système en fonctionnement dans l'état exact où il était juste avant la défaillance. Cela caractérise un effet de maintenance neutre (n'améliore pas et ne dégrade pas le système). Le système après maintenance est aussi dit mauvais que vieux (As Bad As Old : ABAO) [11].

L'intensité de défaillance est alors une fonction qui dépend uniquement du temps et ne dépend donc pas du passé du processus, tel que :

$$\lambda_t = \lambda(t)$$

Le processus aléatoire qui correspond à ce modèle est le processus de poisson non homogène (NHPP). La (fig 2.5) illustre cette propriété et représente l'intensité d'un système pour des maintenances (ABAO). Les étoiles sur l'axe des abscisses symbolisent les instants des interventions de maintenance.

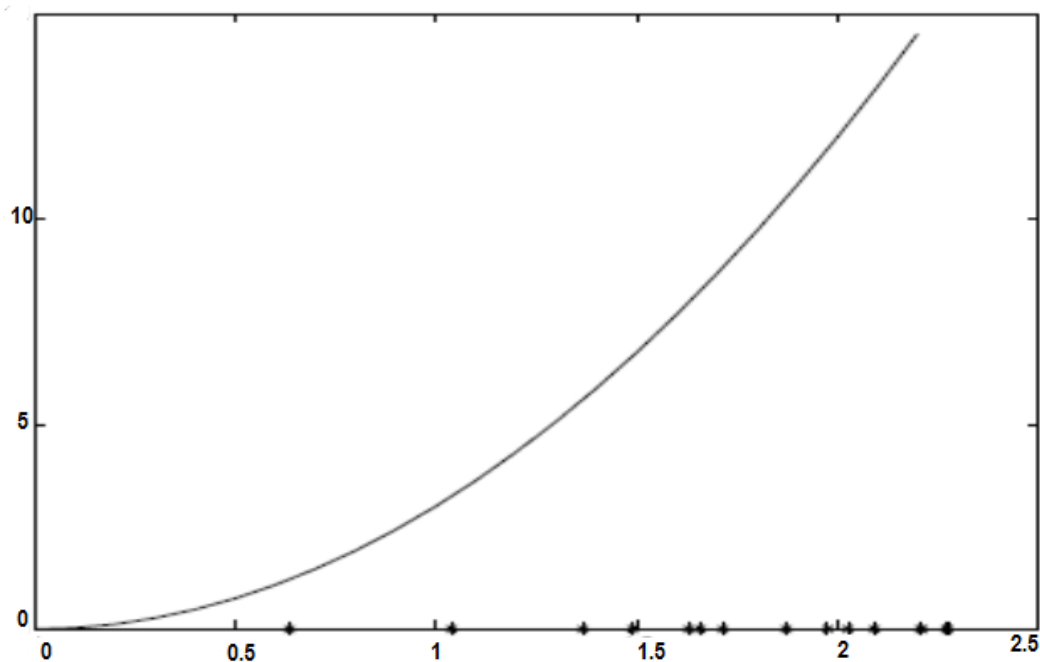


FIGURE 2.5 – Intensité dans le modèle de maintenance minimale (ABAO)

Le modèle de maintenance préventive parfaite (AGAN)

Le modèle de maintenance préventive parfaite considère que chaque maintenance remet le système à neuf. Le système après maintenance est donc aussi bon que neuf ou (As Good As New : AGAN). Les durées inter-défaillances sont alors indépendantes et de même loi, l'intensité de défaillance pour ce modèle suit le processus de renouvellement [11], sa fonction est donnée par l'expression :

$$\lambda(t) = \lambda(t - T_{Nt})$$

La (fig 2.6) représente une trajectoire de l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances (AGAN). Les instants de défaillance sont les instants de saut de l'intensité.

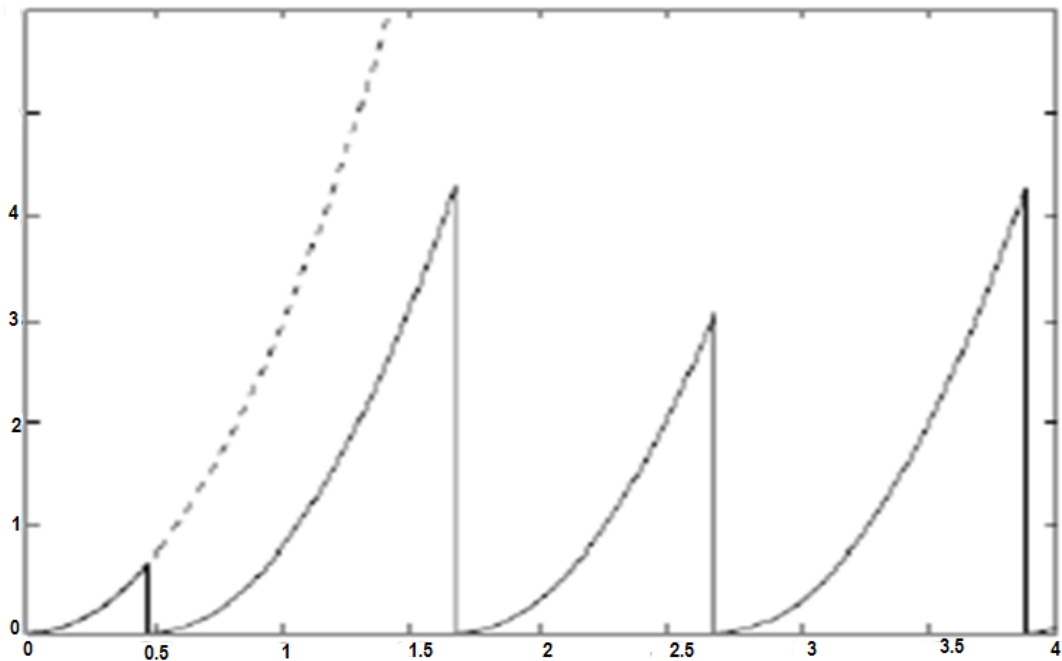


FIGURE 2.6 – Intensité dans le modèle de maintenance parfaite (AGAN)

Le modèle de maintenance imparfaite

Comme il a été mentionné précédemment, deux modèles de maintenance qui ont été développés à savoir le modèle de maintenance minimale et le modèle de maintenance parfaite, mais dans la réalité d'après les experts, la maintenance parfaite n'existe pas. C'est pour cela que [09] ont proposé le modèle de maintenance imparfaite, il existe deux modèles de maintenance imparfaite, le modèle d'âge virtuel et le modèle à réduction d'intensité de défaillance.

– Les modèles d'âge virtuel

Le concept d'âge virtuel n'a été défini qu'en 1988 [14], en se basant sur l'hypothèse suivante :

Après la i^{me} maintenance, le système se comporte comme un système neuf qui aurait fonctionné une durée A_i sans tomber en panne. Il peut donc être considéré comme l'âge virtuel du système après la i^{me} maintenance.

Le premier modèle de réduction de l'âge virtuel a été proposé dans [18], en associant un facteur d'amélioration à la formule d'intensité de défaillance, ce modèle a été formulé de la manière suivante :

Si X_i et $\lambda_i(t)$ pour $t \in [0, X_i]$ représentent respectivement l'intervalle entre deux actions de maintenance préventive voisines et la fonction d'intensité de défaillance du système avant la i^{me} maintenance préventive (MP), la fonction d'intensité de défaillance après la i^{me} maintenance devient : $\lambda_i(t + \alpha_i X_i)$, ($0 < \alpha_i < 1$) est le facteur de réduction d'âge dû à une action de maintenance préventive imparfaite. Ce qui implique que chaque MP imparfaite change la valeur de l'intensité de défaillance initiale juste après la MP vers $\lambda_i(\alpha_i X_i)$ mais elle n'atteint pas zéro (système neuf).

– Modèle à réduction d'intensité de défaillance

T. Nakagawa [19] a proposé un modèle de réduction d'intensité de défaillance proche du modèle de réduction à facteur d'amélioration. Il suppose qu'après la i^{me} MP, la fonction de l'intensité de défaillance devient $b_i \lambda(t)$ pour $T \in [0, X_{i+1}]$ et b_i est le facteur de réduction d'intensité de défaillance. Il suppose aussi qu'après chaque MP l'intensité de défaillance est remise à Zéro (nouveau système).

Modèle hybride

X. Zhou et al [05] considèrent que d'après la définition de la maintenance préventive imparfaite, nous pouvons remarquer que les modèles de réduction d'âge virtuel ont l'avantage d'aider à déterminer l'intensité initiale juste après la MP, alors que les modèles de réduction d'intensité de défaillance ont une influence directe sur l'allure de la courbe de la fonction d'intensité de défaillance après chaque MP. A partir des propriétés et des avantages distincts de ces deux modèles X.Zhou et al, ont construit un modèle issu de ces deux grands axes de modélisation

de la maintenance, à savoir, les modèles de réduction d'intensité de défaillance et les modèles d'âge virtuel. La relation entre la fonction d'intensité avant et après la i^{me} MP peut être définie par :

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + \alpha X_i), \quad \forall t \in [0, X_{i+1}]$$

Où : $0 < \alpha_i < 1$ et $b_i > 1$ sont respectivement le facteur de réduction d'âge et le facteur de réduction d'intensité de défaillance.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les concepts de la théorie de fiabilité utilisés en maintenance. Puis, nous avons illustré les outils mathématiques permettant de modéliser la fiabilité d'un matériel.

Afin d'estimer les paramètres des lois associées au comportement du matériel, on utilise la méthode de maximum de vraisemblance, ces dernières seront validées tout en utilisant des tests d'ajustement à savoir, le test de Khi-deux et le test de Kolmogorov-Smirnov.

Enfin, nous avons donné quelques modèles de base traitant l'efficacité de la maintenance. Cela aboutit à la proposition d'un modèle adéquat à notre étude afin de l'injecter dans une politique d'optimisation de maintenance.

Généralités sur la maintenance et ses politiques

3.1 Introduction

Les équipements (mécaniques, informatiques, etc) sont généralement sujets à des dégradations avec l'utilisation et le temps. Ces derniers constituent une part considérable du capital de la plupart des entreprises. Par conséquent, Les industries souhaitent mettre en oeuvre des stratégies de maintenance pour améliorer la fiabilité de leur systèmes, éviter les défaillances et réduire le coût de maintenance. Suite à son importance, l'optimisation de la maintenance continue à faire l'objet de très nombreux travaux de recherche.

Nous présentons, dans ce chapitre, la notion de la maintenance, son rôle, son intérêt ainsi que ses différents types et ses principales opérations.

Nous allons citer par la suite quelques modèles développés, notamment en ce qui concerne la maintenance préventive.

3.2 Généralités sur la maintenance

3.2.1 Définition de la maintenance

Au sens stricte du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble d'entretiens destinés à accroître la fiabilité ou pallier aux défaillances. Selon l'AFNOR (Association Française de Normalisation) par la norme NF X-60-10, la maintenance se définit comme étant l'ensemble des interventions permettant de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé [01].

3.2.2 Objectifs de la maintenance

- Assurer la production prévue (quantité).
- Maintenir la qualité du produit fabriqué (qualité).
- Respecter les délais (temps).
- Rechercher les coûts optimaux (rentabilité).
- Assurer la sécurité des employés.

3.2.3 Effets de la maintenance sur les systèmes

Selon l'effet de la maintenance sur l'état du système après avoir reçu une action de maintenance, elle peut être caractérisée en ce qui suit :

- Maintenance parfaite : toute action de maintenance permettant de ramener le système à un état "As good as new". Après une maintenance parfaite, le système a le même taux de défaillance qu'un système neuf. Un remplacement est considéré comme une maintenance parfaite.
- Maintenance minimale : toute action ramenant le taux de défaillance du système à celui qu'il avait juste avant la défaillance "As bad as old".
- Maintenance imparfaite : toute action permettant de ramener le système dans un état entre (AGAN) et (ABAO). Donc elle englobe les deux cas extrêmes, la maintenance minimale et la maintenance parfaite.

3.2.4 Types de maintenance

On distingue deux types de maintenance :

1. Maintenance préventive

Regroupe l'ensemble des actions exécutées à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation de fonctionnement d'un bien. Elle est composée de plusieurs catégories qui diffèrent par leurs conditions d'activation.

- **Maintenance systématique** : lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de la maintenance systématique. L'opération de la maintenance est effectuée conformément à un échéancier. Aucune intervention n'a lieu avant la date prédéterminée.
- **Maintenance conditionnelle** : lorsque l'opération de la maintenance préventive est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation ou de la baisse des performances d'une entité, on parle de la maintenance conditionnelle. Elle s'effectue par un diagnostic avant de remplacer l'élément visité. Une

idée de la maintenance conditionnelle consiste à ne pas changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en danger ses performances.

2. Maintenance corrective

Regroupe l'ensemble des actions exécutées après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans l'état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Ses actions comprennent la détection de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modifications, et le contrôle du bon fonctionnement. La remise en état peut prendre deux formes : le dépannage ou la réparation. Elle comporte :

- **La Maintenance palliative** : Effectue une remise en état provisoire du matériel ayant subi une panne.
- **La Maintenance curative** : L'équipement ayant subi une panne retrouve après l'intervention l'état dont il était juste avant l'apparition de la panne.
- **La Maintenance corrective d'amélioration** : Effectue une remise en état du système et modifie les caractéristiques afin d'éviter la réapparition du problème.

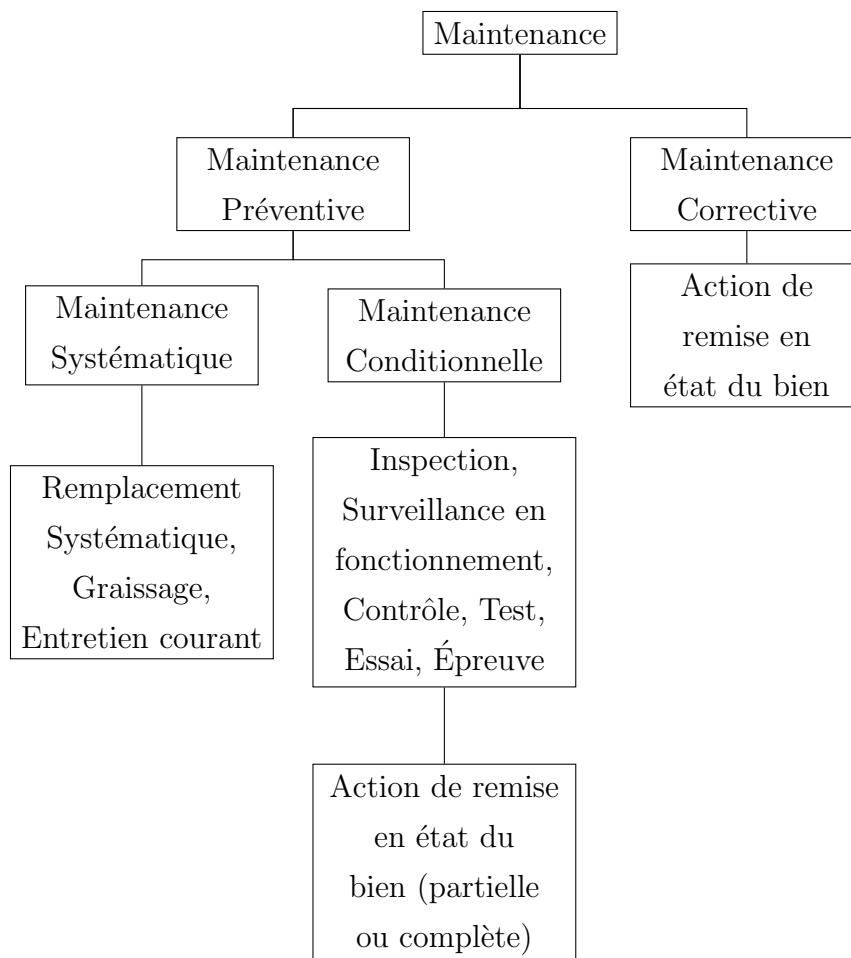


FIGURE 3.1 – La maintenance préventive et la maintenance corrective

Les objectifs de la maintenance préventive

La maintenance préventive permet de :

- Réduire le temps d'arrêt dû aux pannes.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer ou même annuler les défaillances en service.
- Supprimer les causes d'accidents dûes aux dépannages.

3.3 Politiques de la maintenance

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

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

3.3.1 Politiques de maintenance préventive pour les systèmes élémentaires

Politique de la maintenance préventive dépendant de l'âge : suivant cette politique, un composant élémentaire est remplacé quand il atteint l'âge T ou à la défaillance selon l'événement qui se produit en premier. Le coût moyen par unité de temps est donné dans [16] :

$$C(t) = \frac{C_p R(t) + [1 - R(t)]C_c}{\int_0^T R(t)dt} \quad (3.1)$$

Où le numérateur représente l'espérance du coût total du cycle et le dénominateur représente l'espérance de la logeur du cycle.

- T : l'âge du remplacement préventif (variable de décision).
- C_p : le coût du remplacement préventif.
- C_c : le coût de défaillance incluant le coût de remplacement.
- $R(t) = 1 - F(t)$: la fonction de fiabilité ou de survie.

Politique de maintenance préventive périodique : dans cette politique un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps fixes KT ($K = 1, 2, 3, \dots$) indépendants de l'historique des pannes et réparé à la défaillance. Une autre politique de la MP périodique de base, qui est la politique de remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance, où un élément est remplacé à des temps prédéterminés KT ($k=1, 2, \dots$) et les défaillances sont éliminées par des réparations minimales [16]. Pour cette dernière politique, le processus aléatoire caractérisé est un processus de renouvellement, le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(T) = \frac{C_c h(T) + C_p}{T} \quad (3.2)$$

Où $h(T)$ représente le nombre moyen de remplacements de 0 à T .

C_p est le coût de la pièce de rechange, C_c est le coût entraîné par la défaillance.

La difficulté avec l'expression précédente réside dans la détermination de la fonction de renouvellement $h(T)$, souvent les bornes suivantes sont utilisées :

$$\frac{C_p + C_c[F(T) + F^2]}{T} < C[T] < \frac{C_p + C_c[F(T) + F^2 + [F(T)^\beta][1 - F(T)]]}{T}$$

Politique de remplacement périodique avec réparation minimale : cette politique est une variante de la précédente, la différence est que suite à une défaillance, l'élément reçoit une réparation minimale. Par conséquent, les défaillances surviennent suivant un processus de Poisson non homogène, le nombre moyen de défaillances dans un intervalle $[0, T]$ est donné dans [16] :

$$h(T) = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (3.3)$$

Où $\lambda(t)$ représente le taux d'occurrences de défaillances.

Politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale : suivant cette politique, l'élément n'est pas remplacé périodiquement mais reçoit juste des maintenances imparfaites. Le taux d'occurrence des défaillances va changer après chaque action de maintenance préventive, car la maintenance imparfaite permet de ramener le taux de défaillance à un niveau situé entre le taux de défaillance initial (neuf) et celui juste avant la maintenance. Dans ce cas, il faut mesurer l'effet de chaque maintenance sur le système. Nous donnons le modèle de Gertsbakh [12], où on suppose que l'effet de toute la maintenance préventive est constant, il fait varier le taux de défaillance exponentiellement, d'une quantité égale à e^a ($a > 0$). Le coût moyen par unité de temps est donné par Gertsbakh [12] :

$$C(T) = \frac{C_{min}h(T)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(k-1)})(K - 1)C_{pr} + C_{rg}}{KT} \quad (3.4)$$

Où :

- C_{min} : coût de la réparation minimale ;
- C_{pr} : coût de la maintenance préventive imparfaite ;
- K : nombre de révisions générales avant de renouveler l'équipement ;
- C_{rg} : coût de révision générale ;
- e^α : facteur de dégradation ;

3.3.2 Autres politiques de maintenance périodique

Politique de remplacement avec période d'inactivité : cette stratégie propose d'arrêter l'équipement suite à une panne jusqu'au moment déterminé de la maintenance préventive. Mais le modèle suppose que la défaillance est survenue à un petit moment avant l'arrêt programmé de l'équipement. Le modèle de base a été développé dans [10].

Politique de maintenance imparfaite : cette stratégie propose de remplacer des composants défaillants par des composants en meilleurs états sans être neufs. Donc, le but est seulement d'améliorer les performances de l'équipement. Des modèles dans la littérature ont été développés comme les modèles de maintenance préventive imparfaite de Nakagawa, Kijima, Murthy et Nguyen [19][09][20].

Stratégie de maintenance séquentielle : Cette stratégie suppose un horizon de temps fini. Une stratégie optimale qui minimise le coût total moyen sur cet horizon a été établie dans [07]. De même, un autre modèle de remplacement périodique avec des coûts de réparation minimale croissants a été développé par les mêmes auteurs précédent. En résumé, la stratégie qui correspond mieux à la situation observée par les équipements réparables est celle de remplacement périodique avec réparation minimale après défaillance [08].

3.3.3 Politique de regroupement des maintenances préventives

Cette politique est applicable lorsque les composants défaillants peuvent rester en état de défaillance jusqu'au moment opportun pour recevoir une maintenance.

Politique de maintenance de type Bloc (mono-groupe)

: Cette politique consiste à faire des remplacements préventifs à des intervalles de temps fixes et prédéterminés. En cas de défaillance, un remplacement correctif de l'équipement est encouru. L'un des premiers modèles de cette méthode est le modèle de (Sheu 1991) [06] dans lequel, ils

utilisent la fonction de renouvellement de l'équipement. Ils déterminent la période optimale T^* qui minimise le coût total moyen par unité de temps sur un horizon infini. Un deuxième modèle est proposé et qui constitue une extension du dernier modèle en tenant compte des stocks disponibles des pièces de rechange. La stratégie de type bloc peut avoir un effet de gaspillage des équipements neufs. Car, il arrive de remplacer un équipement qui vient d'être mis en marche. Pour remédier à cette lacune, des modèles étendus de type Bloc ont été proposés en effectuant des réparations minimales ou en remplaçant par des équipements usagés [24].

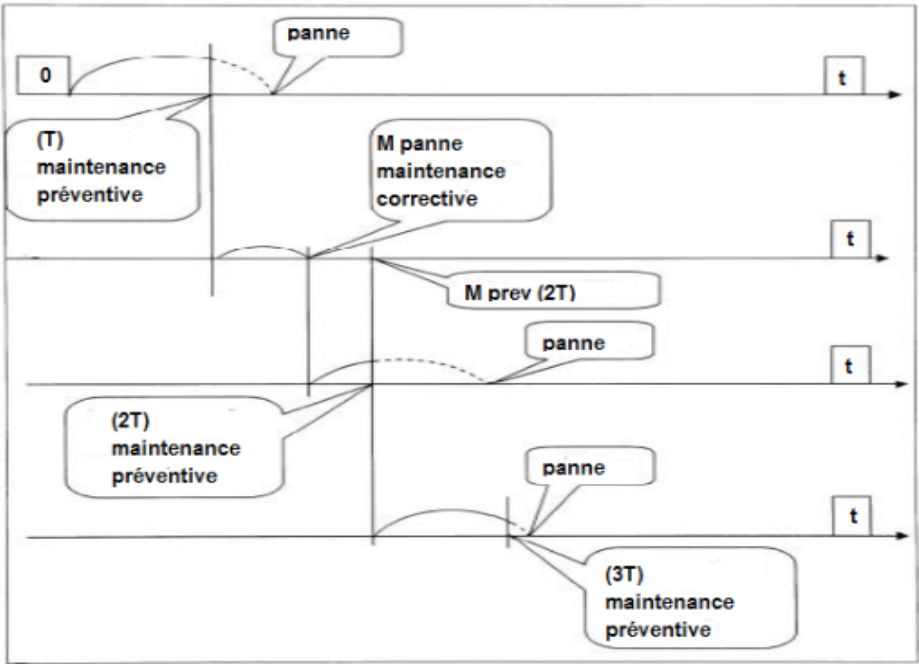


FIGURE 3.2 – Stratégie de maintenance de type Bloc (Bagayoko, 2009)

3.4 L'optimisation de la maintenance

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre la maintenance préventive et la maintenance corrective tout en respectant les objectifs fixés. Il faut alors déterminer les instants de maintenance et les actions à effectuer de manière à optimiser un critère de décision fixé. Ce critère de décision peut aussi bien reposer sur le coût, par exemple un coût moyen de maintenance à long terme ou le coût d'opération par unité de temps, que sur la disponibilité du système ou encore sur la sécurité. La (fig 1.3) est une illustration des effets de la fréquence des opérations de maintenance sur les coûts liés, soit à la maintenance corrective, soit à la maintenance préventive. L'augmentation du nombre d'interventions sur le système permet de réduire les effets indésirables engendrés par une panne mais pénalise le fonctionnement du système et peut entraîner une augmentation du coût global d'exploitation du système dans la mesure où chaque opération de maintenance engendre un coût [22].

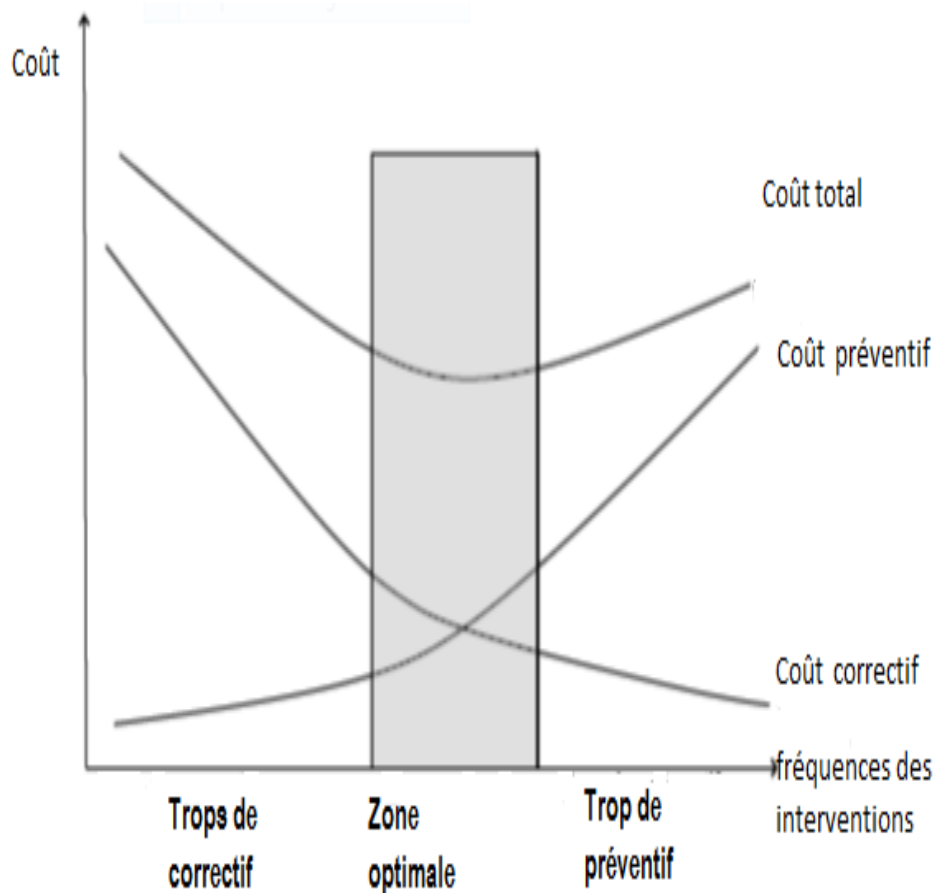


FIGURE 3.3 – L'équilibre entre la maintenance préventive et la maintenance corrective

3.5 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de définir, d'une manière générale la maintenance, qui a pour objectif l'amélioration de la disponibilité des équipements, la réduction de la fréquence et les coûts des défaillances. Ainsi, nous avons présenté ses deux types, la maintenance corrective et la maintenance préventive. Le principal avantage de la maintenance préventive est son caractère panifiable, notamment lorsqu'une réparation est nécessaire.

Nous avons introduit aussi quelques modèles de maintenance préventive pour les systèmes élémentaires dans le cadre de l'optimisation de la maintenance des équipements réparables.

Notre étude concerne l'optimisation de la maintenance, en se basant sur l'analyse de la fiabilité à partir des données de retour d'expérience. Il faut donc déterminer les instants de maintenance de manière à optimiser un critère de décision fixé (coût).

Modélisation et optimisation de la période des révisions générales

Introduction

La connaissance des caractéristiques de fiabilité est essentielle quelque soit le système simple (un équipement) ou complexe. L'usure et le renouvellement des équipements engendrent des coûts qu'on doit gérer d'une manière optimale.

L'objectif de notre travail est d'analyser les paramètres de fiabilité de quelques équipements informatiques au niveau du district GPL de l'entreprise NAFTAL. Cette opération est précédée par la collecte de données observées du retour d'expérience puis la sélection de celles qui sont utiles pour la thématique proposée. Par la suite, nous procéderons à l'optimisation de la maintenance préventive qui consiste à optimiser la périodicité des révisions générales des équipements informatiques du district. Un modèle adéquat à la politique de maintenance adoptée par le district est proposé. Ce modèle apparait sous forme d'une fonction à minimiser (coût total) en fonction des coûts de la maintenance et du temps.

4.1 Traitement statistique des données

4.1.1 Historique des données et stratégie de récolte

Un agent de maintenance fait la saisie dans un outil informatique (Excel) dont lequel, il mentionne la date d'arrêt de la machine, sa date de remise en service, les causes des pannes et les différentes observations relatives à l'intervention.

4.2 Choix des équipements à étudier

Le district GPL comprend un nombre important d'équipements informatiques. L'étude statistique de chacun d'entre eux se révélerait très longue. D'après l'historique des pannes des différents équipements informatiques (ordinateurs, imprimantes, scanners, onduleurs, etc), nous avons remarqué que les ordinateurs sont les équipements qui subissent le plus de pannes. C'est pour cela que nous nous sommes intéressées à l'étude de leurs fiabilité et maintenance.

4.2.1 Les données des durées de vie

L'étude est faite sur un groupe d'ordinateurs ayant les mêmes caractéristiques et qui ont subi un nombre important de pannes durant la période allons du 08/07/2013 au 14/02/2016 (la première date représente la date d'installation de ces machines). Nous avons obtenu un échantillon de durées de vie de taille $n = 40$. Les données sont représentées dans la table (4.1).

Pc	Date de la panne	Date de remise en service	Durée ¹ /h
pc 1	05/01/2014	06/01/2014	4240
	23/05/2014	24/05/2014	3288
	29/10/2014	30/10/2014	3696
	03/02/2015	05/02/2015	2208
	10/07/2015	12/07/2015	3720
pc 2	31/10/2013	02/11/2013	1992
	20/01/2014	21/01/2014	1872
	06/04/2014	10/04/2014	1752
	27/07/2014	28/07/2014	2328
	08/11/2014	09/11/2014	2400
	13/03/2015	15/03/2015	2976
	21/07/2015	23/07/2015	3024
pc 3	04/01/2014	06/01/2014	4224
	08/05/2014	09/05/2014	2928
	17/09/2014	19/09/2014	3072
	30/01/2015	30/01/2015	3144
	19/03/2015	21/03/2015	1176
	29/05/2015	30/05/2015	1632
	13/08/2015	15/08/2015	1752
	30/11/2015	02/12/2015	2520
	12/02/2016	14/02/2016	1680

pc 4	20/12/2013	21/12/2013	1680
	25/04/2014	27/04/2014	3888
	17/07/2014	18/07/2014	1920
	18/10/2014	19/10/2014	2160
	11/02/2015	14/02/2015	2712
	23/06/2015	25/06/2015	3096
pc 5	24/01/2014	26/01/2014	4704
	11/05/2014	13/05/2014	2520
	05/09/2014	08/09/2014	2688
	22/01/2015	23/01/2015	3216
	14/04/2015	14/04/2015	1944
	25/07/2015	26/07/2015	2424
	16/12/2015	17/12/2015	3360
pc 6	26/04/2014	30/04/2014	6888
	01/07/2014	03/07/2014	1464
	28/09/2014	30/09/2014	2040
	17/12/2014	18/12/2014	1848
	18/03/2015	18/03/2015	2160
	30/08/2015	01/09/2015	3888

TABLE 4.1 – Données de retour d'expérience

4.2.2 Estimation des paramètres de la fonction d'intensité de défaillance

Soit T la variable aléatoire représentant la durée de vie des équipements choisis. Pour la modélisation de la fiabilité de ces derniers, nous espérons que la variable T suive la loi de Weibull à deux paramètres (η et β). Nous allons estimer ces paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance. L'ajustement à la loi (Weibull) sera fait par le test de Kolmogorov-Smirnov.

Fonction de vraisemblance

Soit $t_1 < t_2 < \dots < t_n$, n durées de vie observées, $f(t)$ est la densité de probabilité de la loi de Weibull :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.1)$$

1. Durée : durée de bon fonctionnement (durée de vie).

La vraisemblance qui est une fonction à deux paramètres est :

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, \beta, \eta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \beta, \eta) \quad (4.2)$$

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, \beta, \eta) = \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.3)$$

Pour estimer les paramètres η et β , nous allons maximiser cette fonction de vraisemblance. Pour des raisons de simplification de calcul, nous avons fait appel au logarithme népérien de la fonction de vraisemblance. Alors,

$$\ln L(t_1, t_2, \dots, t_n, \beta, \eta) = n \times \ln(\beta) - n \times \ln(\eta) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i/\eta) - (t_i/\eta)^\beta \quad (4.4)$$

Les estimateurs du maximum de vraisemblance sont ceux qui vérifient :

$$\frac{\partial L(t, \beta)}{\partial \beta} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 L(t, \beta)}{\partial \beta^2} < 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial L(t, \eta)}{\partial \eta} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 L(t, \eta)}{\partial \eta^2} < 0 \quad (4.6)$$

D'où :

$$\begin{cases} \frac{\partial L(t, \eta)}{\partial \eta} = \beta \left(-\frac{n}{\eta} + (\beta - 1) \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} \left(\frac{t_i}{\eta^2}\right)\right)\right) = 0 \\ \frac{\partial L(t, \beta)}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta + \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{t_i}{\eta}\right) \left(1 + e^{\beta \ln\left(\frac{t_i}{\eta}\right)} (1 - \beta)\right) = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

D'où :

$$\beta = \frac{n}{(n * \sum_{i=1}^n t_i^\beta * \ln(t_i)) - \sum_{i=1}^n (\ln(t_i))} \quad (4.8)$$

$$\eta = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} \quad (4.9)$$

La résolution du système (4.7) à deux équations nécessite des calculs lourds et très délicats. Nous utilisons donc l'approche numérique, à travers le toolbox de MATLAB.

Résultats de l'estimation

L'estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) nous donne les résultats suivants :

$$\beta = 2.7.$$

$$\eta = 3131.5.$$

Interprétation des résultats sur les paramètres

L'estimation de β est supérieure à l'unité, ce qui signifie que l'intensité de défaillance est croissante dans le temps, donc les équipements sortent de la période de jeunesse, ce qui signifie que la dégradation de ces derniers augmente. L'adoption d'un plan de maintenance optimal permettra de réduire cette dégradation et augmenter la durée de vie des machines.

4.2.3 Validation

En utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov, nous allons tester si la variable aléatoire T suit la loi de Weibull de paramètres η et β trouvés précédemment.

Hypothèses à tester :

(h0) : "La variable aléatoire T suit la loi de Weibull de paramètres $\beta = 2.7$ et $\eta = 3131.5$ " contre

(h1) : "La variable aléatoire T ne suit pas la loi de Weibull de paramètres $\beta = 2.7$

et $\eta = 3131.5$ "

Nous avons effectué ce test avec le logiciel "R" et le plus grand écart entre les fonctions empirique et théorique est :

$$D_{max} = 0.1081$$

Sur la table de Kolmogorov-Smirnov, pour un risque de 5% ($\alpha = 0.05$) et pour $n = 40$, nous avons : $d(40, 0.05) = 0.214$.

$D_{max} < 0.214 \implies$ on accepte (h0). C'est-à-dire le plus grand écart observée entre les deux fonctions (empirique et théorique) n'est pas significatif (au seuil de 0.05).

η	β	$d(n, \alpha)$	D_{max}	conclusion
3131.5	2.7	0.214	0.1081	h_0 acceptée

TABLE 4.2 – Validation de test

Donc la variable aléatoire T suit bien la loi de Weibull de paramètres $\beta = 2.7$ et $\eta = 3131.5$.

4.3 Choix de la politique à appliquer sur les équipements choisis et le modèle correspondant

4.3.1 Choix de la politique

Les agents de maintenance au niveau du district GPL adoptent des maintenances préventives périodiques qui sont effectuées à des instants prédéterminés. Les révisions générales se font chaque $2160h$. Le service maintenance fait des révisions partielles chaque $720h$. La plupart des maintenances correctives sont supposées minimales puisque leur but est de permettre à l'équipement de reprendre sa fonction.

En se basant sur cette politique de maintenance adoptée par le district, nous avons opté pour la politique de "maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance".

4.3.2 Modèle proposé

Cette dernière politique de maintenance nous a permis de choisir un modèle d'optimisation adéquat. Ce modèle est celui de Gertsbakh [12]. Suivant cette politique, l'équipement reçoit juste des maintenances imparfaites, et on suppose que l'effet de toutes les maintenances préventives (mesuré par le paramètre α) est constant. Il fait varier le taux de défaillance exponentiellement d'une quantité égale à e^α ($\alpha > 0$). Le taux de défaillance d'un équipement $\lambda(t)$ est une fonction croissante dans le temps, avec $\lambda(0) = 0$.

Après la défaillance, le système est remis en fonctionnement en faisant des réparations minimales qui nous permettent d'avoir un taux de défaillance égal à celui qu'avant la défaillance.

Afin de diminuer le nombre des pannes possibles durant la période de vie de l'équipement, des maintenances préventives (révisions générales) sont programmées à des périodes fixées à l'avance.

Le modèle de Gertsbakh [12] suppose que l'effet de la maintenance est de remettre le système en fonctionnement dans l'état exact où il était juste avant la défaillance.

Construction du modèle

Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les actions de maintenance préventive sont effectuées suivant des périodes programmées à l'avance.

- Les durées inter-maintenances préventives sont fixées et égales.
- Le coût de maintenance préventive (révision générale) C_{rg} est le même à chaque intervention.
- L'effet de chaque action de maintenance préventive (révision générale) est constant, il fait varier le taux de défaillance exponentiellement, d'une quantité égale à e^α ($\alpha > 0$).
- Après K cycles, le système sera renouvelé.
- Après K cycles, un coût C_{rl} est dépensé.
- Le coût d'une réparation minimale C_{min} est le même à chaque intervention après défaillance.

On a pour un seul cycle :

$$C(T) = \frac{C_{min}h(T) + C_{rg}}{T} \quad (4.10)$$

pour $(K - 1)$ cycle :

$$C(T, K) = \frac{C_{min}h(T)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) + (K - 1)C_{rg} + C_{rl}}{KT} \quad (4.11)$$

où :

- C_{min} : coût de la réparation minimale.
- C_{rg} : coût de la révision générale.
- K : nombre de révisions générales avant de renouveler l'équipement.
- C_{rl} : coût de renouvellement du système.
- e^α : facteur de dégradation.

4.4 Optimisation de la périodicité des révisions générales

Le but est de déterminer la période optimale pour faire une révision générale, notée T^* et qui minimise la fonction de coût de maintenance par unité de temps. La fonction objectif à minimiser est la suivante :

$$C(T, K) = \frac{C_{min}h(T)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) + (K - 1)C_{rg} + C_{rl}}{KT} \quad (4.12)$$

Tel que le nombre moyen de défaillances dans un intervalle $[0, T]$ est donné par :

$$h(T) = \int_0^T \lambda(t) dt$$

pour K cycles :

$$h(T, K) = \int_0^T \lambda(t * K) dt$$

Après intégration de $h(T, K)$, on trouve :

$$h(T, K) = \left(\frac{KT}{\eta}\right)^\beta$$

On remplace $h(T, K)$ dans le modèle de coût $C(T, K)$ et on trouve :

$$C(T, K) = \frac{C_{min} \left[\left(\frac{KT}{\eta}\right)^\beta \right] (1 + e^\alpha + e^{2\alpha} + \dots + e^{\alpha(K-1)}) (K-1) C_{rg} + C_{rl}}{KT} \quad (4.13)$$

D'après [12], on a :

$$(1 + e^\alpha + e^{2\alpha} + \dots + e^{\alpha(k-1)}) = \frac{e^{K\alpha} - 1}{(e^\alpha - 1)}$$

Alors :

$$C(T, K) = \frac{C_{min} \left[\left(\frac{KT}{\eta}\right)^\beta \right] (e^{K\alpha} - 1) / (e^\alpha - 1) + (K-1) C_{rg} + C_{rl}}{KT} \quad (4.14)$$

Après dérivation de $C(T, K)$ par rapport à la variable T , on trouve :

$$T^* = \sqrt[\beta]{\frac{(K-1) C_{rg} + C_{rl}}{(\beta-1) C_{min} \left[\left(\frac{K}{\eta}\right)^\beta \right] (e^{K\alpha} - 1) / (e^\alpha - 1)}} \quad (4.15)$$

4.4.1 Estimation des coûts

L'estimation des coûts de maintenance des ordinateurs s'avère complexe. Lors de l'estimation des coûts, nous nous baserons sur ces hypothèses :

- Les coûts qui n'ont pas d'incidences significatives sur cette étude sont négligeables.
- Le coût de chaque intervention comprend :
 - Le coût de la pièce de rechange.
 - Le coût de la main-d'oeuvre.
- Dans le modèle d'optimisation, nous avons supposé que les coûts sont identiques pour chaque intervention. Pour cela, nous allons déterminer un coût minimal pour les maintenances correctives et un coût moyen pour les maintenances préventives.

Estimation du coût de renouvellement

Le coût de renouvellement d'un ordinateur n'est pas disponible. Nous l'avons estimé en se basant sur le prix d'acquisition d'un nouveau ordinateur. Le coût de renouvellement est :

$$C_{rl} = 100000DA.$$

Estimation du coût de la maintenance corrective

Les coûts moyens de la maintenance corrective des différentes pannes sont indiqués dans la table(4.3).

Elément	Coût de la main d'oeuvre (DA/h)	Coût de la pièce de rechange (DA)	Total (DA)
Disque dur	300	5000	5300
Carte mère	300	8000	8300
Processeur	300	16000	16300
Écran	300	10000	10300

TABLE 4.3 – Les coûts de la maintenance corrective

D'après la table (4.3), nous avons pu déterminer le coût minimum d'une maintenance corrective, tel que :

$$C_{min} = 5300DA.$$

Estimation du coût de la maintenance préventive (révision générale)

Le coût de la révision générale est estimé à partir de la table (4.4), tout en considérant le coût du personnel ($150 DA/h$).

Élément	Coût de la pièce de rechange (DA)
Lecteur USB	450
Système d'exploitation	9000
Lecteur CD/DVD	2000
Barrette mémoire	3000
Ventilation CPU	500
Carte son	1200
Carte graphique	3500
Carte réseau	1200

TABLE 4.4 – Les coûts de la maintenance préventive

Le coût de la révision générale est : $C_{rg} = 39200DA$.

Facteur de dégradation

D'après les experts et les techniciens du Département Maintenance du GPL, les équipements (ordinateurs) reçoivent une réparation incomplète durant la révision générale. C'est pour cela que nous avons choisi le facteur de dégradation $e^\alpha = 1.1$, l'effet de la révision générale $\alpha = 0.0953$.

Détermination de K (nombre de cycles)

Après avoir pris connaissance des différents avis des agents de maintenance, nous avons conclu que pour renouveler carrément un ordinateur, nous avons besoin en moyenne de 12 révisions générales

4.4.2 Résultat de l'optimisation

L'allure de la fonction des coûts de maintenance en fonction du temps est présentée sur la (fig 4.1).

Le facteur de dégradation $e^\alpha = 1.1$, avec l'effet de la maintenance $\alpha = 0.0953$, nous donne le temps optimal qui minimise la fonction des coûts par unité de temps et pour un K égal 12 : $T^* = 3056.7h$

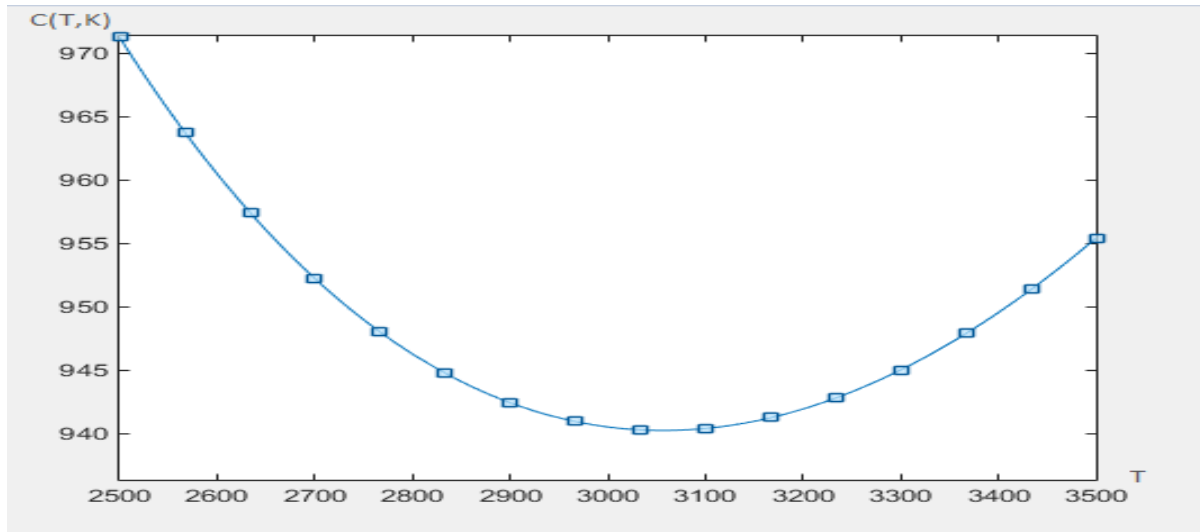


FIGURE 4.1 – L’allure de la fonction des coûts de maintenance

Interprétation des résultats

Après optimisation, la périodicité des révisions générales est $T^* = 3056.7h$, ce qui veut dire que le renouvellement des ordinateurs s’impose quand on atteint 12 cycles, sachant que 12 cycles font $36678h$, ce qui nous donne presque 4 ans.

4.5 Impact de l’efficacité de la maintenance sur la période de renouvellement des ordinateurs

L’objectif est d’étudier comment l’efficacité de la maintenance influe sur la période de renouvellement des ordinateurs. La méthode utilisée consiste à faire varier le paramètre de l’efficacité de la maintenance préventive α de 5%, 15%, 25%, 55%, 75% et de 80% par rapport à sa valeur initiale, puis calculer les coûts de maintenance par unité de temps et les comparer avec les résultats obtenus dans la partie précédente.

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.2), nous remarquons que l’amélioration de l’efficacité de 5% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de $3056.7 h$ à $3103.9 h$, avec un coût de $926.01 DA/h$.

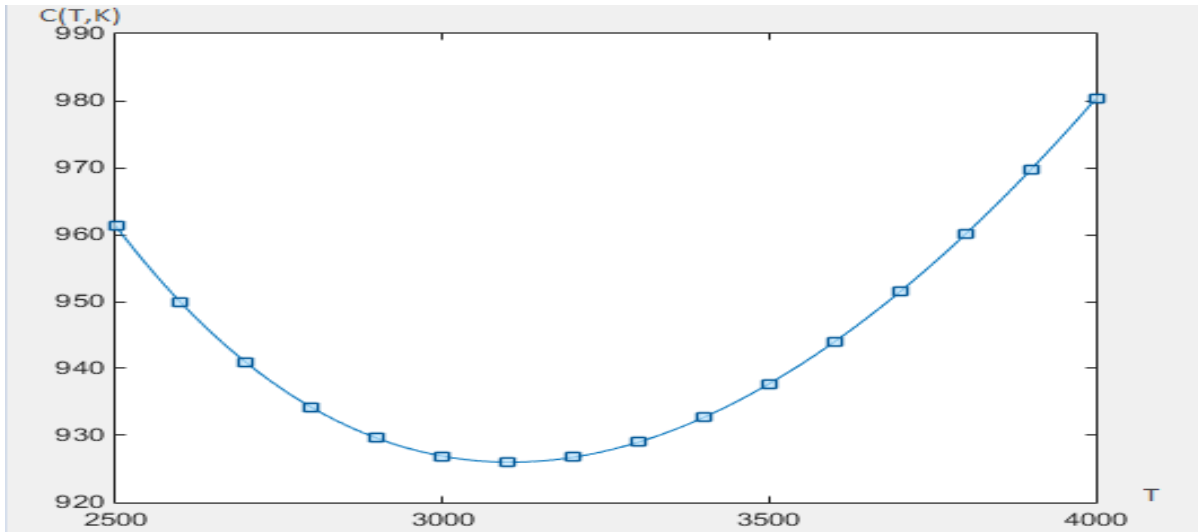


FIGURE 4.2 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 5%

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.3), nous remarquons que l'amélioration de l'efficacité de 15% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de 3056.7 h à 3156.5 h, avec un coût de 910 DA/h.

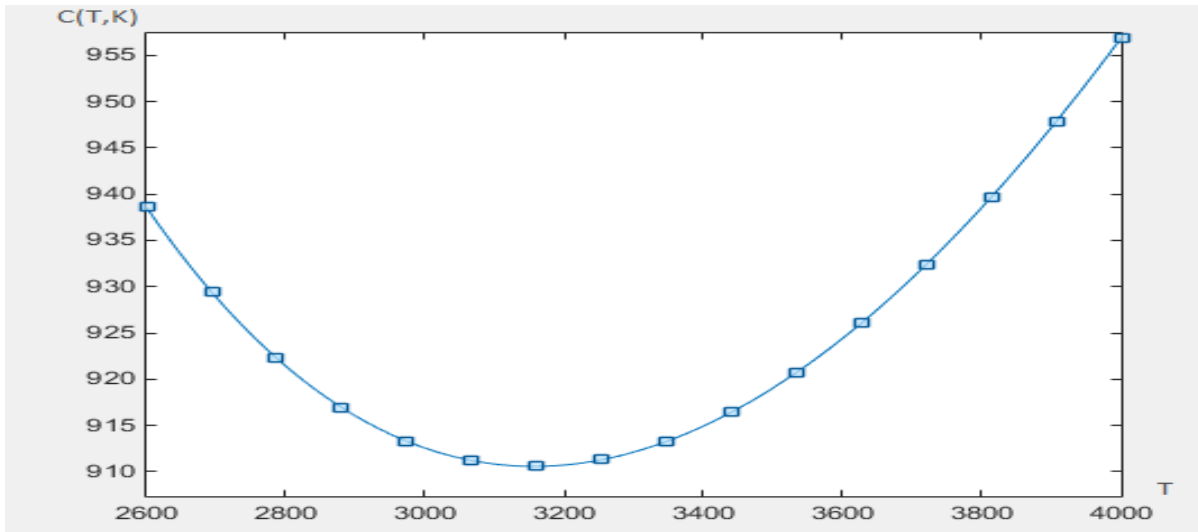


FIGURE 4.3 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 15%

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.4), nous remarquons que l'amélioration de l'efficacité de 25% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de 3056.7 h à 3203.9 h, avec un coût de 897.11 DA/h.

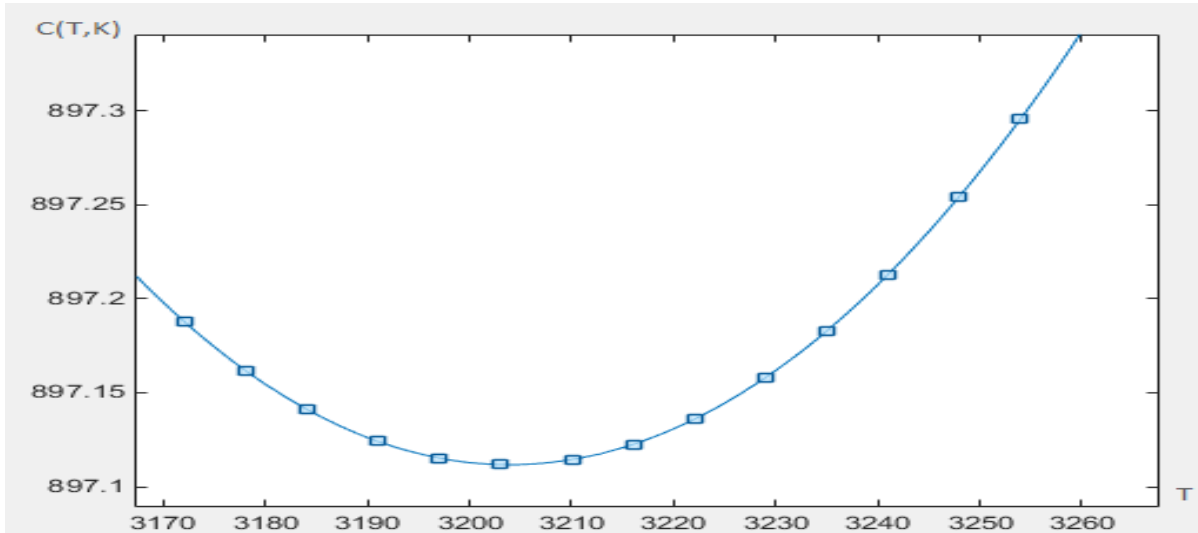


FIGURE 4.4 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 25%

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.5), nous remarquons que l'amélioration de l'efficacité de 55% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de 3056.7 h à 3351.8 h, avec un coût de 857.52 DA/h.

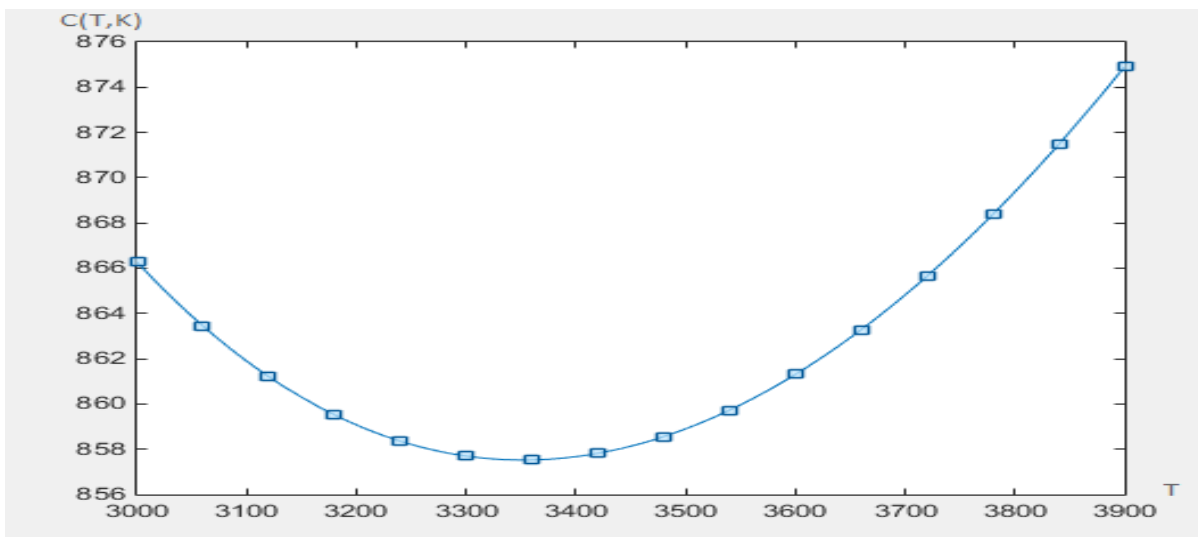


FIGURE 4.5 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 55%

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.6), nous remarquons que l'amélioration de l'efficacité de 75% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de 3056.7 h à 3457.6 h,

avec un coût de 831.29 DA/h .

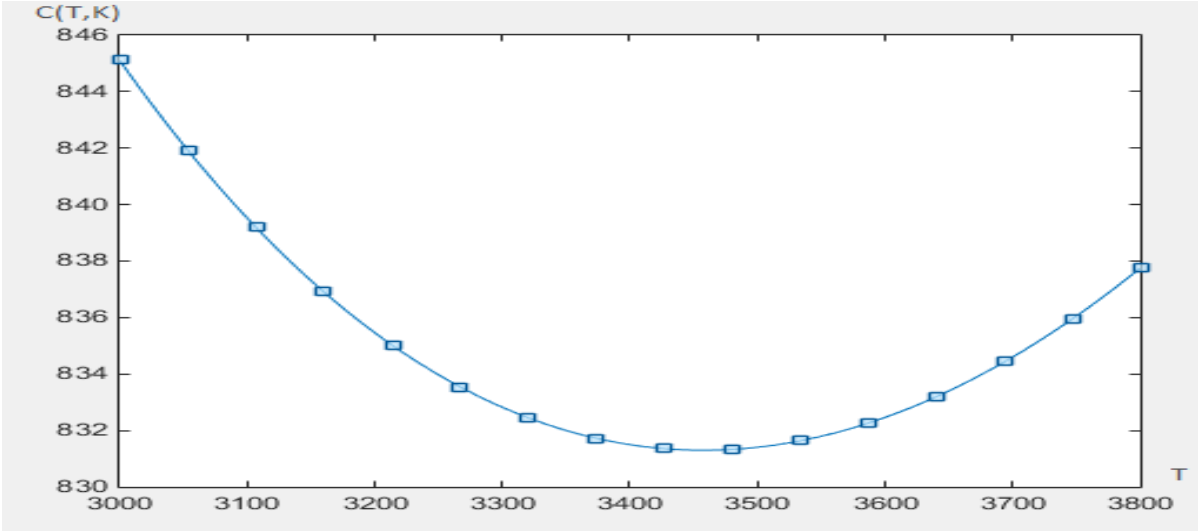


FIGURE 4.6 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 75%

A partir des résultats obtenus sur la (fig 4.7), nous remarquons que l'amélioration de l'efficacité de 80% prolonge la période de révision générale des ordinateurs de 3056.7 h à 3510.4 h , avec un coût de 818.79 DA/h .

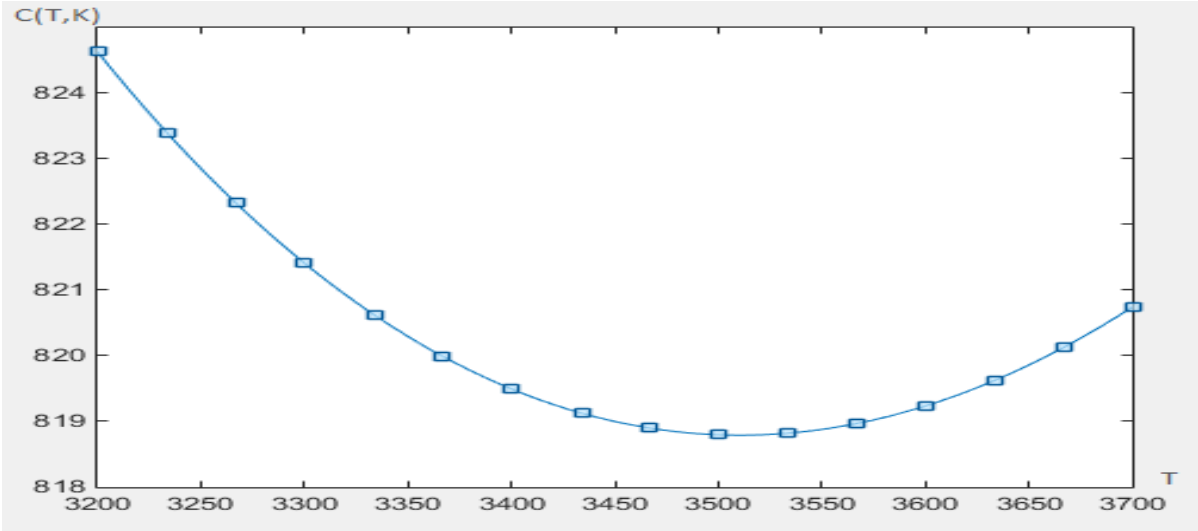


FIGURE 4.7 – L'allure de la fonction des coûts de maintenance avec amélioration de 80%

4.5.1 Interprétation des résultats

A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que l'amélioration de l'efficacité de la maintenance préventive (révision générale) a des réflexions sur l'exploitation de l'équipement. Donc le gestionnaire de la maintenance doit choisir l'efficacité de la maintenance qui permet de satisfaire au mieux les objectifs fixés a priori et permettre ainsi une exploitation optimale de l'équipement.

Les observations faites dans ce travail, nous ont montré l'adaptabilité de l'amélioration de l'efficacité de la maintenance de 5%, 15%, 25%, 55%, 75% et de 80%, aux objectifs fixés (le prolongement de la période des révisions générales donc, le prolongement de la période de renouvellement et minimisation des coûts de maintenance). Cependant, le choix d'amélioration de l'efficacité de la maintenance de 5% ou de 80% reste une décision à fixer par l'entreprise selon ses priorités en terme de périodicité ou de coût.

4.6 conclusion

Dans notre travail, nous avons construit un modèle d'optimisation pour la maintenance s'appuyant sur la politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance pour certains équipements informatiques du district GPL.

Par la suite, nous avons déterminé la période optimale des révisions générales, qui minimise la fonction des coûts de la maintenance par unité de temps. Ce qui nous a permis de proposer un plan de maintenance préventive pour ces équipements. Nous avons terminé notre travail par l'étude de l'impact de l'efficacité de la maintenance sur ces derniers. Nous avons constaté que l'amélioration de l'efficacité de la maintenance préventive a des réflexions directes sur le prolongement de la périodicité des révisions générales.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail est l'optimisation de la maintenance préventive du matériel informatique au sein du district GPL de Béjaïa.

Ainsi, un plan de maintenance s'appuyant sur la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance, est proposé. Nous rappelons qu'une politique de maintenance optimale est celle qui permet d'améliorer la disponibilité et réduire la probabilité de défaillance au moindre coût.

Grâce aux résultats obtenus, nous avons démontré qu'après l'adaptation d'une politique de maintenance préventive imparfaite avec réparation minimale, on a pu prolonger la période T des révisions générales de 896 h .

Le renouvellement de notre système sera après 12 cycles, avec un coût de maintenance préventive égal à 940 DA/h , sachant que 12 cycles correspondent à 36680 h . Ceci nous donne presque 4 ans.

Afin d'améliorer encore la maintenance, nous avons proposé d'augmenter le paramètre d'efficacité de cette dernière. Grâce aux résultats obtenus, nous avons constaté que la prise en compte de l'amélioration de l'efficacité permet d'augmenter la durée de vie du système.

Pour finir, nous proposons comme perspectives :

- Amélioration de notre travail par l'optimisation de la fonction des coûts par rapport à la deuxième variable qui sera le nombre de cycles K à répéter avant de procéder au renouvellement des équipements.
- Le réseau informatique du district GPL, installé en 2012 est composé de quatre "Switches" et un seul serveur. Etant donné que l'entreprise possède un historique de pannes sur le réseau, nous pouvons proposer comme perspective l'étude de la fiabilité et d'un plan de maintenance pour ce dernier.

Bibliographie

- [1] Afnor X60-000., Maintenance industrielle-Fonction maintenance. France, 2001.
- [2] Adjabi S., Statistique mathématique, Edition LAMOS, Université de Abderrahmane Mira de Béjaia.
- [3] Aissani A., Modèle stochastiques de la théorie de fiabilité ,O.P.U. 1992.
- [4] Aissani D., Cours de fiabilité. Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia Algrie, 2014.
- [5] Ait Mokhtar El et Mouhous A., Le modèle de réduction de l'intensité de défaillance pour l'optimisation de la maintenance d'un système réparable avec application à la Sonatrach. Mémoire de fin de cycle, Université de Béjaia Algrie, 2010..
- [6] Barlow R et Hunter L., Optimum preventive maintenance policies. Operations research, 8(1) :90-100, 1960.
- [7] Barlow R et Proschan F., Mathematical theory of reliability, Wiley, New York, 1965.
- [8] Boumarafi M., Modèle de réparation minimale basé sur l'actualisation bayésienne du taux défaillance. Thèse de doctorat, Université de Montréal Canada, 2014.
- [9] Brown M et Proschan F., Imperfect repair. Journal of applied probability, 20 : 851-859, 1983.
- [10] Cox D et al, Renewal theory. Methuen London, 1962.
- [11] Doyen L et Gaudoin O., Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble France, 2010.
- [12] Gertsbakh I., Reliability theory with applications to preventive maintenance. Springer, Berlin Allemagene, 2000.
- [13] Immediato H., Cours de statistiques. Université Claude Bernard - Lyon 1 France, Mass 42, 2001.
- [14] Kijima M et Morimura H et Suzuki Y., Periodical replacement problem without assuming minimal repair. European journal of operational research, 37 : 194 - 203, 1988.

- [15] Laggoune R et Al., La maintenance opportune des systèmes multi-composants, modélisation, optimisation, incertitudes et applications industrielles. Universitaires européennes, Sarrebruck Allemagne, 2011.
- [16] Laggoune R., Optimisation de la maintenance par la fiabilité opérationnelle des systèmes mécaniques multi-composants applications industrielles. Thèse de doctorat, Université de Béjaia Algérie, 2009.
- [17] Lionney P., La maintenance, mathématique et méthodes, ED. Techniques et documentation (Lavoisier), 1993.
- [18] Malik M., Reliable preventive maintenance scheduling. AIIE transactions, 11(3) :221-228, 1979.
- [19] Nakagawa T., Sequential imperfect preventive maintenance policies. IEEE Transactions on reliability, 37(3) :295-298, 1978.
- [20] Pham H et Wang H., Imperfect maintenance. European journal of operational research, 94(3) : 425-438, 1996.
- [21] Procaccia H et Piepsownik L., Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne, Ed. Eyrolles, 1992.
- [22] Puterman M.L., Markov decision process : Discrete stochastic dynamic programming. John Wiley et Sons, 1994.
- [23] Saporta G., Probabilité, analyse des données et statistiques, Ed Techniques, 1992.
- [24] Tango T., Extended block replacement policy with used items. Journal of applied probability, 560-572, 1978.
- [25] Tebbi O., Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés. Thèse de doctorat, l'institut des sciences et techniques de l'ingénieur d'Angers, France, 2005.

Annexe

Histogram of a^1

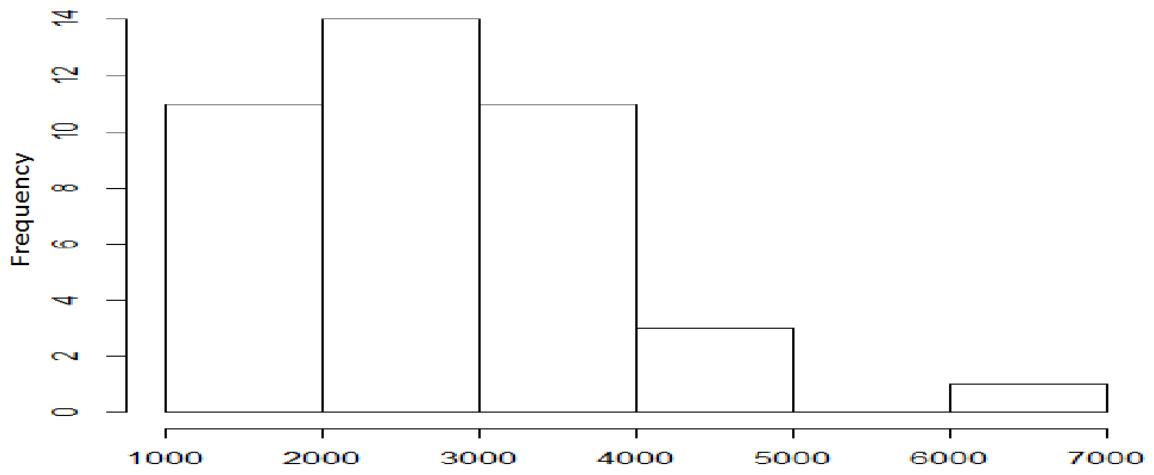


FIGURE 1 – Histogramme de la loi Weibull

1. a : l'échantillon des durées de vie des équipements choisis

Résumé

Dans ce travail, nous avons proposé un plan optimal de maintenance préventive pour les équipements informatiques au niveau de l'entreprise NAFTAL de Béjaïa. Dans un premier temps, nous avons étudié la fiabilité de ces derniers. Puis, nous avons adopté une politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance. Plus précisément, nous avons déterminé la période optimale entre les révisions générales qui minimise le coût de la maintenance préventive, tout en considérant l'efficacité de cette dernière. Afin d'examiner la possibilité de prolonger la période des révisions générales, nous avons aussi étudié l'impact de l'efficacité de la maintenance sur les équipements.

Mots clés : Optimisation de la maintenance ; fiabilité des équipement ; politique de maintenance ; efficacité de la maintenance ; révision général.

Abstract

In this work, we proposed an optimal plan of preventive maintenance for the computer equipments at the company NAFTAL Bejaia. First, we investigated the reliability of the latters. Then, we adopted an imperfect periodic preventive maintenance policy with minimal repair to failure. Specifically, we determined the optimal period between general revisions that minimizes the cost of preventive maintenance, while considering the efficiency of the latter. To examine the possibility of extending the period of general revisions, we also studied the impact of the effectiveness of maintenance on equipments. .

Keywords : Maintenance optimization ; reliability of equipment ; maintenance policy ; General review ; Maintenance efficiency