



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa



Faculté de la
Technologie

كلية
التكنولوجية

Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique

OPTION : Maintenance Industrielle

Thème

Optimisation des révisions partielles des systèmes
réparables intégrant le modèle a réduction arithmétique
d'intensité de l'efficacité de maintenance

Réalisé par :

- ✓ SAADA Lyes
- ✓ HAMADOUCHE Milissa

Devant le jury composé de :

- ✓ Mr KABYL
- ✓ Mr AIT MOKHTAR
- ✓ Mr LAGGOUNE
- ✓ Mm MAY

Président

Examineur

Promoteur

Co-Promoteur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères au bon Dieu pour la patience et la santé qu'il nous a accordé pour mener à bien tous nos efforts le long de notre parcours.

Nous remercions notre promoteur Mr R. LAGGOUNE pour nous avoir assuré l'encadrement et d'avoir consacré le temps nécessaire pour la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également exprimer notre reconnaissance à notre co-promoteur

Mm MAY LAMIA pour son aide et son soutien.

Enfin, nous tenons à remercier tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail sans oublier l'établissement Dar Leila.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A mes très chers parents : Aucun mot ne
saurait témoigner l'étendu des sentiments que
j'éprouve à leur égard je souhaite que Dieu leur
préserve une longue vie.*

*A la mémoire de ma cher grand-mère " Kirouane
Fatma" perdu le 11/05/2022*

Ma cher tante "Nesroune Chafiaa".

A mes très chères sœurs "Anais ", et "Leticia".

A mon frère : "Massinissa".

*A mes autres frères et chers : "Manon", "Aicha",
"Rasha", "Mehdi Chrikí", "Adnane", "Yanis", "Reda",
"Rabah" et "Nounou".*

A mon Binôme et à toute la famille "Saada".

*A tous mes amis(es) sans exception (équipage sport
mécanique ...).*

*A toute la promotion Master II Maintenance
Industrielle (2021-2022)*

Hamadouche Milissa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents : Aucun mot ne saurait témoigner l'étendu des sentiments que j'éprouve à leur égard je souhaite que Dieu leur préserve une longue vie.

A mes très chères frères : "Riad ", et "Nourredine", "Yanis".

A ma sœur: "Nesrine".

A mes autres frères et chers : "Sofiane", "Yanis", "Mehdi", "Mouhou", "Fares", "Reda", "Nourredine", "Redouane" et "Ahmed", "Syphax"

A mon Binôme et à toute la famille "Hamadouche".

A toute la promotion Master II Maintenance Industrielle (2021-2022)

Saada Lyes

Table des matières

Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
Glossaire	9
Introduction générale	10
Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.	12
I.1. Notions de base sur la maintenance :	13
I.2. Définitions de la maintenance :	14
I.3. Le rôle de la maintenance :	15
I.4. Les objectifs de la maintenance :	15
I.4.1. Les objectifs de coût :	15
I.4.2. Les objectifs opérationnels :	15
I.5. Les type de maintenances :	15
I.5.1. Maintenance corrective :	15
I.5.1.1. Les différents types de maintenance corrective :	15
I.5.1.2. La maintenance corrective débouche deux types d'interventions :	16
I.5.2. Maintenance préventive :	16
I.5.2.1. Les objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants :	16
I.5.2.2. Les différents types de maintenance préventive :	16
I.6. Efficacité de la maintenance :	17
II.2. Rappel sur les processus stochastiques :	25
II.2.1. Définition d'un processus aléatoire :	25
II.2.2. Définition d'un processus de dénombrement :	26
II.2.3. Définition d'un processus de renouvellement :	26
II.2.4. Définition d'un processus de poisson :	26
II.2.4.1. Processus de poisson homogène, PPH :	27
II.2.4.2. Les processus de poisson non homogène (NHPP pour Non Homogenous Poisson Processus) :	27
II.3. Les modèles de base d'efficacité de la maintenance :	28
II.3.1. Le modèle de maintenance minimale (ABAO) :	28
II.3.2. Le modèle de maintenance parfaite (AGAN) :	28
II.4. Modèles de maintenance imparfaite :	29
II.4.1. Modèles à réduction d'âge :	29
II.4.2. Modèles à réduction d'intensité :	30
II.4.2.1. Modèle de Chan et Chaw :	30
II.4.2.2. Modèle à réduction géométrique d'intensité :	31
II.4.3. Modèle hybride :	32

II.5. Modèles à réduction arithmétique d'intensité :	32
II.5.1. Modèle <i>ARI1</i> :	34
II.5.2. Modèle <i>ARI</i> ∞ :	35
II.5.3. Modèle ARI de mémoire m :	36
Introduction	39
III.1. Modèle de coût :	39
III.2. Choix de la politique de maintenance :	39
III.3. Construction du modèle :	40
Conclusion :	42
Introduction :	44
IV.1. Optimisation du coût de maintenance	44
IV.1.1. Algorithme de résolution	44
IV.1.2. Résultats d'estimation	46
Conclusion	52
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	54

Liste des figures

Figure IV. 1 : Organigramme d'optimisation du cout de maintenance.**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 2: la courbe du coût de maintenance représenté en 3D.**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 3: la courbe du coût de maintenance représenté en 2D.**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 4:Comportement du temps optimum en fonction de la variation du paramètre ρ .
.....**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 5: Comportement du temps optimum en fonction de la variation du rapport C_p/C_c .
.....**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 6:Comportement du temps optimum en fonction de la Corrélation entre β et η en 3D.**Error! Bookmark not defined.**

Figure IV. 7: Comportement du temps optimum en fonction de la Corrélation entre β et η en 2D.**Error! Bookmark not defined.**

Liste des tableaux

Tableau IV.1. Résultats de l'influence du paramètre ρ sur le temps optimum

Tableau IV.2. Résultats de l'influence du rapport C_p/C_c sur le temps optimum

Tableau IV.3. Résultats de la corrélation entre β et η et son influence sur le temps optimum

Glossaire

ABAO	As Bad As Old
AGAN	As Good As New
MUT	Main Up Time
MP	Maintenance Préventive
MC	Maintenance Corrective
PPH	Processus de Poisson Homogène
NPPH	Processus de Poisson Non Homogène
AFNOR	Association Française de Normalisation

Introduction générale

Durant les dernières décennies, il s'est produit une évolution de la notion d'entretien vers la notion de maintenance. L'entretien se limitait souvent à subir les défaillances et les contraintes des machines et des installations de production alors que la maintenance englobe de plus en plus la maîtrise économique de la disponibilité des outils de production.

Pour souligner l'importance de la maintenance dans le fonctionnement de l'entreprise, elle est nommée « Fonction maintenance ». Il s'agit même d'une fonction vitale puisque, sans maintenance, tout processus industriel cesse, généralement à court terme, de produire les biens ou les services pour lesquels il a été conçu.

Maintenir c'est effectuer des opérations de dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration ...etc. Celles-ci permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir c'est aussi assurer ces opérations au coût global optimum.

La maîtrise de la disponibilité des biens, des matériels et des équipements industriels, permettrait à l'industrie d'agir sur la régularité de sa production et sur ses coûts de fabrication, mais cette maîtrise est loin d'être parfaitement efficace. De ce fait il devient nécessaire de développer des outils menant à cet objectif ; nous citons : la maintenance préventive avec tous ses types, l'optimisation de la maintenance, la modélisation de l'efficacité de la maintenance, l'analyse de fiabilité, l'analyse de sûreté de fonctionnement...etc.

L'optimisation de la maintenance est d'une importance fondamentale pour la sûreté et la productivité des installations industrielles. Ainsi, depuis les années 1950-1960 de nombreux travaux proposent des modèles mathématiques permettant de définir la politique de maintenance optimale à adopter.

Notre mémoire a pour ambition de fournir une démarche scientifique qui permettrait l'amélioration de la gestion des équipements. Il s'agit plus particulièrement de minimiser les périodicités des maintenances préventives d'un système réparable. Pour cela ; nous avons adopté une politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance ; nous considérons que les maintenances périodiques sont imparfaites, ce qui peut être assimilé à des révisions partielles.

Dans la plupart des travaux effectués dans le domaine de la modélisation de la maintenance, leur recherche se base sur l'efficacité de maintenance mais il y a peu d'entre eux qui ont tenté d'intégrer cette efficacité dans des modèles de maintenance. Dans notre travail nous allons essayer d'intégrer l'efficacité de la maintenance dans le modèle de coût pour l'optimisation de la maintenance préventive des systèmes réparables.

Le mémoire est structuré comme suit :

Après une introduction où nous exposons la problématique ainsi que le contexte de l'étude nous trouverons les quatre chapitres suivants :

Le chapitre I de ce document est destiné à décrire la définition des notions générales de la maintenance ainsi que quelques rappels sur la théorie de fiabilité (définitions et types de maintenance et son efficacité d'une part, et définitions ainsi que quelques lois de probabilités d'une autre part).

Le chapitre II consiste à décrire la modélisation de l'efficacité de la maintenance préventive (nous citerons les différentes politiques d'optimisation de maintenance ainsi que les principaux modèles traitant l'efficacité de maintenance, en favorisant les modèles à réduction d'intensité de défaillance qui représente l'objet de notre recherche) ainsi que quelques rappels sur les processus stochastiques vue leurs importance et leurs implication direct dans la modélisation de l'efficacité de maintenance.

Le chapitre III sera consacré au choix et développement du modèle d'efficacité de maintenance (ARI_1) que nous allons ensuite appliqués sur la politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimal à défaillance afin de construire un modèle de coûts dont la fonction objective est de minimiser les coûts de maintenance.

Le chapitre IV sera consacré à l'application du modèle de maintenance construit sur les données de départ, qui seront ensuite intégrés dans notre modèle de coûts proposé pour optimiser le nombre de révisions partielles et leurs périodicités, afin de minimiser les coûts et d'assurer une disponibilité élevée, ainsi nous pouvons calculer le cycle de renouvellement (durée de vie) de l'équipement, suivie d'une analyse de sensibilité.

Le travail se termine par une conclusion générale ou nous donnons les résultats auxquels nous sommes aboutis ainsi que les axes à explorer dans l'avenir. Suivie d'une liste de références bibliographiques consultées lors de la réalisation de ce travail.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.

Introduction

La maintenance est l'une des fonctions de l'entreprise, mais elle n'est pas une fin en soi. A ce titre, elle est peu lisible et parfois méconnue des décideurs qui sous-estiment son impact. Et pourtant, elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître.

Dans ce premier chapitre nous avons présenté la fonction de maintenance en générale, en passant par ses différents types et en introduisant son rôle et son efficacité, dans le but de prouver qu'elle n'est pas seulement une fonction masquée qui agit comme prestataire du service interne et qu'elle est fortement évolutive.

I.1. Notions de base sur la maintenance

Selon la norme NF EN 13306 la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

D'après cette définition on distingue les remarques suivantes :

- ✓ La maintenance est l'ensemble des actions techniques (réparations, échange standard, serrage, réglages, etc.) et administratives ainsi que de management (ordonnancement, préparation et lancement de ces actions).
- ✓ La maintenance n'est pas uniquement réparer ou faire de l'entretien, c'est aussi de la gestion et de l'organisation. Sans ces deux dernières, les résultats pourraient être très mauvais. En effet, si l'on dispose d'une équipe de main d'œuvres en matière d'intervention mais pour une négligence administrative ou de gestion, cela peut produire une rupture de stock des pièces de rechange requises. Le temps d'arrêt pourrait être alors allongé outre mesure ce qui générerait des pertes financières pouvant être très importantes. Le résultat de la maintenance est alors mauvais bien que, sur le plan technique, l'équipe de maintenance soit excellente. Le management et l'administration sont deux nécessités impérieuses pour la maintenance comme pour toute autre activité d'ailleurs.

Pour atteindre la fonction objective de la maintenance les deux ensembles des actions technique et administrative doivent se compléter.

Les deux grands ensembles d'action de maintenance, techniques, d'un côté, et administratives et de management, de l'autre, sont les suivants :

- ✓ actions administratives et de management :
- ✓ organisation du service de maintenance,
- ✓ formation du personnel,
- ✓ définition des processus, procédures et instruction de maintenance,
- ✓ définition des formes d'actions techniques à mener et établissement de leurs gammes,
- ✓ actions d'intervention technique :
- ✓ contrôles, inspections, vérifications,
- ✓ réparations, remplacements,
- ✓ réglages, resserrages,

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.

- ✓ graissages et lubrifications

L'ensemble des grandes actions de maintenances sont représentés dans la figure suivante ;

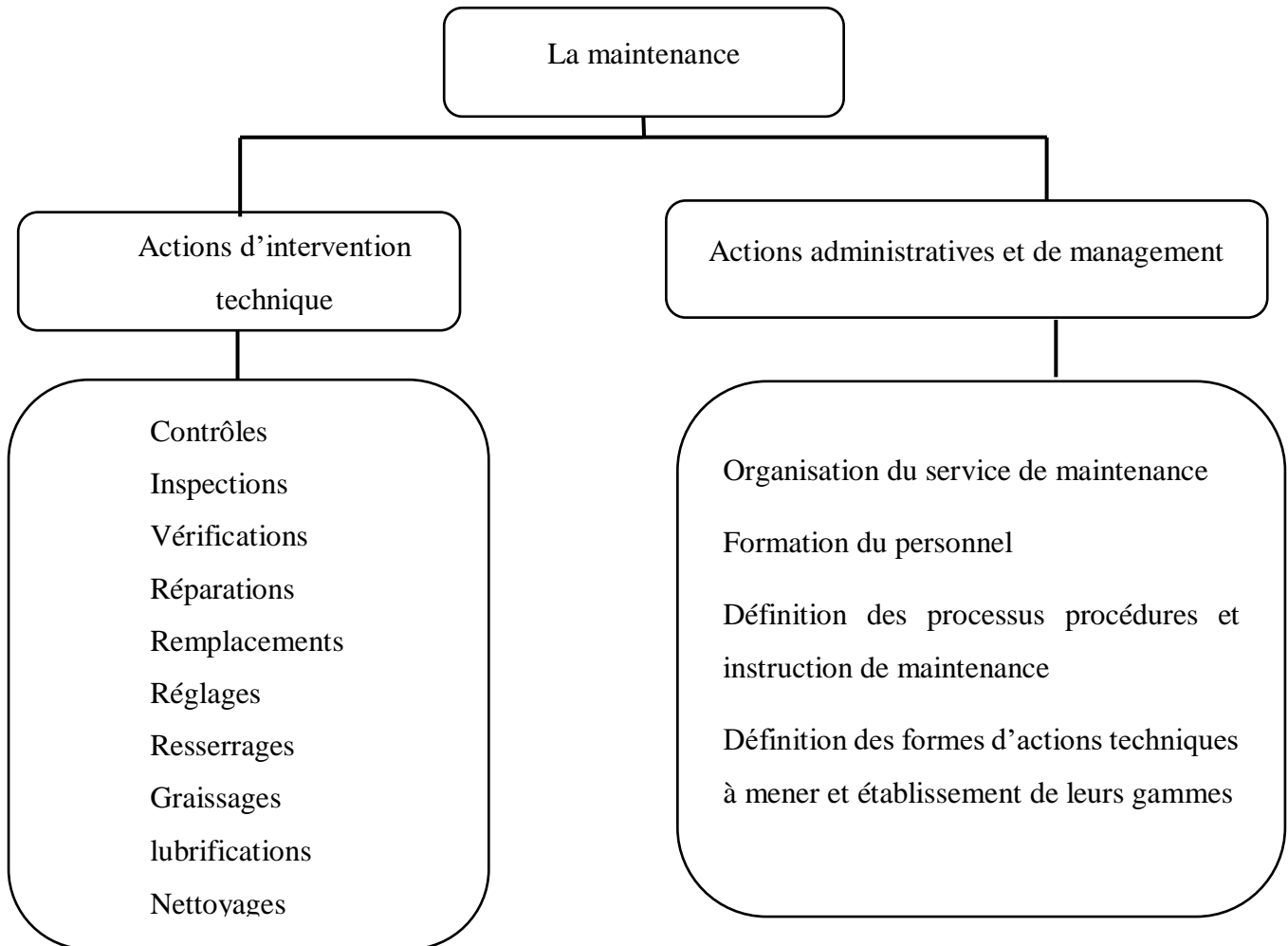


Figure I.1 : ensembles d'action de maintenance

I.2. Définitions de la maintenance

Selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010, la maintenance est définie comme étant : « Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». [9]

Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal.

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- ✓ Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance.
- ✓ Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.

- ✓ Etat spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- ✓ Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

I.3. rôle de la maintenance

Est la maîtrise de la disponibilité opérationnelle des équipements afin qu'ils soient mis à la disposition de la production par ces actions.

- ✓ La réduction des coûts de maintenance
- ✓ L'accroissement de la durée rentable de vie des équipements.
- ✓ Réduction des accidents et des risques concernant la sécurité des hommes et de l'environnement [15].

I.4. objectifs de la maintenance

I.4.1. objectifs de coût

- ✓ Minimiser les dépenses de maintenance.
- ✓ Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- ✓ Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation.
- ✓ Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue [15].

I.4.2. objectifs opérationnels

- ✓ Maintenir le bien durable: dans un état acceptable, dans des meilleures conditions.
- ✓ Assurer la disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- ✓ Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- ✓ Maximiser la durée de vie de bien [15].

I.5. type de maintenances

I.5.1. Maintenance corrective

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, le remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement [15].

I.5.1.1. différents types de maintenance corrective

a. Maintenance palliative

Activités de maintenance palliative destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise.

b. Maintenance curative

Cette maintenance curative principalement constituée d'actions à caractère provisoire, appelé couramment dépannage.

I.5.1.2. maintenance corrective débouche deux types d'interventions :

1. dépannage

Remise en état de fonctionnement effectué « in situ », parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Le dépannage a un caractère provisoire. Les dépannages caractérisent la maintenance palliative. Le palliatif est caractéristique du 2^{ème} niveau de maintenance [15].

2. réparation

Faite en atelier de maintenance, parfois après dépannage. Elle a un caractère définitif. La réparation caractérise la maintenance curative. Le curatif est caractéristique des 2^{èmes} et 3^{ème} niveaux de maintenance [15].

I.5.2. Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle) [15].

a. objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants

- ✓ Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service : réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité
- ✓ Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement
- ✓ Améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production
- ✓ Réduire et régulariser la charge de travail
- ✓ Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues)
- ✓ Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses)
- ✓ Plus globalement, en réduisant la part « d'imprévu », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension)
- ✓ La mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive implique le développement d'un service « méthodes de maintenance » efficace. En effet, on ne peut faire de préventif sans un service méthodes qui va alourdir à court terme les coûts directs de maintenance, mais qui va permettre :
 - ✓ La gestion de la documentation technique, des dossiers machines, des historiques.
 - ✓ Les analyses techniques du comportement du matériel.
 - ✓ La préparation des interventions préventives.
 - ✓ La concertation avec la production. [15]

I.5.2.2. Les différents types de maintenance préventive

a. Maintenance préventive systématique

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (EN 13306 : avril 2001).

Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.

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

b. Maintenance préventive conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue (EN 13306 : avril 2001).

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

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

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- ✓ Le niveau et la qualité de l'huile
- ✓ Les températures et les pressions
- ✓ La tension et l'intensité des matériels électriques
- ✓ Les vibrations et les jeux mécaniques

c. Maintenance préventive prévisionnelle

C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions [15].

I.5.2.3. Buts de la maintenance préventive

- ✓ Augmenter la durée de vie des matériels;
- ✓ Diminuer la probabilité des défaillances en service;
- ✓ Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne;
- ✓ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective;
- ✓ Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions;
- ✓ Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.;
- ✓ Améliorer les conditions de travail du personnel de production;
- ✓ Diminuer le budget de maintenance;
- ✓ Supprimer les causes d'accidents graves. [15]

I.6. Efficacité de la maintenance

Plusieurs modèles sont inventés pour évoluer l'efficacité de la maintenance, en effet deux modèles de base sont trouvés pour la modélisation de l'efficacité de la maintenance. Nous supposons soit que la maintenance est inefficace ce qui fait appel au modèle ABAO (As Bad As Old) qui part du principe que le système est remis en marche dans l'état exacte ou il était juste avant la défaillance après chaque action de maintenance (réparation minimale), soit qu'elle remet les matériels à neuf ce qui fait dans ce cas appel au modèle AGAN (As Good As New) qui part du principe que le système est remis à neuf après chaque action de maintenance

(réparation parfaite). En pratique les ingénieurs de maintenance rencontre des difficultés, vue que l'effet de la maintenance est ni parfait ni minimal, car en réalité on est souvent entre ces deux cas extrêmes (entre une maintenance minimale et une maintenance parfaite), et ici on parle de la maintenance imparfaite (Imperfect Maintenance) qui a pour but de ramener les performances du composant dans un domaine acceptable.

Les modèles d'efficacité de maintenance sont représentés dans la figure suivante ;

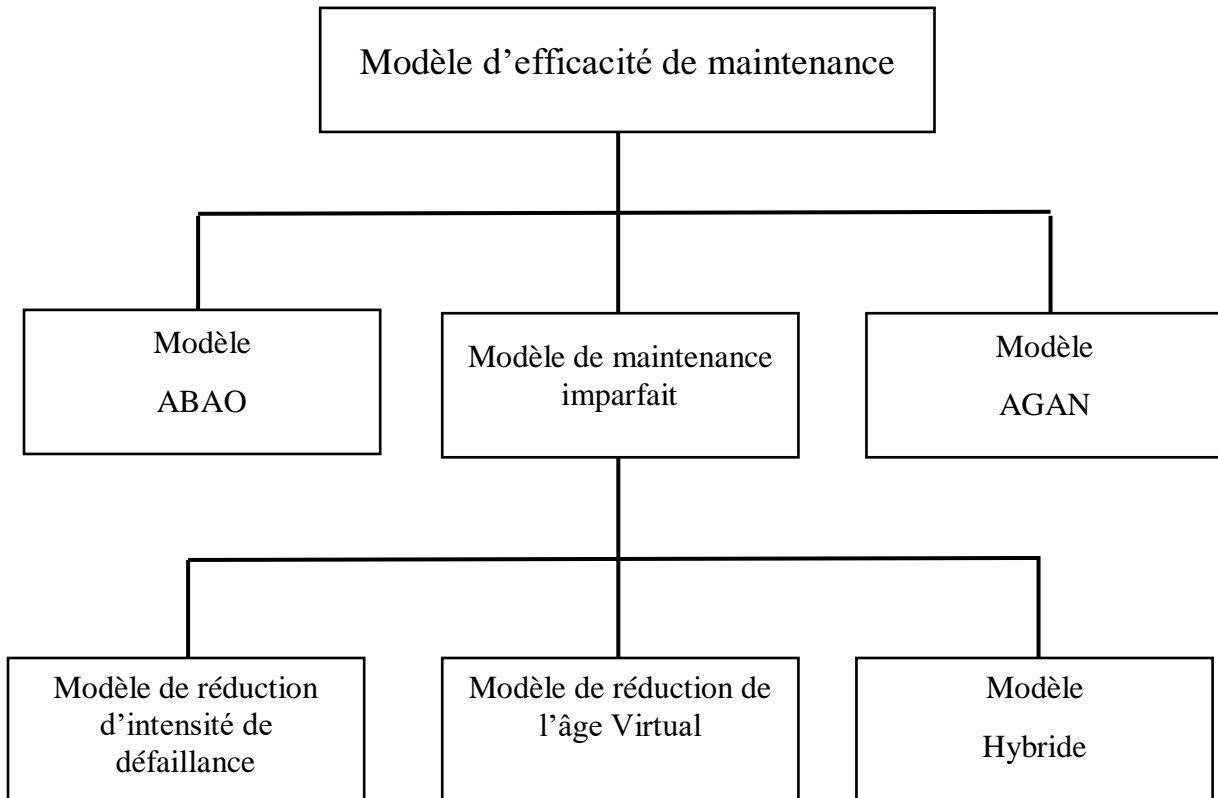


Figure I.2. Les modèles d'efficacité de maintenance.

I.7.Rappels sur la fiabilité

L'élaboration d'une politique ou d'un modèle de maintenance nécessite une parfaite connaissance du comportement opérationnel des systèmes (réparables et non réparables), ceci est obtenu par la détermination des lois de fiabilité les plus réalistes possibles.

Pour cela, dans cette partie nous avons présenté un résumé sur les notions fondamentales de fiabilité qui vont nous aider dans le troisième chapitre pour construire une politique de maintenance.

I.7.1. Définition normalisée de la fiabilité

« L'aptitude (probabilité) d'une entité à accomplir une fonction requise pendant un intervalle de temps donné dans des conditions données » [9].

I.7.2. Définition de la défaillance

La défaillance est une perte partielle ou totale des propriétés d'un élément, qui entraîne une diminution significative ou bien une perte totale de la capacité de fonctionnement [10].

I.7.3. Principales fonctions statistiques utilisées en fiabilité

Le temps d'apparition de la défaillance d'un élément est imprévisible et possède un caractère aléatoire. Nous dirons que c'est une variable aléatoire. On appelle variable aléatoire T une variable telle qu'à chaque valeur t de T , on puisse associer une probabilité. La correspondance entre une variable aléatoire et la probabilité qui lui est associée établit une loi de probabilité.

✓ **La fonction de fiabilité**

La fonction fiabilité d'un système correspond à la probabilité de bon fonctionnement dans un intervalle donné. Noté par $R(t)$ la fonction de fiabilité s'exprime [11] :

$$R(t) = P(T > t) \quad (\text{I.1})$$

Avec $t \in [0, T]$

✓ **La fonction de répartition**

La fonction de répartition est la probabilité de défaillance d'un système au moins une fois dans un intervalle donné. Noté par $F(t)$ la fonction de répartition de s'exprime [11] :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (\text{I.2})$$

Avec $t \in [0, T]$

✓ **Densité de probabilité**

La densité de probabilité notée par $f(t)$ c'est la dérivée de la fonction de répartition dans le temps donc :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{I.3})$$

Elle représente la probabilité de défaillance d'un système à l'instant t [11].

✓ **Le taux de défaillance**

Le taux de défaillance instantané noté $\lambda(t)$ désigne la probabilité que le système (élément) doit accomplir de manière satisfaisante sa fonction requise, sous des conditions donné et pendant un intervalle de temps donné. Il est défini sur R [11].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{I.4})$$

✓ **Esperance mathématique**

Mean up time (MUT) en anglais, espérance mathématique noté $E(t)$ représente le moyen de temps de bon fonctionnement de système [11].

$$E(t) = \int_0^t x f(x) dx \quad (I.5)$$

II.7.3.Principales lois de probabilités utilisées en fiabilité

La fiabilité des systèmes industrielle sont caractérisé par des lois de probabilité de leur durée de bon fonctionnement, en effet pour leur facilité à l'utilisé et leur rapprochement a la réalité les lois couramment utilisées en fiabilité sont : la loi exponentielle la et la loi de Weibull.

✓ **loi de Weibull**

La loi de Weibull comme nous l'avons cité si dessus et la loi le plus utilisée dans le domaine de la fiabilité. Et cela revient à sa forme flexible qui répond aux exigences de ce domaine. Elle est définie par trois paramètres le paramètre de forme β , le paramètre d'échelle η et le paramètre de localisation γ .

La loi de Weibull est caractérisé par :

✓ Fonction de fiabilité:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (I.6)$$

✓ densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (I.7)$$

✓ taux instantané de défaillance:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (I.8)$$

Remarque : la loi de weibull elle est utilisable pour tous les systèmes industriels (réparable et non réparable) [11].

✓ **Loi exponentielle**

Comme nous l'avons dit la loi de weibull est une loi de trois paramètres " β ", " η " et " γ " , si on prend $\beta = 1$ et $\gamma = 0$, on se trouve avec une loi d'un seule paramètre noté " λ ", cette loi elle est appelé la loi exponentielle [11].

La loi exponentielle est caractérisée par :

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et fiabilité.

✓ la fiabilité :

$$\circ R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (\text{I.9})$$

✓ la densité de probabilité :

$$\circ f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (\text{I.10})$$

✓ le taux de défaillance :

$$\circ \lambda(t) = \lambda = \frac{1}{\eta} \quad (\text{I.11})$$

✓ la durée de vie moyenne est l'inverse de taux de défaillance :

$$MUT = \eta = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{I.12})$$

Remarque : la loi exponentielle elle utilisable pour des systèmes non réparable comme des systèmes électrique.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini la fonction de maintenance et ses différentes et principales tâches et actions, puis on a touché les types de maintenance tout en introduisant leurs rôles en générale et on a terminé en parlant sur l'efficacité de la maintenance et son rôle dans l'industrie et quelques notions de base essentielles.

Chapitre II : Modèles d'efficacité de la maintenance.

Introduction

Jusqu'à ce jour nous n'avons étudié que les deux hypothèses de base que l'on utilise pour la modélisation du comportement des systèmes réparables :

- ✓ Soit l'efficacité de la maintenance est parfaite, d'une autre manière notre système est remis à neuf soit après une réparation ou après une maintenance préventive totale : c'est ce qu'on appelle la situation aussi bon que neuf (AGAN).
- ✓ Soit elle est minimale, ou toute action de maintenance laisse le système dans le même état qu'avant une défaillance ou une maintenance préventive : c'est ce qu'on appelle la situation aussi vieux que vieux (ABAO).

Nous avons développé la plupart des modèles stochastiques de défaillance qu'en considérant ces deux seuls cas. Bien que dans des situations particulières ces hypothèses peuvent être justifiées, il est évident qu'en pratique la réalité se situe entre ces situations : avec une maintenance normale le matériel est restauré en partie, donc on réduit l'intensité de défaillance sans remettre le système totalement à neuf.

Dans ce chapitre nous avons développé les principaux modèles de la maintenance imparfaite qu'on utilise en pratique.

II.1. politiques de maintenance :

Pour une meilleure optimisation d'une maintenance d'un système réparable, il est nécessaire de définir une politique de maintenance à appliquer.

Pour définir une politique qui convient à un système réparable donné, il est primordial de connaître les critères de performance des différentes politiques appliquées dans l'industrie. Notons qu'une multitude de critères existe pour évaluer ses dernières. Nous distinguons généralement trois critères principaux : le coût, la disponibilité et le critère de sécurité.

Dans cette partie nous avons défini quelques politiques de maintenance mono-composants appliquées à des systèmes réparables et leurs critères principaux.

II.1.1. Politique de MP 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 par [13] :

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

Où le numérateur représente l'espérance du coût total du cycle et le dénominateur représente l'espérance de la longueur du cycle ;

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

II.1.2. 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 MP périodique de base est «**le 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. Dans cette classe, on peut également citer la politique de remplacement en block ou un élément est remplacé à des temps pré arrangés KT et à la défaillance (généralement utilisée pour les systèmes multi-composants)[12].

II.1.2.1. 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 des défaillances dans un intervalle $[0 ; T]$ est donné par [12] :

$$H(t) = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (\text{II.2})$$

Où (t) représente le taux d'occurrence de défaillances (*ROOCOF pour Rate OF Occurrence OF Failures*), pour un composant non réparable il représente le taux de défaillance, Alors l'expression du coût est :

$$C(t) = \frac{C_c H(t) + C_p}{T} = \frac{C_c \int_0^T \lambda(t) dt + C_p}{T} \quad (\text{II.3})$$

Ou :

- ✓ $\lambda(t)$: représente le taux de défaillance ;
- ✓ $H(t)$: représente le nombre moyen de remplacements de 0 à T ;
- ✓ C_p : représente le coût de la maintenance préventive.
- ✓ C_c : représente le coût entraîné par la défaillance ou bien coût de la maintenance corrective.

II.1.2.2. Politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale

Suivant cette politique, l'élément n'est pas remplacé périodiquement, mais reçoit juste des maintenances imparfaites. Comme exemple nous pouvons citer une machine industrielle qui reçoit périodiquement des révisions partielles et après un certain nombre de révisions partielles, la machine reçoit une révision générale. Ce qui voudra dire que le taux d'occurrence de défaillances va changer après chaque action de maintenance préventive, car nous rappelons que, 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. Le taux de défaillance du système après chaque maintenance sera exprimé en fonction de cet effet et du taux de défaillance précédent. Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(t) = \frac{C_c \cdot H(t) (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) + (K-1)C_p + C_{ov}}{KT} \quad (\text{II.4})$$

- ✓ C_c : Coût de la réparation minimale ;
- ✓ C_p : Coût de maintenance préventive imparfaite (révision partielle) ;
- ✓ C_{ov} : Coût de la révision générale ;
- ✓ K : Nombre de révisions partielles avant la révision générale ;
- ✓ e^α : Facteur de dégradation ;

II.1.2.3. Politique de maintenance utilisant un remplacement en block

Une nouvelle unité commence à fonctionner à $t=0$. A chaque défaillance on effectue une opération de réparation urgente (l'unité défaillante est remplacée par une autre) qui dure un temps t_c . Après un temps T une action de maintenance préventive est effectuée et qui dure un temps t_p . Chacune des réparations urgentes et maintenances préventives renouvellent le système.

La disponibilité moyenne par unité de temps est donnée par :

$$A(T) = \frac{T}{T+h(T)t_c+t_p} \quad (\text{II.5})$$

Avec

- ✓ C_p, C_c : coûts de la maintenance préventive et de réparation (corrective).
- ✓ $h(T)$: nombre moyen de réparations urgentes.
- ✓ t_p, t_c : temps de maintenance préventive et de réparation urgente (corrective).

II.2. Rappel sur les processus stochastiques

Pour calculer la fiabilité d'un système dans le cas d'un matériau non-réparable en générale, on fait appel à des lois de probabilités statistiques.

Par contre dans le cas d'un matériau réparable la fiabilité peut être interprétée comme la probabilité de ne pas tomber en panne dans une période particulière, celle-ci étant elle-même conditionnée par l'historique des interventions de maintenance passé. Elle n'est plus modélisée par une distribution statistique mais par des processus ponctuels stochastiques de comptage de nombre de défaillances. Ce qui nous emmène à l'obligation de passer par ces processus.

II.2.1. Définition d'un processus aléatoire :

On appelle un processus aléatoire à temps continu une famille $\{X_t ; t \in T\}$ de variables aléatoires ou par un paramètre réel positif. Les variables sont définies sur un même espace probabilisé. Pour une éventualité du hasard ω fixée, l'application qui à t associe la valeur $X_t(\omega)$ s'appelle une trajectoire de processus. Les trajectoires constituent généralement les observations concrètes qu'on peut faire d'un processus ; et on trouve [2]:

Un processus est à valeur réel si ;

$$X_t \in \mathbb{R}, \text{ pour tout } t \geq 0$$

Un processus est à valeur entière si ;

$$X_t \in \mathbb{R}, \text{ pour tout } t \geq 0$$

II.2.2. Définition d'un processus de dénombrement :

Les modèles utilisant le processus de comptage jouent un rôle crucial dans l'analyse des systèmes composés d'événements d'occurrence aléatoires.

Considérant $N(t)$ le nombre d'événements cumulés de 0 jusqu'à t . Un processus de comptage représente, tout simplement, le nombre d'événements qui ont lieu dans un certain intervalle de temps, on le note par $\{N(t), t \geq 0\}$ [1].

Les modèles les plus connus qui utilisent le processus de dénombrement sont les processus de Poisson, homogène et non-homogène.

II.2.3. Définition d'un processus de renouvellement :

Le Processus de renouvellement est un processus de dénombrement pour lequel les durées

de vie $T_1, T_2, T_3 \dots$ sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

Les temps $S_n = \sum_{j=1}^n T_j$ s'appellent alors les temps de renouvellement [3].

Le RP permet de modéliser les instants successifs de renouvellement d'un matériel après sa défaillance.

Le RP est dit processus de renouvellement simple si les durées de réparation ne sont pas prises en compte dans le cas où celles-ci sont négligeables devant les temps de bon fonctionnement. Si les durées de réparation sont prises en compte mais elles sont toujours indépendantes et de même loi on retrouve le processus de renouvellement alterné [1].

II.2.4. Définition d'un processus de poisson :

Un processus aléatoire $\{N_t ; t \geq 0\}$ à valeurs entières est un processus de poisson de paramètre $\lambda > 0$ si [3].

(N_t) est un processus de comptage à accroissements indépendants et stationnaires.

La variable N_t suit la loi de poisson de paramètre λt .

$$\forall n \geq 0, \quad P(N_t = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (\text{II.7})$$

✓ n est le nombre totale sur une période $(0, t)$.

- ✓ t est la réalisation de la variable aléatoire temps T définie sur l'ensemble des réels positifs ; $N_{t,t+\Delta t}$ représente le nombre d'événements dans l'intervalle de $(t, t + \Delta t)$.

Ce processus est également caractérisé par les hypothèses de stationnarité, de non-multiplicité, et d'indépendance suivante :

- ✓ La stationnarité c'est la loi du nombre d'événements enregistré dans un intervalle $(t, t + \Delta t)$.
- ✓ La non-multiplicité implique que la probabilité d'occurrence de deux ou de plusieurs événements dans un petit intervalle est négligeable.
- ✓ L'indépendance implique que le nombre d'événements dans un intervalle donné est indépendant d'un nombre d'événements dans d'autres intervalles disjoints. Ainsi, les probabilités au temps t ne dépendent pas de l'historique du processus H_t , c'est-à-dire de tous les points dans l'intervalle $(0, t)$, et la probabilité de trouver un point dans l'intervalle $(t, t + \Delta t)$.

II.2.4.1. Processus de poisson homogène, PPH :

Le processus de poisson homogène (PPH) est un choix classique en raison de sa simplicité et son grand usage. Il est caractérisé par une fonction d'intensité (taux moyen instantané d'occurrence d'un événement est constant) [3] :

$$\lambda = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(N_{t,t+\Delta t}=1/H_t)}{\Delta t}; H_t = t_1, \dots, t_n \quad (\text{II.8})$$

Ou ;

- ✓ $\text{Prob}(N_{t,t+\Delta t} = 1/H_t)$ représente la probabilité de la réalisation d'un événement dans le temps, sachant l'histoire H_t
- ✓ λ est une constante.
- ✓ n : est le nombre total d'événement sur une période $[0, \Delta t]$.
- ✓ $N[t, t + \Delta t]$ représente le nombre total d'événements dans l'intervalle $[t, t + \Delta t]$.

II.2.4.2. processus de poisson non homogène (NHPP pour Non Homogenous Poisson Processus) :

Ce sont les modèles de fiabilité des systèmes réparables pour lesquels l'intensité de défaillance ne dépend que du temps [3] :

$$\lambda_t(n, t_1, \dots, t_n)$$

On supposera que $\lambda(t)$ est continue, cela signifie que après la correction, l'intensité de défaillance est la même que avant la défaillance.

Le NHPP le plus utilisé est le Power Law Processus (PLP) ou bien le processus de la loi de puissance, ou l'intensité de l'échec est définie comme une puissance du temps comme suit :

Modèle de Duane ou Power Law Processus (PLP) :

$$\lambda_t = \alpha \beta t^{\beta-1}, \alpha > 0, \beta > 1, \text{ avec } \alpha = 1/\eta^\beta \quad (\text{II.9})$$

II.3. Les modèles de base d'efficacité de la maintenance :

II.3.1. Le modèle de maintenance minimale (ABAO) :

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 dit aussi mauvais que vieux ou en anglais As Bad As Old (ABAO) [6].

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

$$\lambda_t = \lambda(t) \quad (\text{II.10})$$

Le processus aléatoire qui correspond à ce modèle est le processus de *Poisson non homogène* (NHPP).

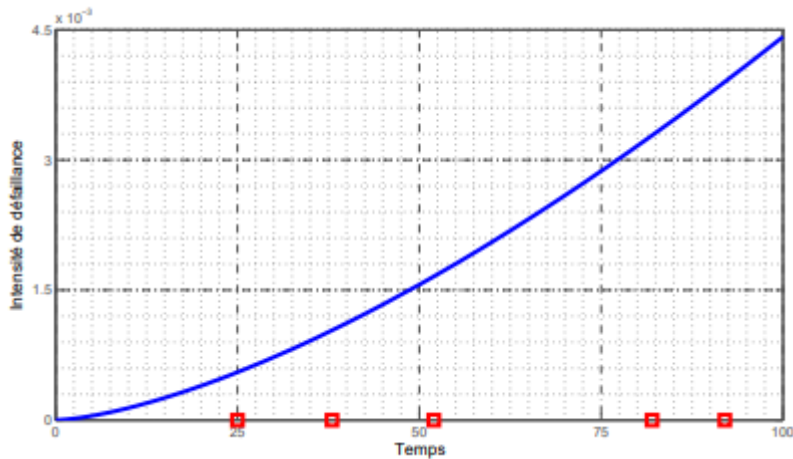


Figure II.1. Intensité dans le modèle de maintenance minimale (ABAO) [7].

La figure illustre cette propriété et représente l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances ABAO.

II.3.2. Le modèle de maintenance parfaite (AGAN) :

Le modèle de maintenance parfaite considère que chaque maintenance remet le système à neuf. Le système après maintenance est donc aussi bon que neuf ou en anglais 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, [6] sa fonction est donnée par l'expression :

$$\lambda(t) = \lambda(t - T_{N_t}) \quad (\text{II.11})$$

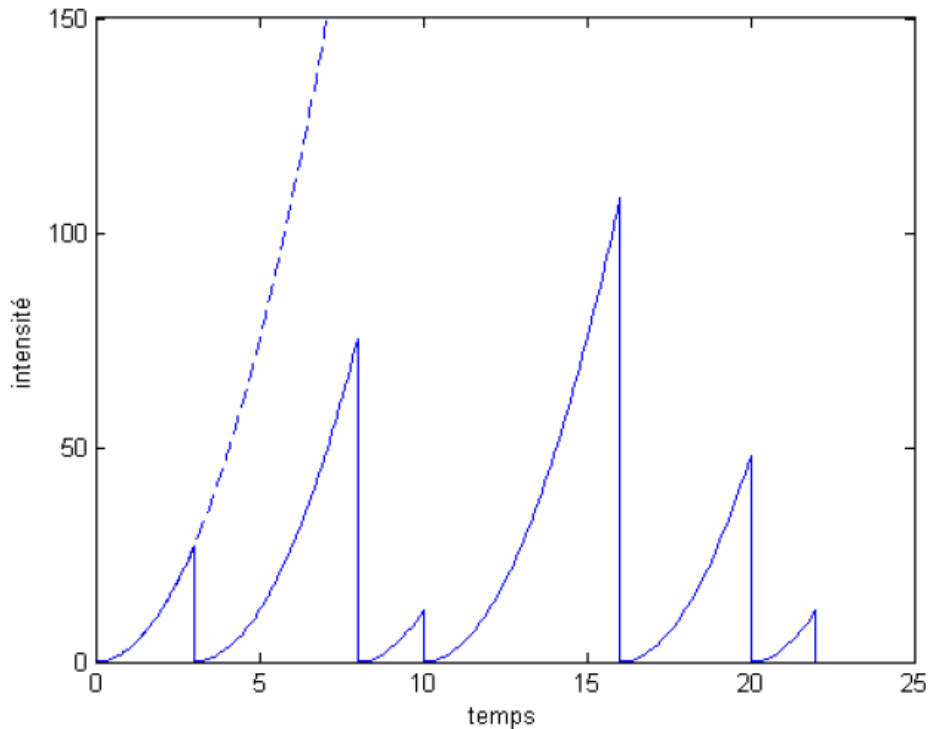


Figure II.2. Intensité dans le modèle de maintenance parfaite (AGAN) [6].

La figure 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.

Après une maintenance, l'intensité repart de zéro parallèlement à la courbe d'intensité initiale.

Le processus aléatoire correspondant est appelé *Processus de Renouvellement* (RP).

II.4. Modèles de maintenance imparfaite :

On parle d'une maintenance minimale dans une situation AS BAD AS OLD, alors que dans le cas d'une maintenance maximal on parle de la situation AS GOOD AS NEW. Mais en pratique on est dans les deux cas extrêmes. En effet lors d'une intervention de maintenance on se retrouve entre les deux situations précédentes.

Entre ces deux situations est ce qu'on appelle généralement la maintenance imparfaite (Imperfect Maintenance).

II.4.1. Modèles à réduction d'âge :

Le concept de l'âge virtuel n'a été défini qu'en 1988 par Kijima, Morimura et Suzuki, en se basant sur les hypothèses suivantes : Après la *i*ème maintenance, le système se comporte comme un système neuf qui aurait fonctionné une durée A_i sans tomber en panne. A_i peut donc être considéré comme l'âge virtuel du système après la *i*ème maintenance [8].

L'intensité de défaillance du modèle est donnée par :

$$\lambda_t^N(N, A) = \lambda(t - T_{N_t} + A_{N_t}) \quad (\text{II.12})$$

La maintenance rajeunit donc le système de sorte que l'intensité de défaillance à l'instant t est égale à l'intensité initiale à l'instant $-(TNt + ANt) < t$, t est l'âge réel du système à l'instant t et $t - TNt + ANt$ est son âge virtuel, du fait des maintenances.

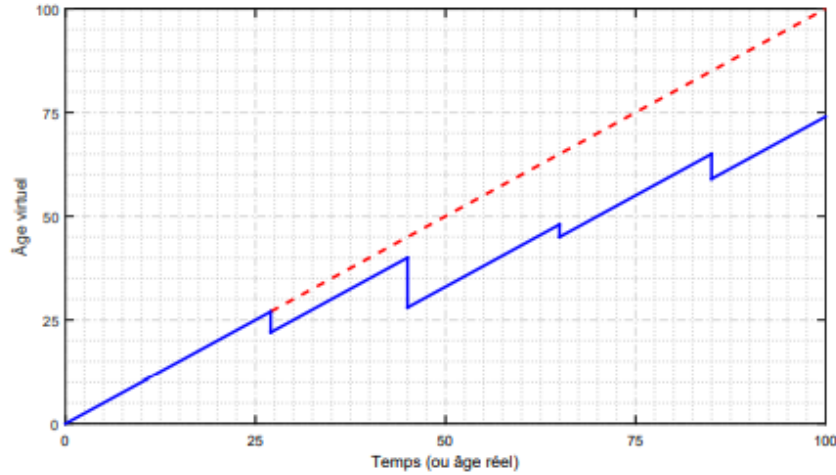


Figure II.3. Modèle à réduction d'âge [7].

II.4.2. Modèles à réduction d'intensité :

II.4.2.1. Modèle de Chan et Chaw :

Chan et Shaw ont supposé que l'effet de la maintenance est de réduire l'intensité de défaillance d'une quantité proportionnelle à sa valeur juste avant défaillance [5].

$$\lambda_{t_i^+} = (\lambda_{t_i^-}) - \rho \lambda_{t_i^-} \text{ avec } 0 \leq \rho \leq 1 \quad (\text{II.13})$$

Où $\lambda_{t_i^-}$ et $\lambda_{t_i^+}$ sont les limites à droite respectivement à gauche de $\lambda(t)$ quand t tend vers t_i et ρ représente la proportion de réduction de l'intensité de défaillance.

L'évolution de l'intensité entre deux actions de maintenance préventive est supposée comme celle d'un système neuf d'où est parallèle à, l'intensité de défaillance dans le modèle de Chan et Chaw est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \rho \sum_{j=0}^{N_t} (1 - \rho)^j (t_{N_t} - j)$$

II.4.2.2. Modèle à réduction géométrique d'intensité :

Cette sous classe de modèles est obtenu à partir du processus géométrique, appelé aussi processus de quasi-renouvellement. Pour cette classe on note par α , le facteur de réduction d'intensité de défaillance [7].

Le principe ici est de supposer qu'après une action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance du système est multipliée par le facteur α , sachant que

$0 < \alpha < 1$. Ainsi après la première action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance devient $\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t)$, après la seconde action de maintenance, elle devient $\lambda(t) = \alpha^2\lambda_0(t)$ etc

La fonction de défaillance correspondante à ce modèle est :

$$\lambda(t) = \alpha^M \lambda_0(t)$$

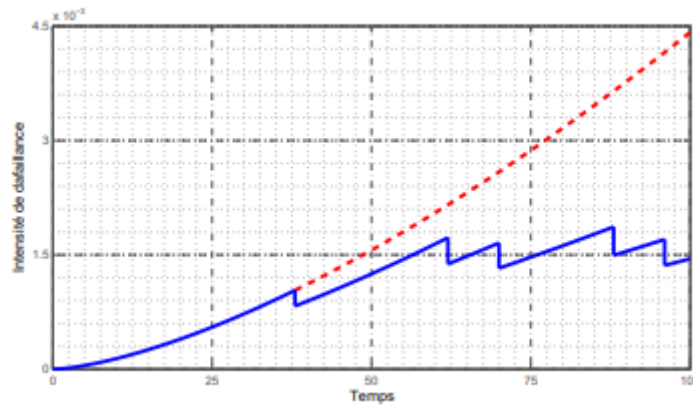


Figure II.4. Modèle à réduction géométrique d'intensité [7].

II.4.2.3. Modèles de réduction à quantité d'atténuation de l'intensité de défaillance

Comme nous l'avons vu auparavant, l'un des buts de la maintenance préventive est de réduire l'intensité de défaillance des systèmes, suivant ce principe on a pu construire des modèles en se basant sur la quantité réduite à chaque intervention préventive.

Ces modèles peuvent être classés en deux catégories, le premier suppose que les quantités de réduction sont aléatoires et différentes d'une intervention à une autre, alors que le second suppose que ces quantités sont égales est fixées avant l'intervention [14].

II.4.2.4. Modèle à réduction arithmétique d'intensité :

Ce modèle suppose que l'effet de la maintenance est de réduire l'intensité conditionnelle d'une certaine quantité dépendant du passé du processus, ou la vitesse d'usure de notre système reste la même qu'avant la défaillance. Ce modèle a été proposé par Laurent Doyen et Olivier Gaudoin, qui ont proposés plusieurs sous-modèles que nous allons développer ultérieurement.

II.4.3. Modèle hybride :

X. Zhou et al 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'âge et les modèles de réduction d'intensité.

Comme le montre la figure suivante. La relation entre la fonction d'intensité avant et après l'ième MP peut être définie de la façon suivante :

$$0 < a_i < 1 \text{ et } b_i > 1$$

Sont respectivement le facteur de réduction d'âge et le facteur de réduction d'intensité de défaillance dont on vient de parler si dessus.

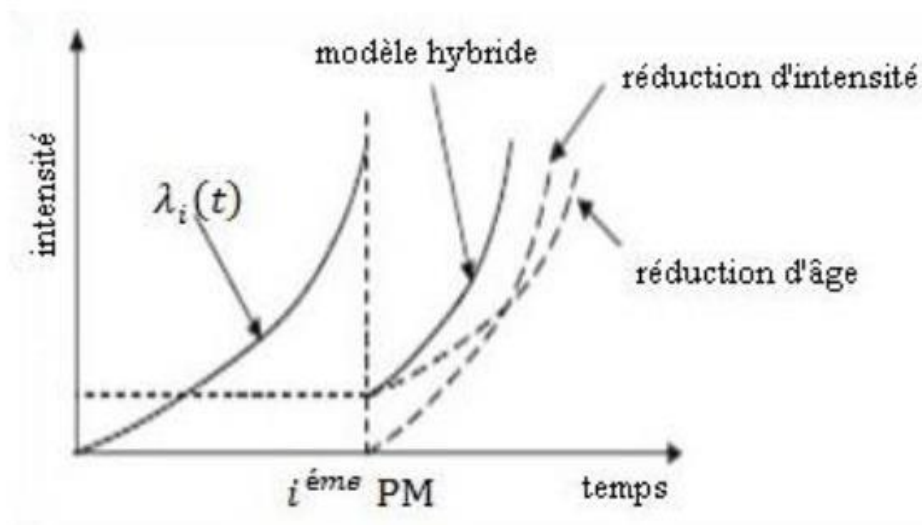


Figure II.5. Courbe de la fonction d'intensité pour le modèle hybride [6].

II.5. Modèles à réduction arithmétique d'intensité :

L'effet de la maintenance n'affecte pas l'allure d'intensité de défaillance, donc après une action de maintenance la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui juste avant l'intervention de maintenance, mais parallèlement à la courbe d'intensité de défaillance.

L'idée de base d'un modèle de type ARI est de considérer :

Que chaque action de maintenance réduit donc l'intensité de défaillance d'une quantité S dépendant de l'historique des défaillances [14] :

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - S(i, T_1, \dots, T_i) ; i \geq 1 \quad (\text{II.14})$$

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - \rho \lambda_{T_i^-} \quad (\text{II.15})$$

$\lambda_{T_i^-}$ (Respectivement $\lambda_{T_i^+}$) étant la limite à droite (à gauche) de λ_t quand t tend vers T_i .

Entre deux défaillances, l'intensité évolue comme celle d'un matériel neuf ; elle a la même pente que l'intensité initial, et reste donc parallèle, verticalement, à cette dernière. Alors que dans le modèle ARA, la courbe d'intensité est translatée horizontalement.

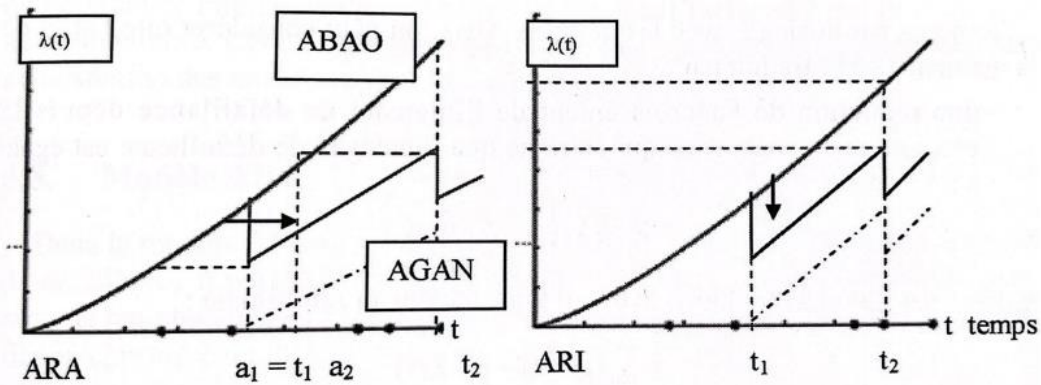


Figure II.6. Comparaison de l'intensité entre modèles ARA (à gauche) et ARI (à droite) [4].

L'intensité de défaillance dans le cas de N défaillance est égale à :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \sum_{i=0}^{N_i} S(i, T_1 \dots T_i) \quad (\text{II.16})$$

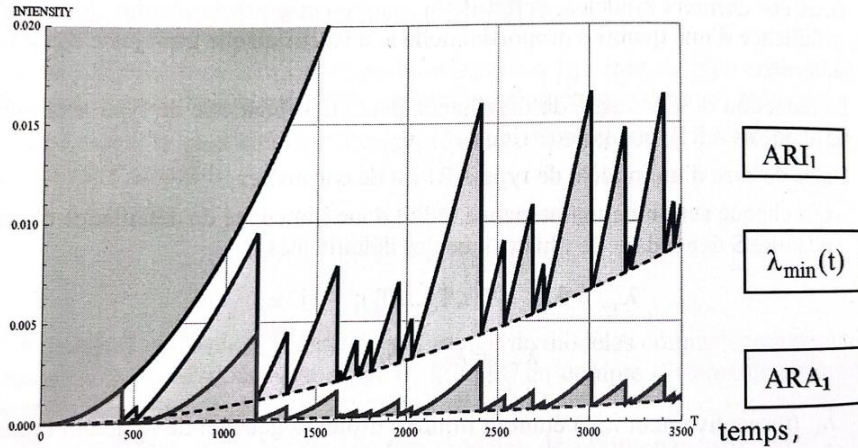


Figure II.7. Comparaison des intensités de défaillance pour un modèle ARA_1 et ARI_1 [4].

Comme pour les modèles à réduction d'âge, on caractérise l'effet de la maintenance par un facteur de réduction d'intensité, γ ou par un facteur de restauration apporté par la maintenance ρ .

Toujours par analogie avec les modèles ARA, on peut considérer que l'effet de la maintenance se traduit par [14] :

Une réduction de l'accroissement de l'intensité de défaillance depuis la dernière maintenance, ce qui entraîne que l'intensité de défaillance est égale à :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \rho \lambda(T_{N_t}) \quad (\text{II.17})$$

Ce qui correspond à un modèle ARI_1 , d'intensité d'usure minimale :

$$\lambda_{\min}(t) = (1 - \rho) \lambda(t) \quad (\text{II.18})$$

$$\lambda_t = \lambda(t) - \rho \sum_{j=0}^{\min(m-1, N_t-1)} (1 - \rho)^j \lambda(T_{N_t-j}) \quad (\text{II.19})$$

L'intensité d'usure minimale pour un modèle ARI_m est :

$$\lambda_{\min}(t) = (1 - \rho)^m \lambda(t) \quad (\text{II.20})$$

II.5.1. Modèle ARI_1 :

Dans le modèle ARI de mémoire 1, la maintenance réduit seulement l'intensité de défaillance à partir de l'intervention précédente. Si $\lambda_{T_i^-}$ est l'intensité juste avant la maintenance, et $\lambda_{T_i^+}$, celle juste après la maintenance, et que pour simplifier on considère un facteur de restauration moyen $\bar{\rho}$, on a [14]:

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - \bar{\rho}(\lambda_{T_i^-} - \lambda_{T_i^+}) \quad (\text{II.21})$$

L'intensité moyenne de défaillance de ce modèle est alors :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \bar{\rho} \lambda_{T_i^-} \quad (\text{II.22})$$

L'intensité d'usure minimale est :

$$\lambda_{min}(t) = (1 - \bar{\rho}) \lambda(t) \quad (\text{II.23})$$

L'intensité minimale correspond à la borne inférieure de l'intensité de défaillance.

Dans ce modèle, l'intensité juste après chaque action de maintenance est égale à cette intensité minimale.

Le modèle ARI_1 est un modèle équivalent du modèle Kijima. En effet on a :

$$A_i = \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \bar{\rho}) X_j \quad (\text{II.24})$$

Avec $\lambda_{min}(t) = \lambda[(1 - \bar{\rho})t] \quad (\text{II.25})$

La figure présente ce modèle avec les deux intensités caractéristiques : l'intensité initiale et l'intensité minimale.

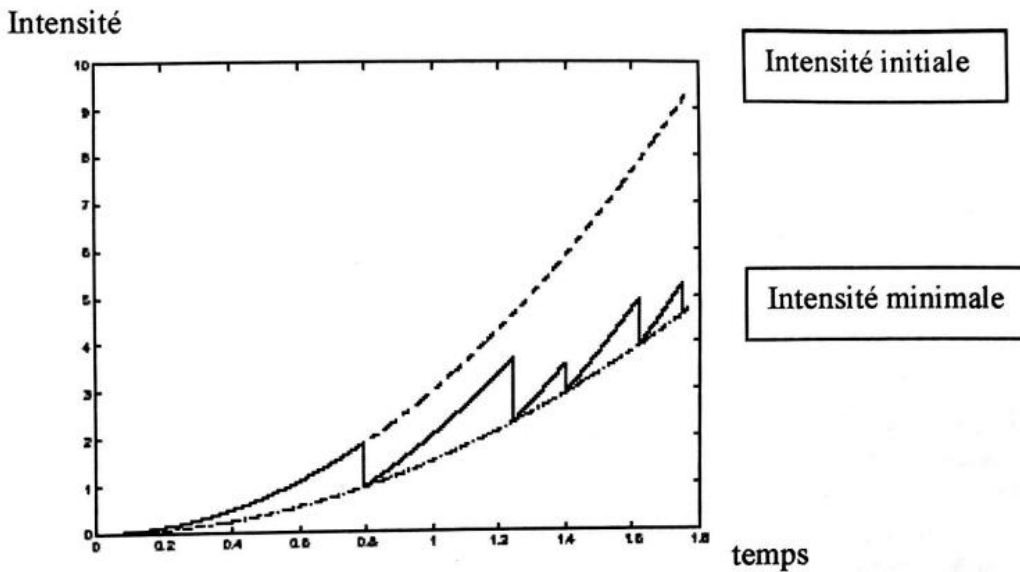


Figure II.8. Le modèle ARI_1 avec les intensités de défaillance, initiale et minimale [4].

II.5.2. Modèle ARI_∞ :

Ce modèle suppose que la maintenance réduise l'intensité de défaillance cumulée d'un montant proportionnel à l'intensité totale observé, soit [14]:

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - \bar{\rho} \lambda_{T_i^-} \quad (\text{II.26})$$

Ce qui donne :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \rho \sum_{j=0}^{N_t} (1 - \bar{\rho})^j \lambda_{N_t-j} \quad (\text{II.27})$$

La figure présente l'évolution de l'intensité de défaillance pour le modèle à réduction arithmétique d'intensité de mémoire infinie (∞).

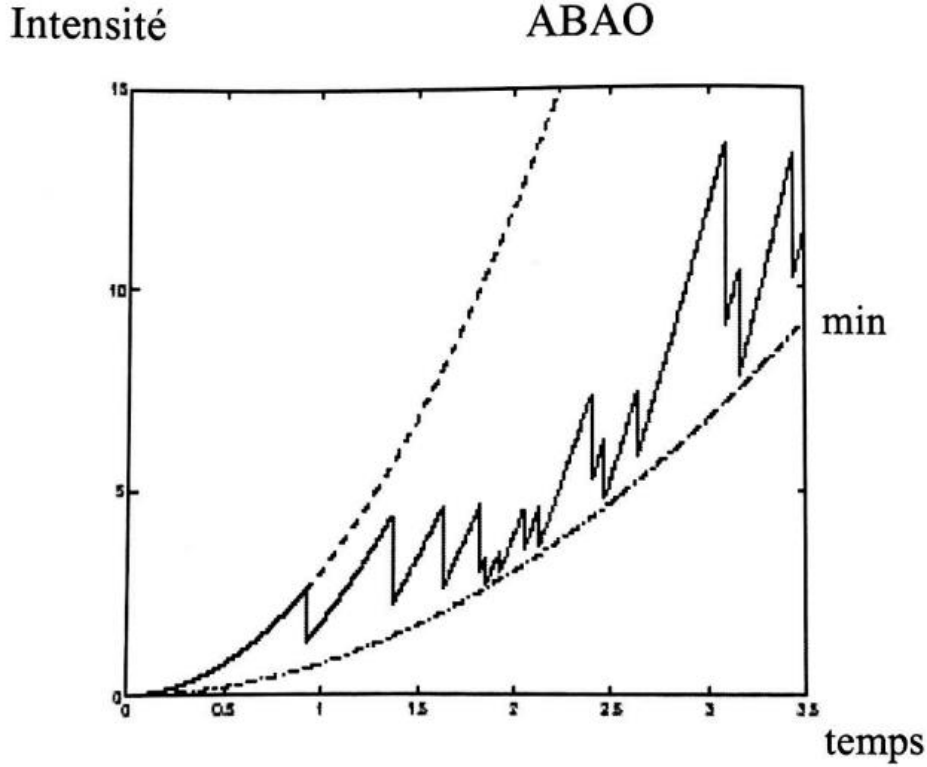


Figure II.9. Modèle ARI_{∞} avec $\bar{\rho} = 0.5$ [4].

II.5.3. Modèle ARI de mémoire m :

Si l'on compare les deux modèles précédents on constate que le second peut être interprété comme une approximation du premier [4].

En effet la somme :

$$\sum_{j=0}^{N_t} (1 - \bar{\rho})^j \lambda(T_{N_t-j})$$

Peut-être approximée par son premier terme. On peut alors introduire les modèles à réduction arithmétique de mémoire m, ARI_m , définis, comme on la déjà vu, par :

$$\lambda_t = \lambda(t) - \bar{\rho} \sum_{j=0}^{\min(m-1, N_t)} (1 - \bar{\rho})^j \lambda(T_{N_t-j}) \quad (\text{II.28})$$

Ces modèles correspondent à une forme de propriété markovienne : m est le nombre maximal de temps de défaillance impliqué dans l'intensité. La figure présente à titre d'exemple un modèle ARI_2 .

Remarque : Pour $m=1$, nous retrouvons le modèle ARI_1

Pour $m=\infty$, nous retrouvons le modèle ARI_∞

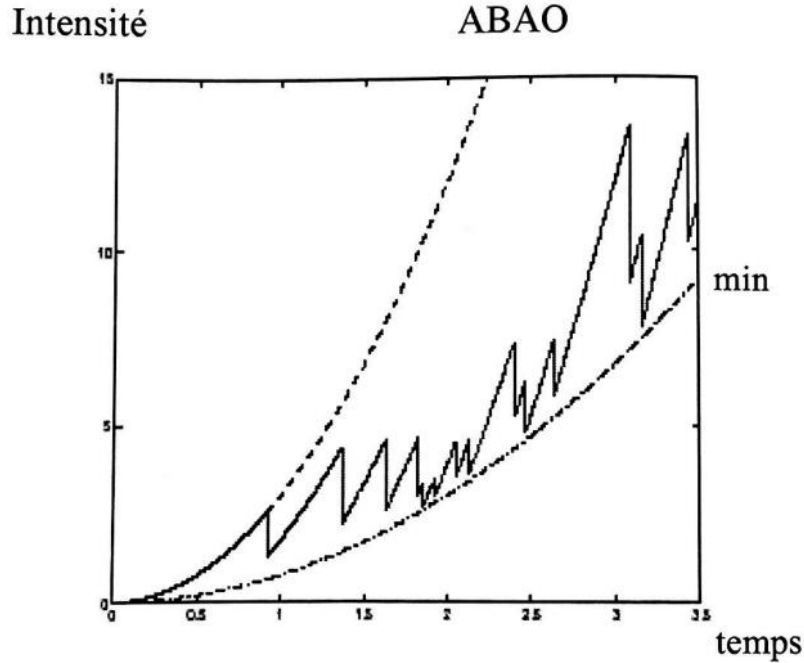


Figure II.10. Le modèle ARI_2 [4].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de l'efficacité de maintenance préventive imparfaite des systèmes réparables.

Nous avons présenté dans un premier temps les différentes polyptiques de maintenance préventive et périodique les plus utilisées, ainsi que quelque rappel sur les processus stochastiques.

Ensuite nous avons parlé sur les principaux modèles de maintenance imparfaite (modèles de base, modèles de réduction d'âge et réduction d'intensité ainsi que les modèles hybrides), tout en développant le modèle de réduction arithmétique d'intensité qui a adapté les hypothèses classiques (ARI_1 , ARI_∞ , ARI de mémoire m).

Chapitre III : Modèle de révision intégrant l'efficacité de la maintenance.

Introduction

La dégradation des équipements industriels est souvent un problème qu'on ne peut pas éviter, mais qu'on tente de minimiser. Et c'est ici qu'intervient en général la fonction de maintenance avec ces deux types correctifs et préventifs, ce qui fait de cette fonction une source de dépenses.

Afin de minimiser les coûts de la maintenance il faut mettre en place des stratégies et des politiques qui visent à optimiser les dépenses que peut générer cette fonction.

La planification d'une intervention préventive est la raison qui a fait que le coût préventif est souvent inférieur au coût correctif qui est aléatoire et instantané, c'est pour cela qu'on trouve que la politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimal est la plus réaliste.

Dans notre étude nous utiliserons l'un des modèles à réduction arithmétique d'intensité, qui est le modèle ARI_1 , qui vise à réduire l'accroissement de l'intensité de défaillance depuis la dernière maintenance, proposé par Laurent Doyen et Olivier Gaudoin.

III.1. Modèle de coût :

Pour chaque composant qui subit une action de maintenance, les coûts correctifs et préventifs spécifiques sont notés C_c et C_p respectivement. On considère que C_c est supérieur à C_p , parce que le coût de remplacement préventif ne comprend que la pièce de rechange et les frais de main d'œuvre, alors que pour le remplacement correctif, en plus du coût de remplacement, il faut aussi ajouter le coût de défaillance qui comprend la perte de production dépendante des composants et d'autres frais, telles que des solutions compensatoires concernant la production.

Selon la théorie du renouvellement et en supposant un horizon infini, le coût attendu par unité de temps est donné par :

$$C(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{EC(T)}{E(t)} \quad (\text{III.1})$$

III.2. Choix de la politique de maintenance :

Dans notre travail nous avons opté pour la politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance.

Modèle de coût proposé par Nakagawa, applicable sur les systèmes complexes qui subissent des maintenances préventives périodiques planifiées et des réparations minimales à chaque défaillance.

Il suppose que le système fonctionne à l'instant $t=0$ et qu'à chaque défaillance, on effectue une réparation minimale, les actions de MC n'affectent pas l'intensité de défaillance du système. Le système subi des maintenances imparfaites et périodiques à des instants KT

Chapitre III : Modèle de révision intégrant l'efficacité de la maintenance.

pour ($k=1, 2, 3, \dots$) indépendant de son âge. Notre système est dans un état entre ABAO et AGAN après chaque maintenance.

Il suppose que les temps de maintenance et de réparation sont négligeables et que les instants de défaillance sont indépendants et qu'ils ont une fonction de distribution $F(t)$ et un taux de défaillance $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$.

Les défaillances se produisent suivant le processus de Poisson non homogène (NHPP) avec une fonction $H(t)$.

$$H(t) = \int_0^t \lambda(u) du \quad (\text{III.2})$$

III.3. Construction du modèle :

Pour ce modèle, nous allons utiliser le modèle à réduction arithmétique d'intensité qu'on a développé dans le chapitre précédent, et on va l'associer au modèle de maintenance préventif périodique avec réparation minimale à la défaillance pour un nombre de cycle KT ou T représente un cycle.

Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

1. Les actions de maintenance préventive sont effectuées suivant des périodes programmées à l'avance.
2. Les durées inter-MP sont fixes et égales.
3. Le coût C_p est le même pour chaque action de maintenance préventive.
4. Le coût d'une réparation minimale C_c est le même à chaque action de défaillance.
5. Chaque action de maintenance préventive réduit l'intensité de défaillance d'une quantité fixe.
6. Après K cycle le système subit une révision générale qui le remet à neuf.
7. A chaque révision générale un coût estimé C_{ov} est dépensé.
8. Une réparation ou maintenance corrective est effectuée après chaque défaillance.
9. Les durées de réparation et plus généralement de maintenance sont supposées négligeables ou non comptabilisées.

On a, pour une période de 0 à T :

$$C(T) = \frac{C_c H(T) + C_p}{T} \quad (\text{III.3})$$

Pour (k) périodes :

$$C(T) = \frac{C_c H_0(T) + C_p + C_c H_1(T) + C_p + \dots + C_c H_{(k-1)}(T) + C_p + C_{ov}}{KT} \quad (\text{III.4})$$

Avec : $\lambda_i(T) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(T)$ (III.5)

On considère que la fonction d'intensité de défaillance suit la loi de Weibull, ce qui donne :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (III.6)$$

On remplace (III.6) dans (III.2) et on obtient :

$$H_0(t) = \int_0^T \lambda(t)dt = \int_0^T [\lambda_0(t) - \delta\lambda(T_{Nt})]dt \quad (III.7)$$

$$H_0(t) = \int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

$$H_0(t) = \left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \right]_0^T \quad (III.8)$$

Les hypothèses 8 et 9 ci-dessus impliquent que les instants des maintenances correctives sont en fait les instants des défaillances correspondantes. Alors, le processus des défaillances est défini de façon équivalente par le processus aléatoires $\{T_i\}_{i \geq 1}$ ou $\{N_t\}_{t \geq 0}$

$$\forall t \geq 0, \forall i \geq 1, [N_t \geq i] \Leftrightarrow [T_i \leq t] \quad [5]$$

Donc on a : $T_{Nt} \Leftrightarrow T_i$

$$H_1(t) = \int_T^{2T} \lambda(t)dt = \int_T^{2T} [\lambda_0(t) - \delta\lambda(T_{Nt})]dt \quad (III.9)$$

$$H_1(t) = \int_T^{2T} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} - \delta \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} \right] dt$$

$$H_1(t) = \int_T^{2T} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} - \delta \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} \right] dt$$

$$H_1(t) = \left[\frac{t^\beta}{\eta} \right]_T^{2T} - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} \right] (2T - T)$$

$$H_1(t) = \left[\left(\frac{2T}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta \right] - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} T \right] \quad (III.10)$$

$$H_2(t) = \int_{2T}^{3T} \lambda(t)dt = \int_{2T}^{3T} [\lambda_0(t) - \delta\lambda(T_{Nt})]dt \quad (III.11)$$

$$H_2(t) = \int_{2T}^{3T} \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} - \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{2T}{\eta}\right)^{\beta-1} \right] dt$$

$$\begin{aligned}
 H_2(t) &= \left[\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]_{2T}^{3T} - \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{2T}{\eta} \right) [t]_{2T}^{3T} \\
 H_2(t) &= \left[\left(\frac{3T}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{2T}{\eta} \right)^\beta \right] - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{2T}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] T \\
 H_2(t) &= \left[\left(\frac{3T}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{2T}{\eta} \right)^\beta \right] - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{2T}{\eta} \right)^\beta T^\beta \right] \tag{III.12}
 \end{aligned}$$

On aura alors :

$$H_K(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \lambda(t) dt = \int_{(K-1)T}^{KT} [\lambda_0(t) - \delta \lambda(T_{Nt})] dt \tag{III.13}$$

$$\begin{aligned}
 H_K(t) &= \int_{(K-1)T}^{KT} \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} - \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] dt \\
 H_K(t) &= \left[\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]_{(K-1)T}^{KT} - \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^{\beta-1} [t]_{(K-1)T}^{KT} \\
 H_K(t) &= \left(\frac{KT}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^\beta - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] T \\
 H_K(t) &= \left[\left(\frac{KT}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^\beta - \left[\delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^{\beta-1} T^\beta \right] \right] \tag{III.14}
 \end{aligned}$$

On déduit que :

$$H_0 + H_1 + \dots + H_K = \sum_{K=1}^k \int_{(K-1)T}^{KT} [\lambda_0(t) - \delta \lambda(T_{Nt})] dt \tag{III.15}$$

En remplaçant (III.) dans l'expression du coût (III.4) on aura :

$$C(K, T) = \frac{C_p * (k-1) + C_{ov} + C_c * \sum_{K=1}^K \int_{(K-1)T}^{KT} [\lambda_0(t) - \delta \lambda(T_{Nt})] dt}{KT} \tag{III.16}$$

Conclusion :

Le principal objectif de ce chapitre consiste à déterminer la durée et le nombre optimal des interventions de maintenance avant d'effectuer un renouvellement générale.

Pour arriver à cette fin, nous avons intégré le modèle ARI_1 dans la politique de maintenance périodique avec réparation minimale à la défaillance. Et par aide d'un programme sur le code MATLAB, on a pu déterminer le K optimal ainsi que les périodes T pour chaque périodicité K.

Chapitre IV : Applications numériques et discussion.

Introduction :

La maintenance d'un matériel et son optimisation représente un enjeu considérable vue qu'on doit l'assurer dans les meilleures conditions possibles d'une part, et d'autre part la difficulté de sa réalisation en vue de la complexité des systèmes étudiés.

Ce chapitre sera consacré à l'application du modèle développé dans le chapitre III, et cela dans le but de déterminer le temps optimum des maintenances préventives.

IV.1.Optimisation du coût de maintenance

Pour y parvenir à illustrer tout cela, nous supposons qu'un élément mécanique qui est sujet de deux types de maintenances, ou la maintenance préventive est considérée périodique et imparfaite alors que la maintenance corrective est minimale, et les données de départ sont les suivante :

- ✓ Le coût de la maintenance préventive : $C_p = 1000euro$.
- ✓ Le coût de révision générale : $C_{ov} = 100000euro$.
- ✓ Le coût de la maintenance corrective : $C_c = 5000euro$.
- ✓ Facteur d'amélioration de la loi de weibull $\rho = 0.6$.
- ✓ Paramètre de forme de la loi de weibull $\beta = 2.5$.
- ✓ Paramètre d'échelle de la loi de weibull $\eta = 120Jours$

IV.1.1.Algorithme de résolution

La méthode de résolution consiste à déterminer la combinaison optimale entre les périodicités (T^*) et le nombre de cycles optimal (K^*) des interventions des maintenances préventives, pour faire un renouvellement du système autrement dit une maintenance parfaite (AGAN).

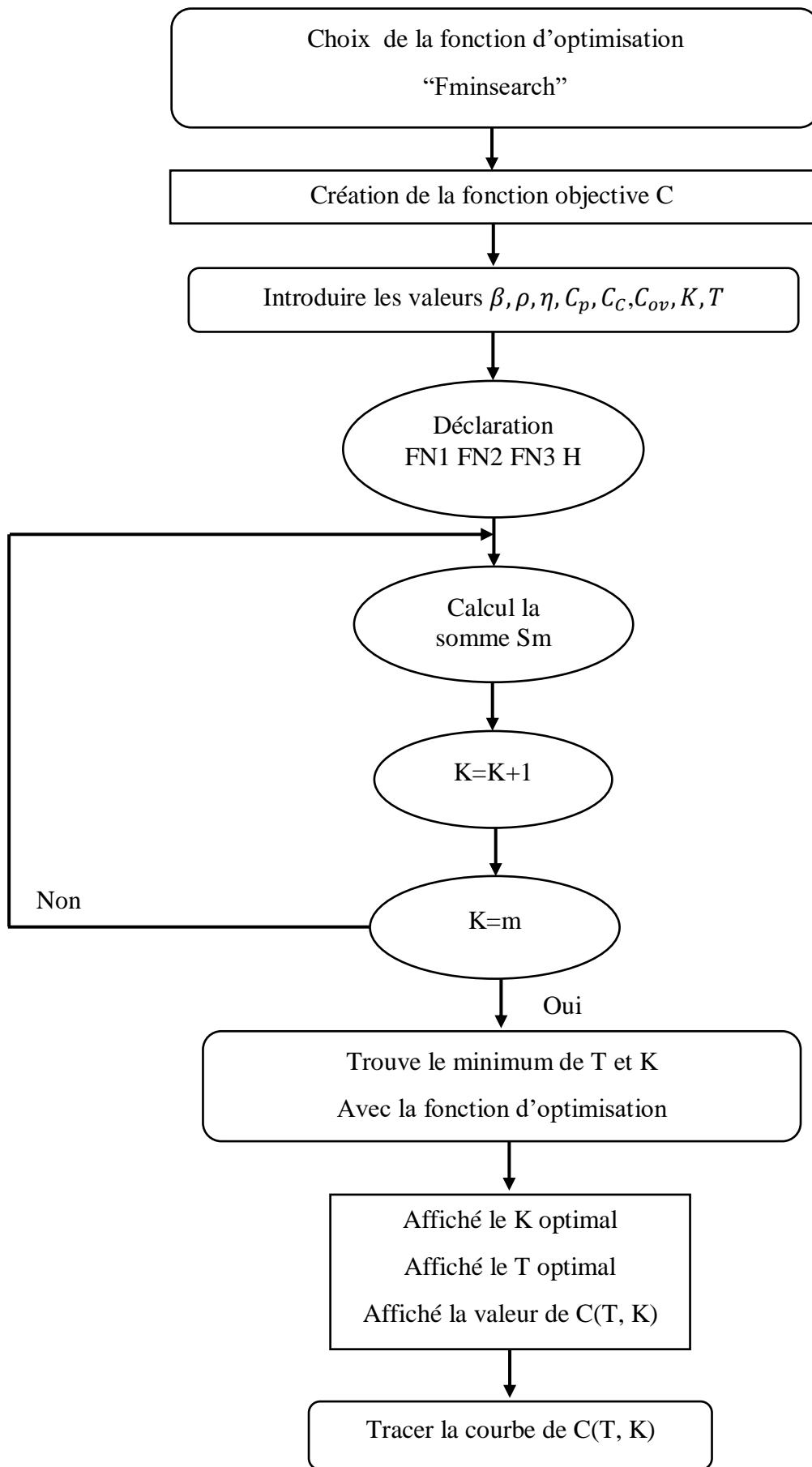


Figure IV. 1 : Organigramme d'optimisation du cout de maintenance.

Avec :

β : Paramètre de forme de la loi de Weibull.

η : Paramètre d'échelle de la loi de Weibull.

ρ : Facteur d'amélioration d'efficacité de la maintenance.

C_c : Coût de maintenance corrective.

C_p : Coût de maintenance préventive.

C_{ov} : Coût de renouvellement de système.

K : Le nombre des périodes de maintenance.

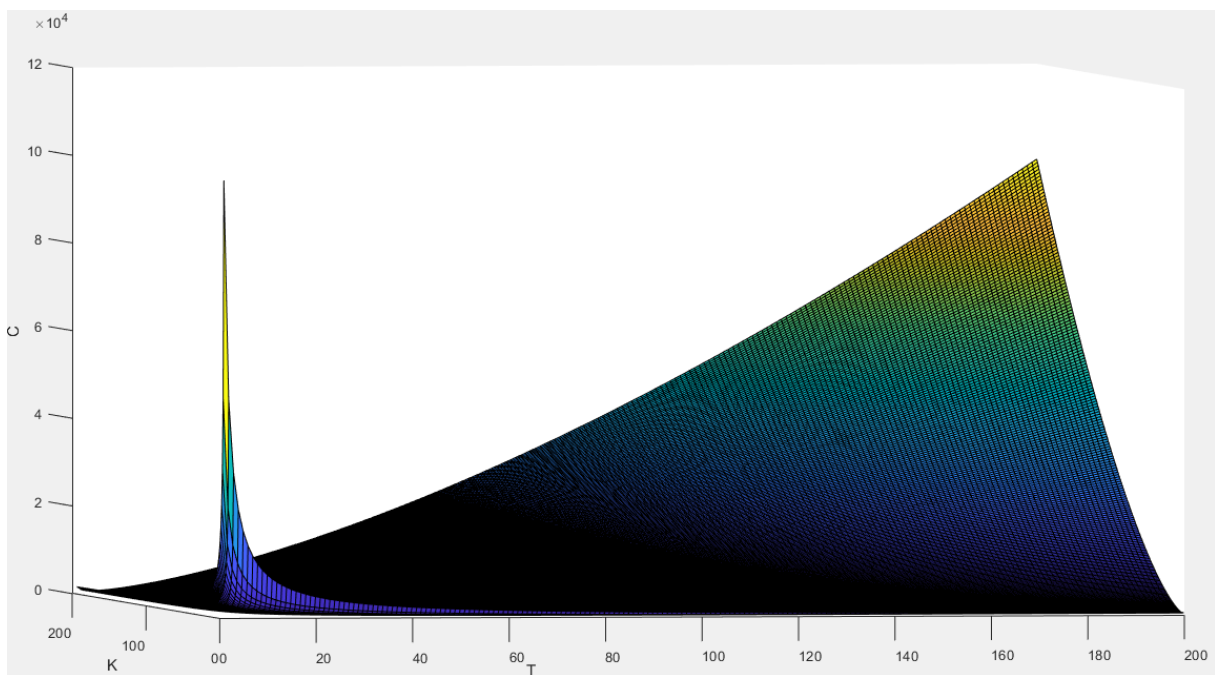
T : La périodicité (jours).

C(t) : Fonction du coût de maintenance.

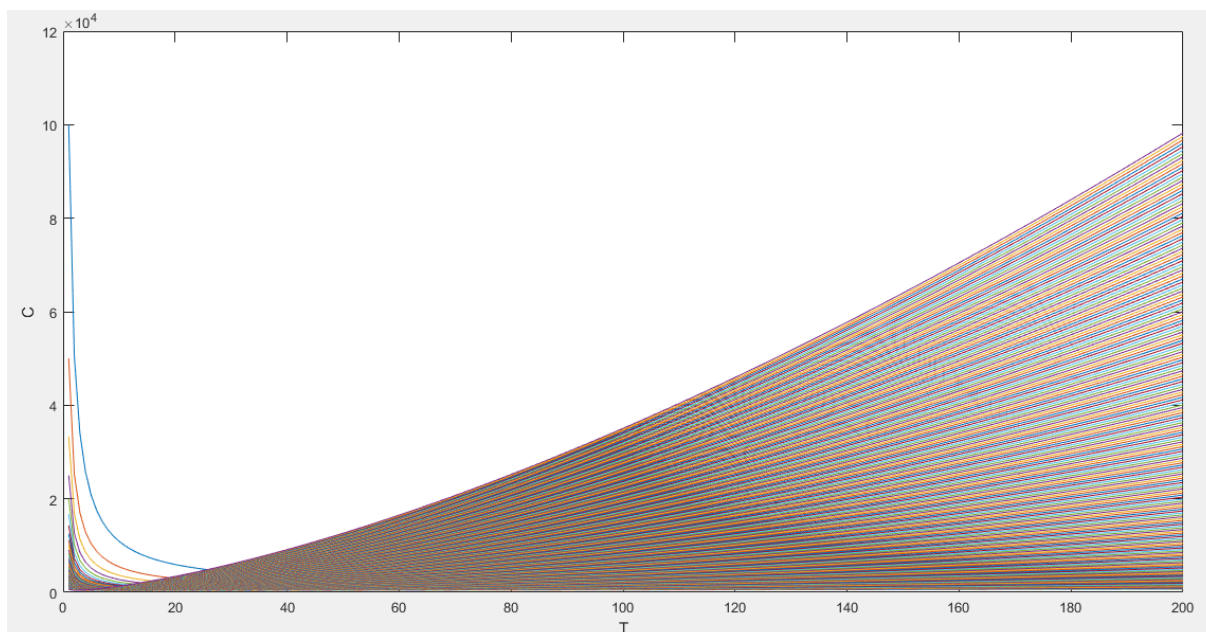
$$Sm = \sum_{K=1}^m \left[\left(\frac{K}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{K-1}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{\rho * \beta * (K-1)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \right) \right]$$

IV.1.2. Résultats d'estimation

En utilisant un programme sur Matlab présenté dans l'organigramme, et la fonction « meshgrid » et la fonction « plot » qui existe sur Matlab, nous avons eu la courbe suivante :



FigureIV.2. courbe du coût de maintenance représenté en 3D.



FigureIV.2. courbe du coût de maintenance représenté en 2D.

Résultats

Les résultats obtenus sont les suivants :

$$K^*=22$$

$$T^*(\text{Jours})=24.64\text{Jours.}$$

$$C^*=371.96\text{euros/jours.}$$

Discussions

Les figures ci-dessus montrent que la fonction de coût est convexe et que elle admet un temps optimum de 24.64 jours, et un nombre d'intervalles de 22 ainsi qu'un coût optimum de 371.96 euros/jours.

Ce qui veut dire qu'il serait profitable que notre système subisse 22 révisions partielles à un intervalle de 24.64 jours, après quoi il fera l'objet d'un renouvellement.

IV.2.Etude de sensibilité

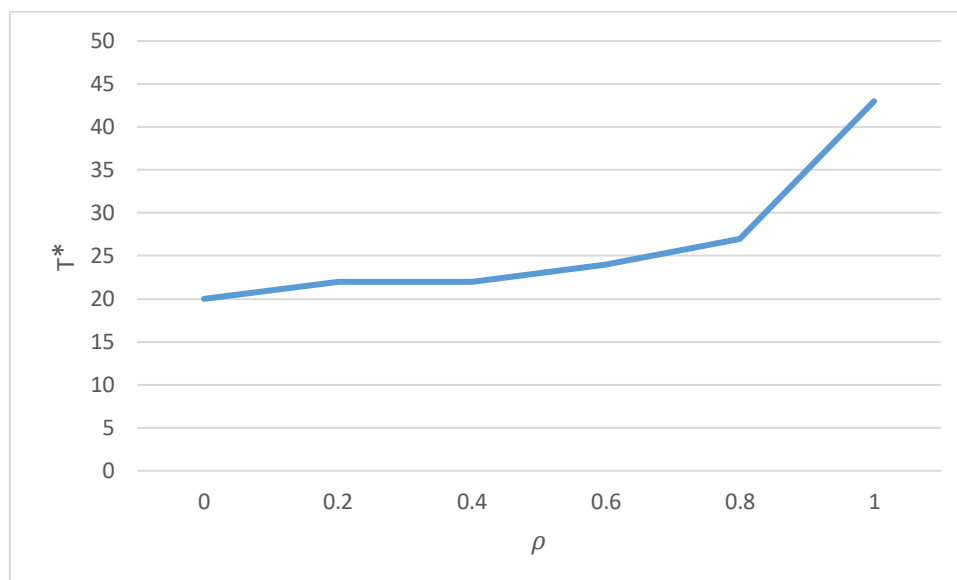
Dans la partie qui suit nous nous intéressons à l'étude de sensibilité du modèle que nous avons développé, et cela par rapport au différents paramètres (ρ et le rapport C_p/C_c), ainsi que la corrélation entre β et η .

IV.2.1. L'influence du paramètre ρ sur le temps optimum

En premier temps nous faisons varier le paramètre d'efficacité de maintenance ρ (de 0 à 1) et nous avons gardé les valeurs précédentes des autres paramètres et nous avons calculé les valeurs optimales, les résultats que nous avons obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : résultats de l'influence du paramètre ρ sur le temps optimum

ρ	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
K^*	19	19	21	22	25	39
T^* (jour)	20	22	22	24	27	43
$C(t)$	515.63	474.81	433.79	378.16	304.79	148.80



FigureIV.3. Comportement du temps optimum en fonction de la variation du paramètre ρ .

Interprétation des résultats

- ✓ Nous remarquons que lorsque le facteur d'efficacité de maintenance (ρ) se rapproche de la valeur 1 (augmente en allant de 0 à 1), les nombres de révisions partielles K^* (tableau IV.1) et la périodicité T^* (tableau VI.1 et la figure IV.3) augmentent en parallèle avec ce dernier.
- ✓ Dans le cas d'une maintenance minimal (ABAO) ou $\rho=0$, nous remarquons que les valeurs de k et T sont minimales, et le coût est maximal, alors que dans le cas d'une maintenance parfaite (AGAN) ou $\rho=1$, on remarque que les valeurs de k et T sont maximales et celle du coût est minimale.
- ✓ Nous remarquons que à partir de $\rho=0.8$ nous enregistrons un accroissement plus important du T^* et K^* , ce qui est logique puisque plus la maintenance est efficace plus ça nous permet de prolonger les périodicités de révisions partielles et complètes.

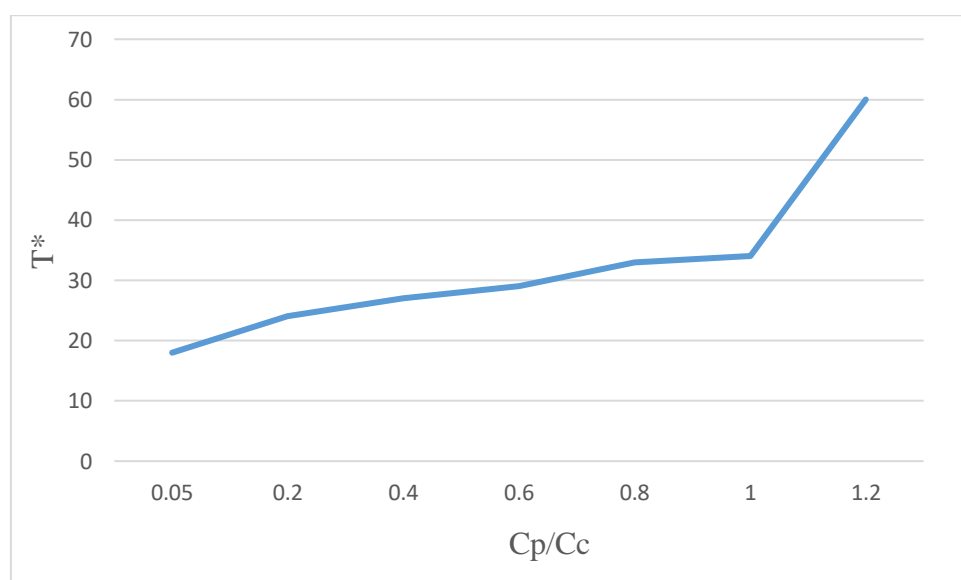
Nous concluons que l'augmentation de l'efficacité de la maintenance conduit à l'augmentation du temps optimal et à l'amélioration de l'état de l'équipement ce qui permet l'allongement de sa durée de vie.

IV.2.2.L'influence du rapport C_p/C_c sur le temps optimum

A présent nous faisons varier C_p/C_c de 0.05 à 1.2 et nous gardons les valeurs précédentes des autres paramètres, nous avons calculé les valeurs optimales et les résultats que nous avons obtenus sont illustrés dans le tableau suivant:

Tableau IV.2 : résultats de l'influence du rapport C_p/C_c sur le temps optimum

C_p/C_c	0.05	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
K^*	17	22	25	27	29	31	10
T^* (jour)	18	24	27	29	33	34	60
$C(t)$	639.24	378.16	291.74	250.97	227.39	217.65	428.91



FigureIV.4. Comportement du temps optimum en fonction de la variation du rapport C_p/C_c .

Interprétation des résultats

- ✓ Nous remarquons que lorsque le rapport C_p/C_c tend vers la valeur 1, les valeurs de K^* et T^* augmentent, contrairement à celle du cout de maintenance qui diminue.
- ✓ Dans le cas où le rapport $C_p/C_c > 1$, nous remarquons une grande augmentation de la période T^* et du cout de maintenance, tandis que K^* prend une très basse valeur.

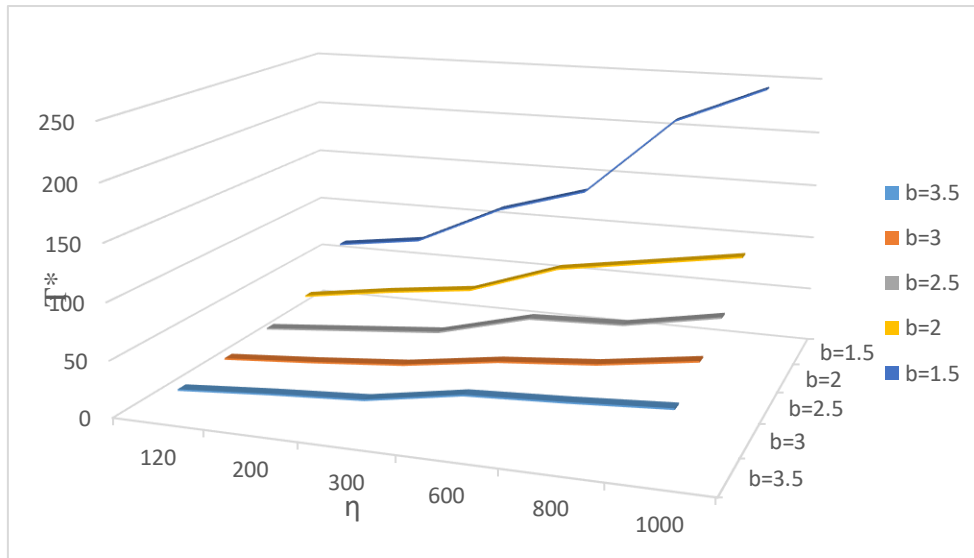
Les résultats obtenus sont logiques, puisque dans le cas où le cout préventif est inférieur par rapport au cout correctif, on favorise l'application des maintenances préventives, par contre dans le cas où le coût préventif est supérieur par rapport au coût correctif on favorise les maintenances correctives.

IV.2.3.Corrélation entre β et η et son influence sur le temps optimum

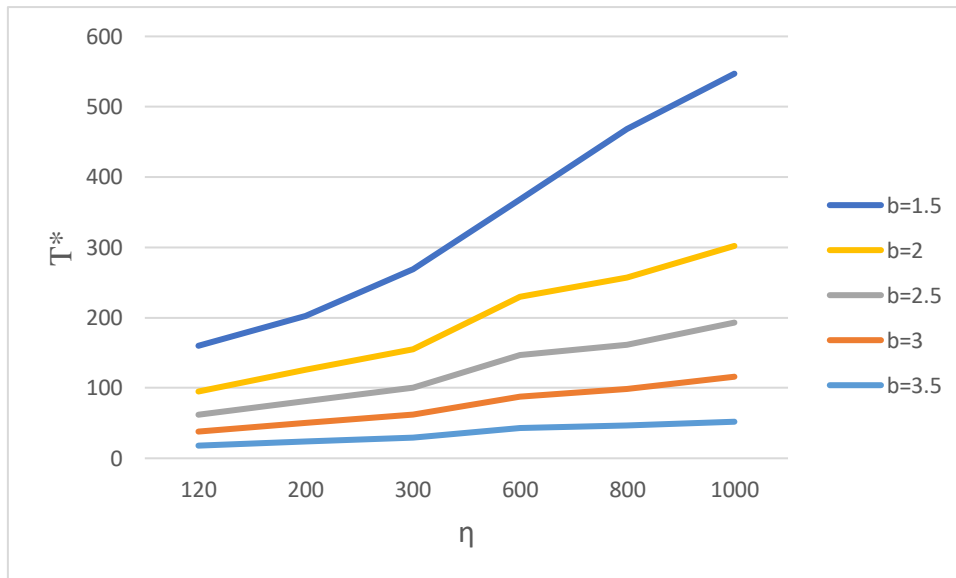
Dans ce dernier cas nous avons fixé les valeurs des paramètres ρ , C_p , et C_c et nous avons varié celles des deux paramètres β et η , dans le but d'étudier l'influence de la corrélation entre ces deux derniers sur le temps optimum, les résultats que nous avons obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : résultats de la corrélation entre β et η et son influence sur le temps optimum

$\beta \backslash \eta$		120	200	300	600	800	1000
1.5	K^*	53	70	86	127	150	170
	$T^*(\text{jour})$	65	76	114	138	211	245
	$C(t)$	132.88	83.10	56.83	30.86	23.55	19.34
2	K^*	29	37	47	66	79	89
	$T^*(\text{jour})$	33	45	55	83	96	109
	$C(t)$	264.27	163.77	113.29	60.31	47.01	38.67
2.5	K^*	22	29	35	49	57	65
	$T^*(\text{jour})$	24	31	38	59	62	77
	$C(t)$	378.16	233.46	161.81	85.97	67.14	54.73
3	K^*	19	24	29	41	48	53
	$T^*(\text{jour})$	20	26	33	45	52	64
	$C(t)$	470.02	291.01	199.65	106.94	82.84	67.47
3.5	K^*	17	21	26	36	43	48
	$T^*(\text{jour})$	18	24	29	43	47	52
	$C(t)$	541.16	333.99	229.66	121.89	95.11	78.21



FigureIV.5. Comportement du temps optimum en fonction de la Corrélation entre β et η en 3D.



FigureIV.6. Comportement du temps optimum en fonction de la Corrélation entre β et η en 2D.

Interprétation des résultats

- ✓ Par rapport au temps optimum et le nombre des intervalles, nous remarquons qu'ils augmentent en parallèle avec le paramètre η , et d'autre part nous remarquons qu'ils diminuent avec l'augmentation du paramètre β .
- ✓ Pour le coût nous remarquons qu'il augmente en parallèle avec l'augmentation du paramètre β , et d'autre part qu'il diminue avec l'augmentation du paramètre η .

L'évolution des résultats obtenus sont tout à fait logique, en effet pour les deux paramètres étudiés :

- ✓ Pour atteindre une probabilité de 63.2% la durée de vie de l'équipement doit être égale à η qui représente la durée de vie caractéristique de l'équipement, c'est à dire que si la valeur η augmente, la fiabilité de système augmente.
- ✓ En fiabilité des systèmes le paramètre β représente la vitesse de dégradation de l'état des équipements, en effet une grande valeur de ce paramètre signifie une vitesse de dégradation élevée, et une basse valeur de ce paramètre signifie une grande vitesse de dégradation de l'état des équipements.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé un programme MATLAB selon l'organigramme cité ci-dessus, qui nous a permis d'optimiser et de tracer la courbe de la fonction du coût par unité de temps de notre modèle.

Nous avons pu aussi observer l'influence des paramètres (η, β, ρ , et le rapport C_p/C_c) ainsi que la corrélation entre η et β sur la périodicité (T), le nombre d'interventions (k) et le coût de maintenance .

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'optimisation de la maintenance d'un système réparable, sur la base de la politique de maintenance préventive imparfaite avec le modèle d'efficacité de maintenance, qui est le modèle à réduction arithmétique d'intensité de mémoire 1 ARI_1 , et pour cela on doit optimiser le nombre et les périodicités des révisions partielles d'un système réparable dans le but de minimiser le coût total de maintenance par unité de temps et d'assurer une disponibilité idéale pour ce dernier.

Pour l'optimisation du coût générale de la maintenance par unité de temps, nous avons programmé l'organigramme illustré dans le chapitre IV sur le code de calcul MATLAB, qui nous a déterminé la combinaison optimal entre les périodicités ($T^* = 24.64\text{Jours}$), des interventions de maintenances préventives imparfaites ($K^* = 22$) optimal au-bout duquel nous ferons un renouvellement total du système.

Pour mieux comprendre le comportement de notre modèle, nous avons procéder à une étude de sensibilité, qui nous a permis d'observer l'influence des différents paramètres sur le temps optimum.

- ✓ Nous concluons que l'augmentation de l'efficacité de la maintenance conduit à l'augmentation du temps optimal et à l'amélioration de l'état de l'équipement ce qui permet l'allongement de sa durée de vie.
- ✓ Les résultats obtenus sont logiques, puisque dans le cas où le coup préventif est inférieur par rapport au cout correctif, on favorise l'application des maintenances préventives, par contre dans le cas où le coût préventif est supérieur par rapport au coût correctif on favorise les maintenances correctives.
- ✓ L'évolution des résultats obtenus sont tout à fait logique, en effet pour les deux paramètres étudiés :

Pour atteindre une probabilité de 63.2% la durée de vie de l'équipement doit être égale à η qui représente la durée de vie caractéristique de l'équipement, c'est à dire que si la valeur η augmente, la fiabilité de système augmente.

En fiabilité des systèmes le paramètre β représente la vitesse de dégradation de l'état des équipements, en effet une grande valeur de ce paramètre signifie une vitesse de dégradation élevé, et une basse valeur de ce paramètre signifie une grande vitesse de dégradation de l'état des équipements.

En perspectives, nous pensons qu'il serait intéressant d'explorer le modèle d'efficacité de maintenance de type de réduction arithmétique d'intensité de mémoire m (ARI_m) avec $m=2,3,\dots$

En effet, 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 sachant qu'il entraîne des dépenses de plus en terme de coût.

Références bibliographiques

- [1] : **Yagouti A, Abi-Zeid I, Ouarda B.M.J, Bobeé B.** Revue de processus ponctuels et synthèse de tests statistiques pour le choix d'un type de processus. Revue des sciences de l'eau 2001.
- [2] : **Olivier, F.** : (Note de cours de Processus Aléatoire) Ensimag 2^{ème} année 2004-2005.
- [3] : **Claude, B.** : (Processus de renouvellement) cour sur les processus, Université Laval.
- [4] : **Henri, P. Éric, F. Marc, P.** : Fiabilité et Maintenance des matériels industriels réparables et non réparables. Lavoisier. 2011.
- [5] **Laurent Doyen - Olivier Gaudoin,** Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables Institut National Polytechnique de Grenoble 2010.
- [6] : **El. AIT MOKHTAR et A.MOUHOUS** «Le modèle de réduction de l'intensité de défaillance pour l'optimisation de la maintenance d'un système réparable avec application à la DRGB » Mémoire de Fin de cycle de l'Université de Bejaia Juin 2010.
- [7] : **E. Ait Mokhtar.** (Modélisation de l'efficacité de maintenance) Cours de modèles de maintenance. Université de Bejaia.
- [8] : **Yann. D** (Modèle d'âge virtuel et de risque concurrents pour la maintenance imparfaite) Thèse de Doctorat, INPG.2008.
- [9] : **AFNOR (NF.X60-010)** : association française de normalisation.
- [10] : **R.Laggoune.** « Introduction à la maintenance », cours de maintenance industrielle. Université de Bejaia, 2006/2007.
- [11] : **R.Laggoune.** « Fiabilité des systèmes », cours de maintenance industrielle. Université de Bejaia, 2019/2020.
- [12] : **R. LAGGOUNE et al.** « La maintenance opportune des systèmes multi-composants ; modélisation, optimisation, incertitudes et applications industrielles ». Editions universitaires européennes, Sarrebruck (Allemagne) 2011.
- [13] : **R. LAGGOUNE** « Optimisation de la maintenance par la fiabilité opérationnelle des systèmes mécaniques multi-composants. Application industrielles » ; Thèse de Doctorat de l'université de Bejaia, 2009.
- [14] : **Olivier Gaudoin, F. Corset, S. Despréaux, Y. Dijoux et L. Doyen,** « Modélisation simultanée du vieillissement et de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables » Journée SMAI-IMdR , Université de Grenoble 2004.
- [15] : **Mahfoud. B** «Analyse de la fonction maintenance à L'UNITE TSS – SIDER ANNABA » Mémoire de fin d'étude. Université Badji Mokhtar Annaba2016/2017.

Résumé :

Pour maintenir le bon fonctionnement et la disponibilité des équipements, ainsi que minimiser les coûts liés aux interventions et leurs effets, une bonne stratégie de maintenance est nécessaire.

Pour cela, on s'intéresse à l'étude de l'efficacité de ces maintenances correctives et préventives, ce qui fait de la modélisation de ces effets une tâche importante.

Plusieurs modèles de maintenance imparfaite ont été développés ; parmi ceux qui s'ont les plus répandus on trouve les modèles à réduction d'intensité.

L'objectif principal de ce travail est l'intégration de l'efficacité de maintenance dans le modèle de coût pour l'optimisation de la maintenance préventive des systèmes réparables, qui vont nous permettre de définir les instants des interventions qui pourront minimiser le coût total de la maintenance par unité de temps.

Mots clés : maintenance imparfaite, réduction arithmétique d'intensité optimisation du la maintenance, systèmes réparables.

Summary:

To maintain the proper functioning and availability of equipment, as well as to minimize the costs related to interventions and their effects, a good maintenance strategy is necessary.

For this, we are interested in studying the effectiveness of these corrective and preventive maintenance, which makes the modeling of these effects an important task.

Several imperfect maintenance models have been developed; Among those that have become the most widespread are the dimming models.

The main objective of this work is the integration of maintenance efficiency in the cost model for the optimization of preventive maintenance of repairable systems, which will allow us to define the times of interventions that can minimize the total cost maintenance per unit time.

ملخص:

للحفاظ على الأداء السليم وتوافر المعدات، وكذلك لتقليل التكاليف المتعلقة بالتدخلات وأثارها، من الضروري وجود استراتيجية صيانة جيدة.

لهذا، نحن مهتمون بدراسة فعالية هذه الصيانة التصحيحية والوقائية، مما يجعل نمذجة هذه التأثيرات مهمة.

تم تطوير العديد من نماذج الصيانة غير الكاملة؛ من بين تلك التي أصبحت الأكثر انتشارًا هي نماذج التعتيم.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دمج كفاءة الصيانة في نموذج التكلفة لتحسين الصيانة الوقائية للأنظمة القابلة للإصلاح، مما سيسمح لنا بتحديد أوقات التدخلات التي يمكن أن تقلل التكلفة الإجمالية للصيانة لكل وحدة زمنية.