

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de Recherche Scientifique*



*Université Abderrahmane Mira de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique*

Mémoire fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En Électromécanique, spécialité Maintenance Industrielle

Optimisation des Révisions Partielles des Systèmes Réparables Intégrant un Modèle Hybride d'Efficacité de Maintenance

Présenté par :

REDOUANE Abdellatif

BOUZID Nabil

Membres de jury :

*Présidente : Mme. ABACI
Rapporteur : Pr. LAGGOUNE R
Examineur : Mr. Ait Mokhtar E*

*Université de Béjaïa
Université de Béjaïa
Université de Béjaïa*

2021/2022

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **Allah** tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre promoteur **Mr. LAGGOUNE Radouane** pour ses conseils qui ont permis l'achèvement de ce mémoire.*

*Un remerciement très spécial pour **Mme. MAY Lamia** pour son encouragement, aide et ses conseils tout au long de ce mémoire.*

Nous tenons également à remercier l'ensemble de membres de jury qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

*Pour tous leurs sacrifices, encouragements, et soutiens tout au long de mes études, de l'école primaire jusqu'au jour d'aujourd'hui.
Que ce travail soit la preuve de mon éternelle reconnaissance, amour et respect.*

Mes grands parents

*A la mémoire de mon grand-père **Hocine**, qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis.
Qui m'ont encouragé, à leurs façons.*

Mes frères et sœurs

Youssef et Mohamed el Amine, Soumia et Imene.

Mes oncles, tantes et mes proches

*A la mémoire de ma cousine **Meriem**, qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis.
Pour leur soutien, reconnaissances et affections.*

Abdellatif

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes **parents** qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'étude.*

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

*A mes **sœurs Manel et Elina**, mes **grands-parents** et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A **ma famille**, mes **proches** et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes **amis** qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous **ceux** que j'aime.*

Nabil

Table des matières

Table des matières

Liste des figures
Liste des tableaux
Glossaire
Symboles et notations utilisés

Introduction générale 11

Chapitre I Généralités sur la maintenance

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction | 14 |
| I.2. Maintenance | 14 |
| I.2.1. Types de maintenance | 14 |
| I.3. Rappel sur la fiabilité | 16 |
| I.3.1. Fiabilité | 16 |
| I.3.2. Fonction statistique utilisées en fiabilité | 16 |
| I.3.2.1. Fonction de fiabilité | 16 |
| I.3.2.2. Fonction de répartition | 16 |
| I.3.2.3. Taux de défaillance | 17 |
| I.3.3. Principales lois de probabilités utilisées en fiabilité | 17 |
| I.3.3.1. Loi de Weibull | 17 |
| I.3.3.2. Loi exponentielle | 19 |
| I.4. Processus stochastiques | 19 |
| I.4.1. Processus de renouvellement | 20 |
| I.4.2. Processus de Poisson non homogènes (<i>Non Homogenous Poisson Processus NHPP</i>) | 20 |
| I.5. Conclusion | 20 |

Chapitre II Modèles d'efficacité de maintenance

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction | 22 |
| II.2. Efficacité de la maintenance | 22 |
| II.3. Modélisation du processus de défaillance | 22 |
| II.3.1. Modèles de base | 23 |
| II.3.1.1. Modèle de réparation minimale ABAO (<i>As Bad As Old</i>) | 23 |
| II.3.1.2. Modèle de réparation parfaite AGAN (<i>As Good As New</i>) | 24 |
| II.3.2. Modèles de réduction d'intensité de défaillance | 25 |
| - Modèles à réduction arithmétique d'intensité | 25 |
| - Modèles à réduction géométrique d'intensité | 26 |
| II.3.3. Modèles de réduction d'âge virtuel | 27 |
| II.3.3.1. Modèles à réduction arithmétique d'âge (<i>ARA</i>) | 28 |
| - Modèles à réduction arithmétique d'âge mémoire 1 (<i>ARA₁</i>) | 28 |
| - Modèles à réduction arithmétique d'âge mémoire m (<i>ARA_m</i>) | 28 |

Table des matières

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.3.3.2. Modèles à réduction géométrique d'âge | 28 |
| II.3.4. Modèles hybrides | 29 |
| - Modèle 1 | 29 |
| - Modèle 2 | 30 |
| II.4. Politique de maintenance | 30 |
| II.4.1. Politique de maintenance des système mono composants | 31 |
| II.4.1.1. Politiques de maintenance selon l'âge | 31 |
| II.4.1.2. Politiques de maintenance en bloc | 31 |
| - Variante 1 | 32 |
| - Variante 2 | 32 |
| - Variante 3 | 32 |
| II.4.1.3. Politiques de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance | 32 |
| II.5. Conclusion | 33 |

Chapitre III Intégration de l'efficacité dans l'optimisation de la maintenance

| | |
|--------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction | 35 |
| III.2. Choix de la politique pour l'optimisation | 35 |
| III.3. Construction du modèle proposé | 35 |
| III.4. Vérification | 40 |
| III.5. Conclusion | 46 |

Chapitre IV Application numérique

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1. Introduction | 48 |
| IV.2. Algorithme de résolution | 48 |
| IV.3. Résultats obtenus | 49 |
| IV.4. Etude de sensibilité | 50 |
| IV.4.1. Comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel (ρ) | 50 |
| IV.4.2. Comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance (δ) | 51 |
| IV.4.3. Comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction géométrique d'intensité de défaillance (α) | 52 |
| IV.4.4. Comportement du temps optimum en fonction du rapport (C_p/C_c) | 53 |
| IV.4.5. Corrélation entre η et β et son influence sur le temps optimum | 54 |
| IV.5. Conclusion | 56 |
| Conclusion générale | 57 |
| Référence bibliographique | 58 |

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur la maintenance

| | |
|------------------------------------------------|----|
| <i>Figure I.1</i> - Types de maintenance. | 15 |
| <i>Figure I.2</i> - Courbe baignoire..... | 18 |

Chapitre II Modèles d'efficacité de la maintenance

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure II.1</i> - Modèles fréquentiels de vieillissement..... | 23 |
| <i>Figure II.2</i> - Intensité dans le modèle de maintenance minimale ABAO | 24 |
| <i>Figure II.3</i> - Intensité dans le modèle de maintenance parfaite AGAN | 25 |
| <i>Figure II.4</i> - Intensité dans le modèle à réduction arithmétique | 26 |
| <i>Figure II.5</i> - Intensité dans le modèle à réduction géométrique | 27 |
| <i>Figure II.6</i> - Modèles de maintenance imparfaite | 29 |
| <i>Figure II.7</i> - Principe de la politique de maintenance selon l'âge | 31 |
| <i>Figure II.8</i> - Principe de la politique de maintenance en bloc | 31 |

Chapitre III Intégration de l'efficacité dans l'optimisation de la maintenance

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure III.1</i> - Chronogramme de la maintenance périodique. | 35 |
|-----------------------------------------------------------------------|----|

Chapitre IV Application numérique

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure IV.1</i> - Organigramme de résolution. | 49 |
| <i>Figure IV.2</i> - Coût total en fonction de temps optimal..... | 50 |
| <i>Figure IV.3</i> - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (ρ) | 51 |
| <i>Figure IV.4</i> - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (δ) | 52 |
| <i>Figure IV.5</i> - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (α) | 53 |
| <i>Figure IV.6</i> - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (C_p/C_c) | 54 |
| <i>Figure IV.7</i> - Courbes des durées optimales en fonction de la corrélation entre η et β | 55 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre IV Application numérique

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau IV.1 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (ρ) | 50 |
| Tableau IV.2 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (δ) | 51 |
| Tableau IV.3 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (α) | 52 |
| Tableau IV.4 - Valeurs K^* , T^* et C^* en fonction du rapport (C_p/C_c) | 53 |
| Tableau IV.5 - Corrélation entre η et β et son influence sur K^* , T^* et C^* | 55 |

Glossaire

Glossaire

- AFNOR : Association Française de Normalisation.
- ABAO : Aussi Mauvais Que Vieux (*As Bad As Old*).
- AGAN : Aussi Bon Que Neuf (*As Good As New*).
- ARM_m : Réduction Arithmétique de l'Âge (*Arithemitic Reduction of Age*) de mémoire m .
- ARM_1 : Réduction Arithmétique de l'Âge (*Arithemitic Reduction of Age*) de mémoire 1.
- ARM_∞ : Réduction Arithmétique de l'Âge (*Arithemitic Reduction of Age*) de mémoire ∞ .
- CM : Maintenance Corrective (*Corrective Maintenance*).
- PM : Maintenance Préventive (*Preventive Maintenance*).
- NHPP : Processus de Poisson Non Homogène (*Non Homogeneous Poisson Process*).
- RP : Processus de Renouvellement (*Renewal Process*).

Symboles et notations

Symboles et notations utilisés

$R(t)$: La fonction de fiabilité (*Reliability*).

$F(t)$: Fonction de répartition.

$f(t)$: Fonction de densité de probabilité.

$\lambda(t)$: Intensité de défaillance.

β : Paramètre de forme.

η : Paramètre d'échelle.

γ : Paramètre de position.

δ : Facteur d'amélioration ou efficacité de maintenance.

T_{N_t} : Temps de défaillance.

T : Age du système.

N_t : Nombres de défaillance.

$E[C(T)]$: L'espérance du coût total durant un cycle de renouvellement.

$E(T)$: L'espérance du cycle de renouvellement.

X_i : Considéré comme l'âge virtuel du système après la $i^{\text{ème}}$ action de maintenance.

$C(T)$: Le coût de la maintenance par unité de temps.

C_c : Coût de la maintenance corrective.

C_p : Coût de la maintenance préventive.

C_{ov} : Coût d'une révision générale.

K^* : Nombre optimal des intervalles de la maintenance préventive.

T^* : Durée optimal.

C^* : Coût optimal.

Introduction générale

La maintenance des équipements de production est un point essentiel pour la productivité des usines ainsi que pour la qualité des produits. En effet, l'évolution technologique, l'esprit d'innovation des entreprises et leur souci permanent de réduire la fréquence des pannes de leurs équipements, font de la maintenance un outil indispensable au bon fonctionnement d'une entreprise. Tous les secteurs d'activité sont concernés et ceux qui peuvent se permettre le luxe de négliger l'état de leur outil de production sont rares. C'est un défi industriel qui implique la remise en cause des structures actuelles qui sont figées et la promotion de méthodes adaptées à la nouvelle nature des matériaux.

Sachant que la réduction des coûts et des temps d'arrêt n'est possible que si les équipements et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable. Il est donc nécessaire de préparer le travail et d'étudier les conditions d'exploitation, les pannes éventuelles et les dates d'exécution des interventions.

Pour faire ces choix stratégiques, des méthodes d'optimisation de la performance des systèmes sont appliquées, parmi lesquelles l'optimisation de la maintenance basée sur un modèle d'efficacité de maintenance.

Ce travail s'étale sur quatre chapitres, dans le premier chapitre nous nous limitons à un bref rappel sur des notions et définitions de base de la maintenance et de la fiabilité que nous trouvons utile pour le reste de notre étude. Nous commençons par définir la maintenance et ces différents types, rappel sur la fiabilité et ces fonctions statistiques les plus utilisées. Ensuite nous introduisons les processus stochastiques souvent utilisés pour les systèmes réparables. Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons essentiellement aux modèles d'efficacité de maintenance, nous commençons par définir les modèles de bases, modèle de réparations minimale et de réparations parfaite. Ensuite nous nous intéressons aux autres modèles ; modèles à réduction d'intensité de défaillance et les modèles de réduction de l'âge virtuel et enfin nous avons défini les modèles hybrides. On termine ce chapitre par définir les politiques de maintenance qui sont généralement utilisées, dans le troisième chapitre après avoir choisie un modèle d'efficacité de maintenance (modèle hybride pour notre étude) et la politique de maintenance, nous procédons à la modélisation du modèle du coût, dans lequel nous allons intégrer le modèle d'efficacité choisi. Le quatrième chapitre est consacré à une application numérique du modèle obtenu, ainsi

Introduction générale

qu'une étude de sensibilité dans laquelle nous allons explorer la sensibilité de notre modèle à ces paramètres, la corrélation entre η et β , ρ , α et δ ainsi que le rapport (C_p/C_c) enfin nous donnons des interprétations des résultats obtenus.

Nous terminerons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre I

« Généralités sur la maintenance »

1.1. Introduction

La maintenance est devenue indispensable pour le bon fonctionnement et la compétitivité d'une entreprise. Tous les secteurs d'activités sont concernés par la fiabilité et l'état de leurs outils de production. Surveiller les installations pour prévenir les pannes.

L'objectif de ce chapitre est de représenter la notion de maintenance et ces différents types existants, ainsi que les lois de fiabilité et les principaux processus stochastiques utilisés.

1.2. Maintenance

La norme AFNOR (NF X 60-010) définit la maintenance 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 » [4].

En générale, la maintenance vise à assurer le bon fonctionnement des équipements de production, notamment leur sécurité et leur disponibilité. La maintenance est plus efficace lorsque les défaillances du système peuvent être prévues et évitées, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements et des systèmes.

1.2.1. Types de maintenance

On peut distinguer plusieurs types d'interventions sur les équipements afin de les maintenir préventivement en état de marche, ou afin de les rétablir dans cet état suite à une défaillance (*Figure I.1*) :

- ***La maintenance préventive (PM)*** : réalisée pendant l'état de marche du matériel, les interventions ont pour but de réduire la dégradation du matériel et de retarder une éventuelle future panne.

On distingue parmi les interventions de maintenance préventive :

- ***La maintenance préventive systématique*** : les instants de maintenances sont établis dès la mise en service du matériel ; ces instants sont donc déterministes.
- ***La maintenance conditionnelle*** : exécutée en fonction de l'évolution d'indicateurs de performance (vibrations, température, taille d'une fissure...), Les instants de ces maintenances sont liés à des temps de défaillance potentiels du matériel, ils sont donc aussi aléatoires [1].

- **La maintenance corrective (CM)** réalisée à la suite d'une défaillance, et qui a pour but de rétablir le fonctionnement du matériel. On procédera à une réparation, ou au remplacement du matériel défaillant, suivant que l'on ait affaire à des matériels complexes réparables, ou au remplacement global de l'entité élémentaire (composant) défaillante.

L'intervention de maintenance corrective comprend la localisation de la défaillance, son diagnostic, la remise en état du matériel, le contrôle et le test de requalification avant sa remise en service. L'indisponibilité finale est donc bien supérieure au temps de réparation proprement dit.

On distingue parmi les interventions de maintenance corrective :

- **La maintenance curative** : qui a pour but de rétablir un matériel défaillant dans un état spécifié, ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.
- **La maintenance palliative** : destinée à permettre à un matériel non critique du point de vue sûreté ou disponibilité, d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Elle correspond aux dépannages provisoires qui seront suivis ultérieurement d'interventions curatives [1].

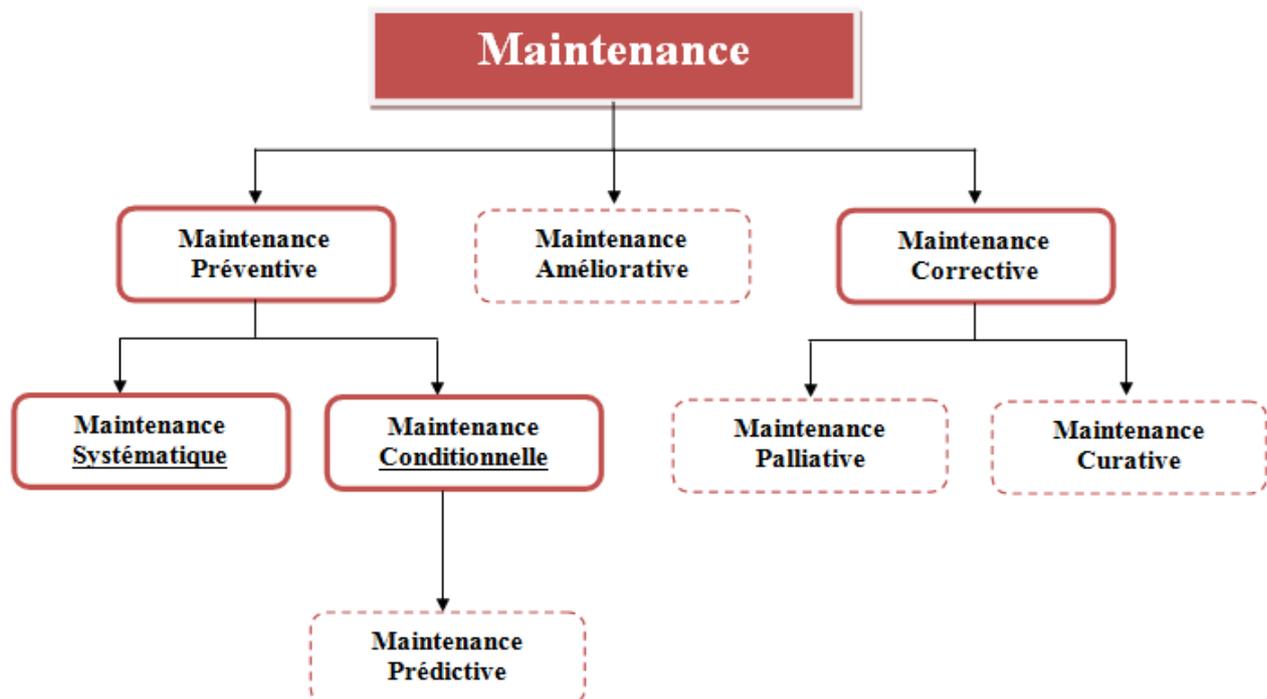


Figure I.1 - Types de maintenance.

1.3. Rappel sur la fiabilité

La fiabilité nous permet de caractériser la capacité d'un système ou d'un matériel à accomplir la fonction souhaitée dans des conditions données dans un intervalle de temps donné.

1.3.1. Fiabilité

Selon AFNOR (NF-X 60-010), la fiabilité est la caractéristique d'un système exprimé par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu dans des conditions données et pendant une durée donnée [4].

1.3.2. Fonction statistique utilisées en fiabilité

1.3.2.1. Fonction de fiabilité

La probabilité qu'un système fonctionne sans qu'il tombe en panne pendant une période $[0, t]$, s'appelle la fonction de fiabilité notée $R(t)$. Lorsqu'un système atteint au moins une défaillance pendant un temps t c'est la fonction de répartition $F(t)$ [3].

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{I.1}$$

$$F(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt \tag{I.2}$$

- $R(t)$: Fonction de fiabilité.
- $F(t)$: Fonction de répartition.
- $f(t)$: Fonction de densité de probabilité (probabilité de défaillance à l'instant t).

1.3.2.3. Fonction de répartition

On appelle fonction de défaillance la fonction F définit pour tout $t \geq 0$:

$$F(t) = P(T \leq t) \tag{I.3}$$

- T : Age du système.

Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi ait une défaillance avant l'instant t [3].

1.3.2.3. Taux de défaillance

C'est le taux de panne, taux de hasard ou taux de mortalité, il représente la probabilité conditionnelle que le système tombe en panne entre l'instant $[t, t+h]$, sachant qu'il a survécu jusqu'à l'instant t [4]. Il est donné par :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (I.4)$$

- $\lambda(t)$: Taux de défaillance à l'instant t .
- $R'(t)$: La dérivée de la fonction de fiabilité.

1.3.3. Principales lois de probabilités utilisées en fiabilité

Les lois de la fiabilité des systèmes sont divisées en deux types : les lois discrètes et les lois continues.

Parmi les lois discrète on trouve la loi Binomiale, la loi de Poisson et la loi de Bernoulli...etc, et pour les lois continues, comprenant la loi Normale, la loi de Fisher, loi de Weibull, la loi Exponentiel...etc.

Ce qui nous intéresse en priorité pour notre étude c'est la loi de Weibull et la loi Exponentiel.

1.3.3.1. Loi de Weibull

La loi de Weibull permet de caractériser les phénomènes de durée de vie d'un matériau, d'un composant ou d'un système. Cette loi recouvre toute une famille de lois. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ($\beta = 1$) et de la loi normale ($\beta = 3$).

- Sa fonction de densité [5] :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (I.5)$$

Avec $(t - \gamma) > 0$

Cette loi a trois paramètres qui sont β, γ, η telle que [5] :

- β : Paramètre de forme.
- η : Paramètre d'échelle.
- γ : Paramètre de position.

Avec :

- Sa fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{I.6})$$

- Sa fonction de fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{I.7})$$

- Intensité de défaillance :

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

L'évolution du taux de panne d'un équipement durant son cycle de vie suit une courbe dit « baignoire » divisé en 3 périodes :

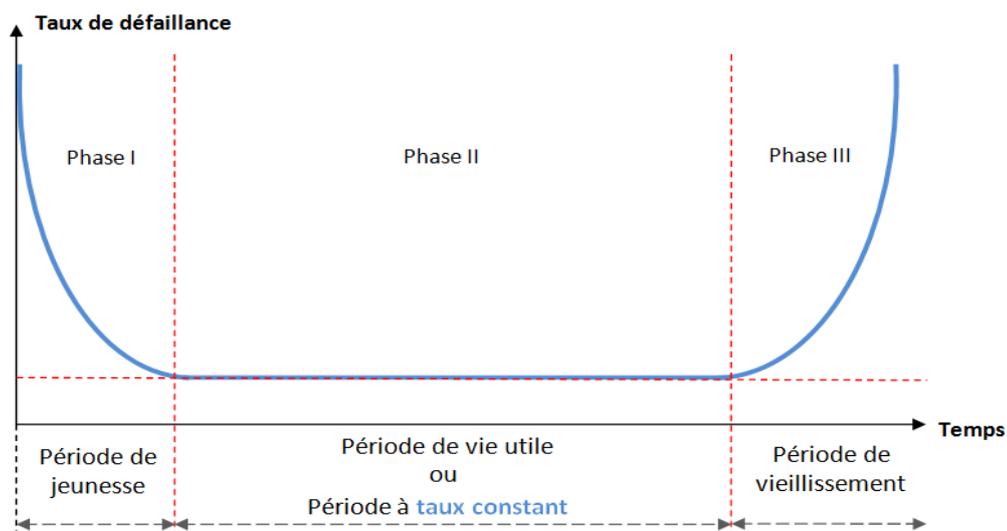


Figure I.2 - Courbe baignoire [5].

- $\beta < 1$: Le taux de défaillance décroît (période de jeunesse).
- $\beta = 1$: Le taux de défaillance est constant (période de vie utile).
- $\beta > 1$: Le taux de défaillance croît (période de vieillesse).

Généralement, on prend $\gamma=0$ et la loi de Weibull est ramenée à deux paramètres [5] :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{I.9})$$

- $R(t)$: Fonction de fiabilité.
- e : La base de l'exponentielle égale à 2.728... .

1.3.3.2. Loi exponentielle

Cette loi est appliquée pour la période où le taux de défaillance est constant ($\beta = 1$), tous les matériaux sont considérés durant leur vie utile [6].

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (\text{I.10})$$

Son taux de défaillance est :

$$\lambda(t) = \lambda = cte \quad (\text{I.11})$$

- e : La base de l'exponentielle égale à 2.728... .
- $\lambda(t)$: L'intensité de défaillance.

1.4. Processus stochastiques

Un processus est un ensemble d'activités ou une interaction qui utilise des intrants pour produire un résultat attendu, en maintenance est défini comme une fonction aléatoire du temps représentant la propension instantanée du système à tomber en panne.

Pour les systèmes réparables, les processus souvent utilisés pour modéliser l'occurrence des temps de défaillance sont : le processus de renouvellement et processus de poisson non homogènes.

1.4.1. Processus de renouvellement

Le processus de renouvellement repose sur deux phénomènes importants lorsque le taux de défaillance du matériel est stationnaire et que les défaillances sont indépendantes. Ce processus suppose que le matériel est réparé dans un état aussi bon que neuf (AGAN) [1]. L'intensité de la défaillance est de la forme :

$$\lambda_t = \lambda(t - T_{N_t}) \tag{I.12}$$

1.4.2. Processus de Poisson non homogènes (Non Homogenous Poisson Processus NHPP)

Contrairement au processus précédent qui n'est plus stationnaire et non identique et qu'il évolue en fonction du nombre de défaillances par l'unité de temps. Dans le cas où le matériel est complexe le processus NHPP intervient à la réparation de l'élément, il peut être interprété comme un modèle à réparation minimale [1].

$$\lambda_t = \lambda(t) \tag{I.13}$$

Si l'intensité des défaillances est une constante, $\forall_t \lambda(t) = \lambda$ alors les temps entre les défaillances X_i sont indépendants et exponentiellement.

1.5. Conclusion

Nous avons défini au cours de ce chapitre les notions de maintenance et de fiabilité, puis nous avons présenté les principaux processus stochastiques utilisés en maintenance.

Chapitre II

« Modèles d'efficacité de la maintenance »

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons introduire les concepts de base sur les modèles d'efficacité de maintenance : les modèles de base, les modèles à réduction d'intensité de défaillance et les modèles de réduction de l'âge virtuel afin d'introduire les modèles hybrides. En terminant ce chapitre par définir les politiques de maintenance qui sont généralement utilisées.

II.2. Efficacité de la maintenance

Une gestion efficace de la maintenance des équipements nécessite une modélisation réaliste de ses effets. Il est donc important de réaliser des modèles d'efficacité de la maintenance sur des systèmes complexes réparables et de développer des méthodes pour évaluer leur efficacité.

Généralement l'efficacité de maintenance a pour but la modélisation du comportement des systèmes réparables, elle est un enjeu économique majeur pour l'exploitation commerciale des systèmes industriels, il existe trois modèles d'efficacité de la maintenance : efficacité de la maintenance minimale, l'efficacité de la maintenance parfaite et l'efficacité de la maintenance imparfaite qui se situe entre les deux cas précédents.

II.3. Modélisation du processus de 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 capacité de fonctionnement [4]. La modélisation des processus est une manière d'améliorer l'efficacité des systèmes en structurant des activités (actions, interventions) sous la forme d'une réparation.

Nous allons développer dans ce qui suit les principaux modèles de maintenance utilisés en pratique : maintenance minimale, maintenance parfaite et maintenance imparfaite.

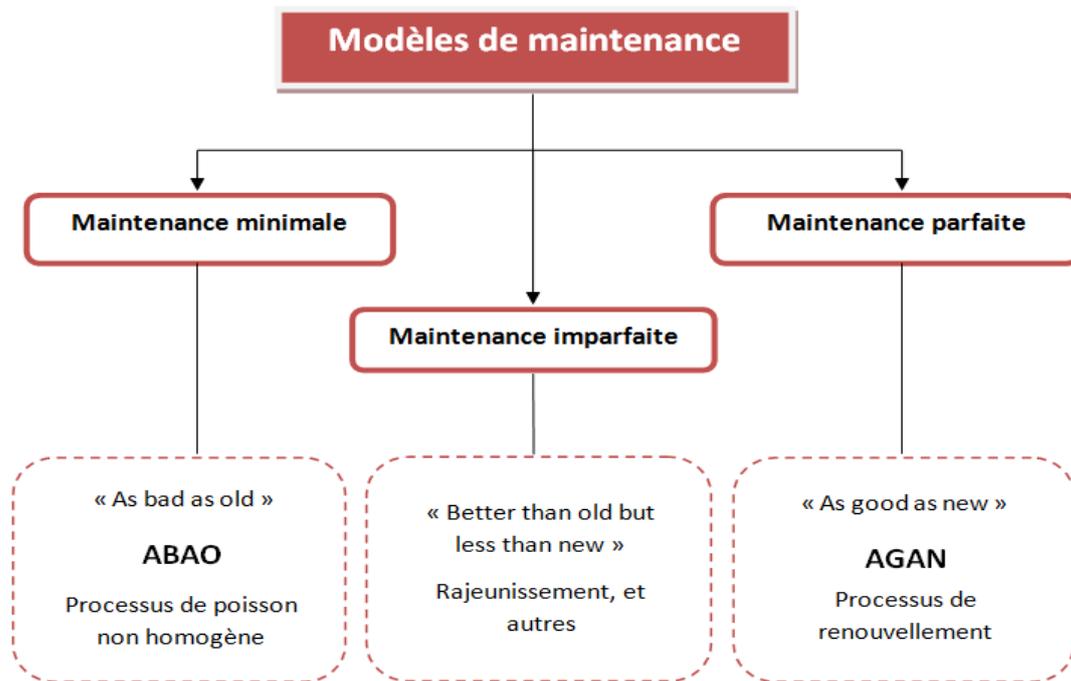


Figure II.1 - Modèles fréquentiels de vieillissement.

II.3.1. Modèles de base

On appelle modèles de base les deux types de réparations minimale ABAO et optimale (parfaite) AGAN, la première supposition est assurément bien trop pessimiste, la deuxième quant à elle est valable pour les composants défectueux remplacés par des composants neufs, mais elle ne l'est plus pour les systèmes composés de plusieurs composants : le remplacement d'un composant conduit à un rajeunissement du système global mais pas à une remise à neuf.

II.3.1.1. Modèle de réparation minimale ABAO (As Bad As Old)

Le modèle de réparation minimale dit aussi mauvais que vieux ou en anglais As Bad As Old (ABAO) consiste à supposer les réparations minimales après chaque panne, on remet le système en marche, dans l'état exact où il se trouvait au moment de la panne. Cela caractérise un effet de maintenance neutre ce qui veut dire il n'améliore pas et ne dégrade pas le système.

Par exemple, cela consiste à remettre en marche le disjoncteur après une panne de courant sans rechercher les causes exactes de la défaillance [10].

L'hypothèse ABAO n'implique que l'intensité de défaillance dépend uniquement du temps :

$$\lambda_t = \lambda(t) \tag{II.1}$$

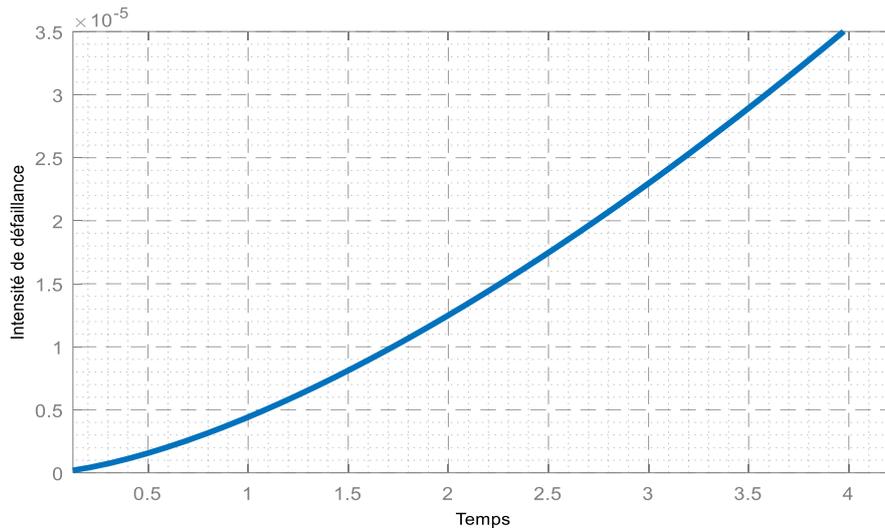


Figure II.2 - Intensité dans le modèle de maintenance minimale ABAO (selon la loi de Weibull $\beta = 2.5, \eta = 200$) [7].

II.3.1.2. Modèle de réparation parfaite AGAN (As Good As New)

Modèle de réparation parfaite dit aussi bon que neuf ou en anglais As Good As New (AGAN). On considère que les réparations après une panne sont parfaites et remettent le système à neuf. Cela peut correspondre au remplacement d'une ampoule défectueuse par une neuve de même génération.

L'hypothèse AGAN entraîne que les temps de défaillances sont indépendants. Le processus de défaillance correspond alors à un processus de renouvellement (RP). [10]

$$\lambda_t = \lambda(t - T_{N_t}) \quad (\text{II.2})$$

- T_{N_t} : Temps de défaillance.

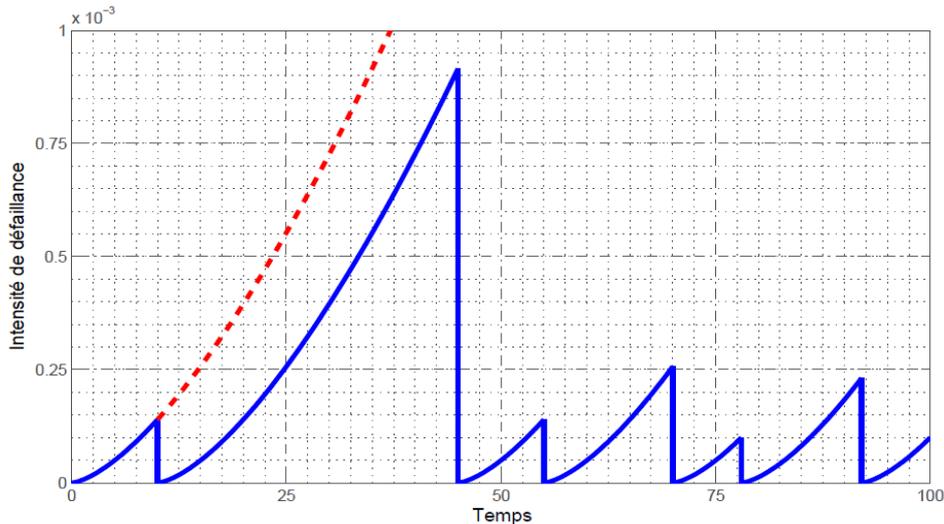


Figure II.3 - Intensité dans le modèle de maintenance parfaite AGAN (selon la loi de Weibull $\beta = 2.5$, $\eta = 200$) [7].

- Il est donc important de réaliser des modèles d'efficacité de la maintenance sur des systèmes complexes réparables et de développer des méthodes pour évaluer leur efficacité.

II.3.2. Modèles de réduction d'intensité de défaillance

Pour ce modèle, l'effet de la maintenance est de réduire l'intensité de défaillance d'une quantité proportionnelle à la valeur qu'elle avait juste avant la défaillance. La réduction de l'intensité de défaillance peut aussi bien être de type arithmétique ou géométrique.

- Modèles à réduction arithmétique d'intensité

L'idée de base d'un modèle réduction arithmétique d'intensité est qu'après une intervention de maintenance la courbe d'intensité de la défaillance part d'un point plus bas que celui juste avant l'intervention de maintenance mais parallèle à la courbe d'intensité de la défaillance initiale **Figure II.4**. Donc on peut dire dans cette sous-catégorie que l'effet de la maintenance n'affecte pas la courbe d'intensité de la défaillance. La fonction d'intensité de défaillance de ce système s'écrit sous la forme suivante [7] :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \delta \quad (\text{II.3})$$

- δ : Facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance
- $\lambda_0(t)$: intensité de défaillance initiale du système.

- Modèles à réduction géométrique d'intensité

Pour le modèle à réduction géométrique d'intensité la courbe d'intensité de défaillance est affectée par l'effet de la maintenance donc c'est contrairement au modèle précédent (modèle de réduction arithmétique). Ainsi, après l'action de maintenance, la courbe d'intensité de défaillance part d'un point plus bas que celui juste avant l'action de maintenance avec une courbe de forme différente de la courbe initiale **Figure II.5**. La fonction d'intensité de défaillance de ce système s'écrit sous la forme suivante [7] :

$$\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t) \quad (\text{II.4})$$

- α : L'efficacité de maintenance ($0 < \alpha < 1$),
- $\lambda_0(t)$: intensité de défaillance initiale du système.

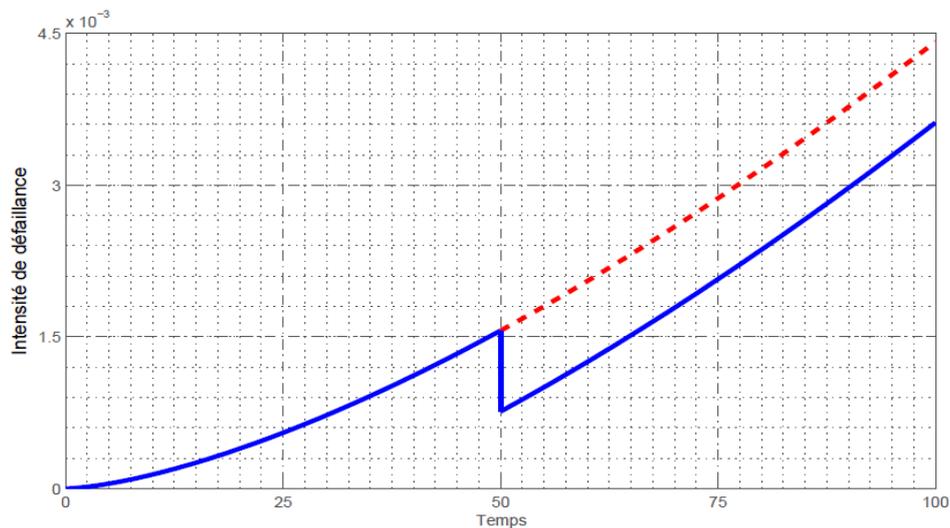


Figure II.4 - Intensité dans le modèle à réduction arithmétique [9].

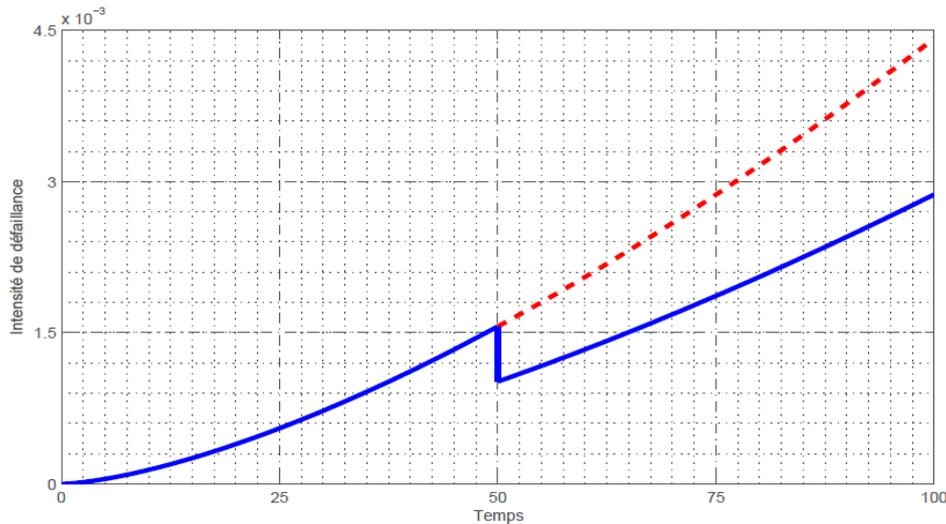


Figure II.5 - Intensité dans le modèle à réduction géométrique [9].

II.4. Modèles de réduction d'âge virtuel

La notion d'« âge virtuel » est introduite suite à des études faites en 1988 par Kijima et al, afin de modéliser le comportement d'un matériel subissant une maintenance dite imparfaite. Dans ce modèle la maintenance imparfaite ne concernait que la maintenance corrective mais pas la maintenance préventive.

Le concept de ce modèle est de réduire l'âge du système (t), après une action de maintenance préventive imparfaite, l'âge réel du système avant intervention décroît jusqu'à (t/Δ) , avec Δ : est le facteur de réduction d'âge, qui varie entre 1 et l'infini. Et qu'après la $i^{\text{ème}}$ action de maintenance imparfaite, le système se comporte comme un système neuf qui aurait fonctionné pendant une durée X_i sans défaillance (X_i : est considéré comme l'âge virtuel du système après la $i^{\text{ème}}$ action de maintenance). La fonction du modèle de réduction l'âge virtuel de ce système développé par Kijima et al [2] s'écrit sous la forme suivante :

$$\lambda(t) = \lambda(t - \rho T_{N_t}) \quad (\text{II.5})$$

Cette écriture permet de retrouver immédiatement les situations AGAN et ABAO comme cas particuliers :

- ρ : Facteur d'amélioration,
- $\rho = 1$: La maintenance est parfaite (AGAN),
- $\rho \in] 0 ; 1[$: La maintenance est efficace,
- $\rho = 0$: La maintenance est minimale (ABAO),
- $\rho < 0$: La maintenance est nuisible.

Dans ce modèle, évaluer l'efficacité de la maintenance revient à estimer le paramètre ρ .

Pour mieux comprendre l'impact du concept d'âge virtuel il existe deux sous-catégories : modèles à réduction arithmétique d'âge (*ARA*) et modèles à réduction géométrique d'âge.

II.4.1. Modèles à réduction arithmétique d'âge (*ARA*)

En faisant porter l'effet de la maintenance sur une ou plusieurs des interventions de maintenance. Il est composé de trois modèles qui sont : modèle réduction arithmétique d'âge de mémoire 1 (*ARA*₁), modèle réduction arithmétique d'âge de mémoire *m* (*ARA*_{*m*}) et modèle réduction arithmétique d'âge de mémoire infinie (*ARA*_∞). Nous nous concentrons sur les deux premiers modèles :

- **Modèles à réduction arithmétique d'âge mémoire 1 (*ARA*₁)**

Ce modèle suppose que l'effet de la maintenance est de réduire l'âge virtuel du matériel d'une quantité proportionnelle au temps passé depuis la dernière intervention de maintenance.

- **Modèles à réduction arithmétique d'âge mémoire *m* (*ARA*_{*m*})**

Pour ce modèle la mémoire *m* correspond au nombre maximal d'instantes de défaillance précédents qui peuvent influencer l'intensité de défaillance.

II.4.2. Modèles à réduction géométrique d'âge

On a supposé jusqu'à présent que la réduction d'âge était de type arithmétique, on peut aussi définir des modèles à réduction géométrique d'âge.

Le modèle le plus simple, correspond au modèle *ARA*₁ de mémoire 1. Il est défini par l'intensité :

$$\lambda_t = \lambda \left(\frac{t}{T_{N_t}} \right) \tag{II.6}$$

Jusqu'à présent, il n'existe pas encore de modèles connus éprouvés, utilisant cette hypothèse, et permettant de prendre en compte différentes efficacités pour les interventions de maintenance [1].

II.3.4. Modèles hybrides

En maintenance les modèles d'efficacité hybride sont employé en modélisation qui consiste à regrouper des modèles de réduction de l'âge et des modèles de réduction de l'intensité.

À partir des descriptions des modèles de maintenance imparfaite, on constate que le modèle de réduction d'âge présente l'avantage de déterminer la valeur initiale de l'intensité juste après une maintenance préventive (PM), et que le modèle de réduction d'intensité de défaillance présente l'avantage d'influer directe sur l'allure de la fonction d'intensité après chaque maintenance préventive (PM) [8].

Des chercheurs ont introduit et construit plusieurs modèles hybrides on cite quelque modèles parmi eux ci-dessous :

- *Modèle 1*

Dans le but de combiner ces deux avantages, un modèle hybride d'évolution d'intensité des systèmes est adopté sur la base de la méthode de réduction de l'âge et de la méthode d'augmentation du taux de probabilité, comme le montre la **Figure II.6**.

L'expression de ce modèle est sous la forme suivante [8] :

$$h(t) = bh_0(t - aT_{N_t}) \quad (\text{II.7})$$

- a : Facteur de réduction de l'âge.
- b : Facteur d'augmentation de la dégradation.
- $h_0(t)$: taux de défaillance initiale du système (hazard rate).
- Telle que : $t \in (0; T_{i+1})$ et $0 < a < 1$, $b > 1$

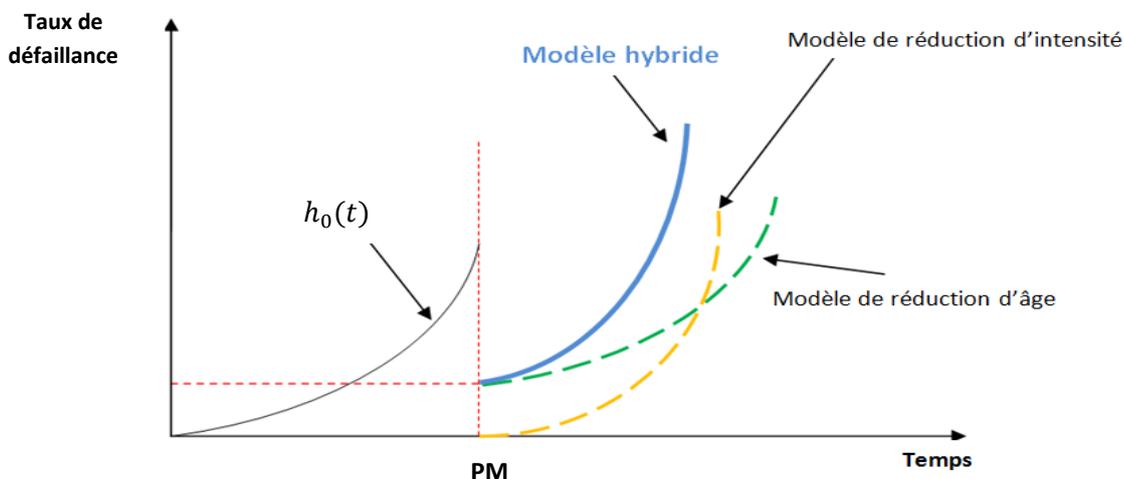


Figure II.6 - Modèles de maintenance imparfaite [8].

- *Modèle 2*

Nous montrons ici un autre modèle hybride intégrant les paramètres de réduction arithmétique et géométrique d'intensité de défaillance ainsi que le paramètre de réduction d'âge virtuel.

L'expression de ce modèle est sous la forme suivante [9] :

$$\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t - \rho T_{N_t}) - \delta\lambda_0(T_{N_t}) \quad (\text{II.8})$$

- α : Facteur de réduction géométrique d'intensité de défaillance.
- ρ : Facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel.
- δ : Facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance
- $\lambda_0(t)$: intensité de défaillance initiale du système.

II.4. Politique de maintenance

Les systèmes industriels sont en générale constitués des matériels réparables, donc suite à une dégradation, une panne, ou une défaillance, ces matériels peuvent être restaurés de façon à continuer à accomplir leur mission, grâce à une bonne politique de maintenance qui n'entraîne pas nécessairement leur remplacement. L'objectif principal de la politique de maintenance est l'efficacité économique, donc le choix de la politique de maintenance est déterminé par le calcul du coût global du cycle de vie.

II.4.1. Politiques de maintenance des systèmes mono composants

La fiabilité des systèmes, peut être améliorée en adoptant certaines politiques de maintenance appropriées, qui doivent être correctement et rapidement établies en fonction de leurs besoins. En particulier, les trois politiques suivantes qui sont généralement utilisées : politique de maintenance selon l'âge, politique de maintenance selon en bloc et la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec une réparation minimale à la défaillance.

II.4.1.1. Politiques de maintenance selon l'âge

Considérons une politique de remplacement selon l'âge dans laquelle une unité est remplacée à un moment constant T après son installation ou en cas de défaillance, les maintenances préventive et corrective (PM et CM) sont parfaites dans ce cas puisque le système remplace directement par un autre neuf [11].

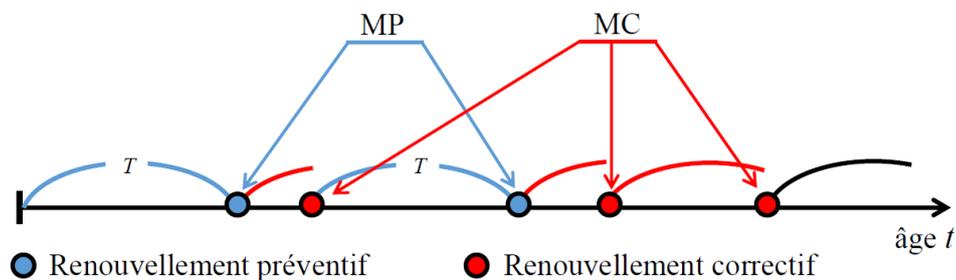


Figure II.7 - Principe de la politique de maintenance selon l'âge [7].

II.4.1.2. Politiques de maintenance en bloc

Si un système est constitué d'un bloc ou d'un groupe d'unités, que leurs âges ne sont pas observés et que seules leurs défaillances sont connues, toutes les unités peuvent être remplacées périodiquement indépendamment de leur âge d'utilisation.

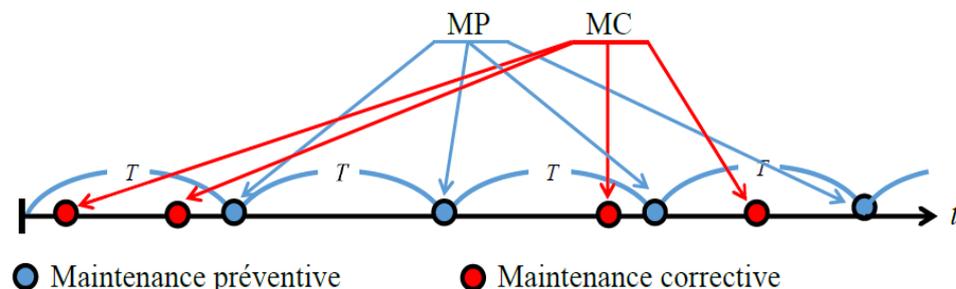


Figure II.8 - Principe de la politique de maintenance en bloc [7].

Dans cette politique, il existe trois modèles sont les suivants :

- **Variante 1**

Dans cette variante, le système est renouvelé **périodiquement** à des intervalles de temps fixe T (T est une constante) et renouvelé aussi (le système) après une défaillance.

Le principal inconvénient de ce modèle est si le système subit une défaillance à un instant proche de T , il est remplacé à la défaillance et aussi quelque instant après une maintenance préventive (PM) périodique.

- **Variante 2**

Dans la variante 2, le système est renouvelé **directement** après la défaillance, l'avantage de ce modèle est la défaillance détectée que lors des instants de maintenance préventive (PM).

- **Variante 3**

Les défaillances de système dans ce modèle sont détectées à temps et réparées mais avec un effet nul sur le processus de dégradation du système c'est à dire une maintenance corrective minimale.

II.4.1.3. Politiques de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance

Cette politique est distinguée de la **variante 3** de la politique précédente (Politiques de maintenance en bloc), la différence est dans ce cas les actions de maintenance sont imparfaites, d'où les périodicités T représente les instants des maintenances préventives (PM) imparfaites. Le système est renouvelé qu'après avoir fonctionné dans certains temps KT .

La fonction du coût par unité de temps dans ce modèle s'écrit [7] :

$$C(K, T) = \frac{c_c H(K, T) + (K - 1)c_p + c_r}{KT} \quad (\text{II.10})$$

- $H(T)$: Taux de hazard cumulé.
- K : Nombre optimal des intervalles de la maintenance préventive.
- T : Durée optimale de ces intervalles.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a montré le rôle et l'enjeu de l'efficacité de la maintenance dans les systèmes complexes et réparables par ces trois modèles (minimale, parfaite et imparfaite).

Dans la maintenance imparfaite on a défini les modèles de réduction d'intensité de défaillance et les modèles de réduction d'âge virtuel, dans le but de combiner les deux modèles précédents pour obtenir les modèles hybrides.

Ensuite, nous avons introduit différentes politiques de maintenance ainsi la politique choisie pour notre étude menée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

« Intégration de l'efficacité dans l'optimisation de la maintenance »

III.1. Introduction

La maintenance des systèmes après une défaillance est coûteuse, et parfois elle pourrait prendre beaucoup de temps. Pour éviter cela, c'est très important de maintenir préventivement les éléments du système pour assurer la production prévue dans des conditions financières optimales et respecter les délais.

Dans ce contexte, Il est donc important d'optimiser les instants des maintenances préventives et ses coûts, afin d'organiser un cycle de révision générale des unités de production et augmenter la rentabilité de système. C'est ce que nous allons voir dans ce chapitre.

III.2. Choix de la politique pour l'optimisation

L'optimisation d'un modèle de la maintenance se fait selon une politique de maintenance choisie. Pour notre étude la politique choisie est la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec une réparation minimale à la défaillance.

Cette politique est appliquée sur les systèmes réparables, elle consiste à déterminer le nombre optimal des intervalles de la maintenance préventive 'K' et la durée optimale 'T' de ces intervalles.

III.3. Construction du modèle proposé

Pour développer notre modèle d'étude, nous allons associer le modèle d'efficacité qu'on a choisi dans le *chapitre II* (modèles hybrides « modèle 2 ») au modèle de la politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance. Dans cette politique le système subit périodiquement des révisions partielles (maintenance préventive imparfaite), mais après K maintenances imparfaites il subira une révision générale (complète). Pour cela les défaillances surviennent suivant un processus de poisson non-homogène.

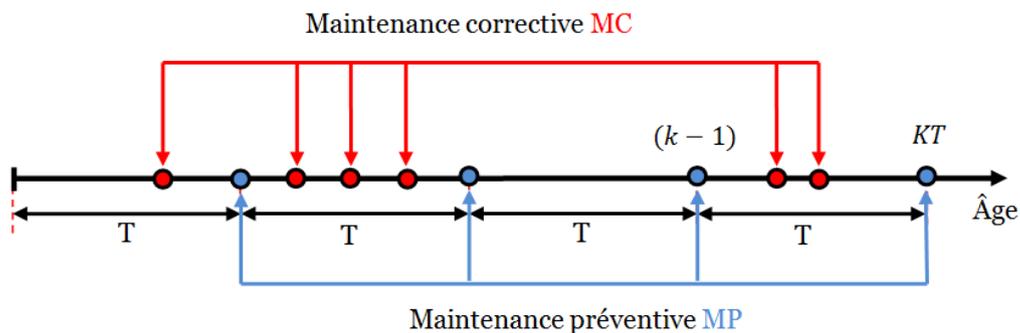


Figure III.1 - Chronogramme de la maintenance périodique.

- Hypothèses :

- On considère que les réparations aux défaillances sont minimales.
- Les maintenances préventives sont les même et imparfaites.
- Après K cycle le système reçoit une révision générale qui le remet à neuf.
- Le coût C_p est le même pour chaque intervention de maintenance préventive.
- Les durées entre les maintenances préventives sont fixes et égales.

Le coût moyen par unité de temps est :

$$C(T) = \frac{E[C(T)]}{E(T)} \quad (\text{III.1})$$

Tel que :

- $E[C(T)]$: L'espérance du coût total durant un cycle de renouvellement.
- $E(T)$: L'espérance du cycle de renouvellement.

Pour $(k - 1)$ révisions partielles, l'expression du coût est :

$$C(T) = \frac{(k - 1)C_p + C_c H(T) + C_{ov}}{KT} \quad (\text{III.2})$$

- C_c : Coût d'une maintenance corrective.
- C_p : Coût d'une maintenance préventive.
- C_{ov} : Coût d'une révision générale.

Modèle d'efficacité choisi :

$$\lambda(t) = a\lambda_0(t - \rho T_{N_t}) - \delta\lambda_0(T_{N_t}) \quad (\text{III.3})$$

Nous avons la fonction de hazard cumulé donne comme suit :

$$H(T) = \sum_{j=1}^k H_j \quad (\text{III.4})$$

Puisque nous sommes en présence du processus de poisson non-homogène le nombre des défaillances dans un intervalle de temps $[T ; 2T]$ Pour une seule période « j » est donné comme suit :

$$H_0(T) = \int_0^T \lambda_0(t) dt$$

$$H_1(T) = \int_T^{2T} a\lambda_0(t - \rho T_{N_t}) - \delta\lambda_0(T_{N_t}) dt \tag{III.5}$$

$$H_j(T) = \int_{jT}^{(j+1)T} a^{(j-1)}\lambda_0(t - \rho T_{N_t}) - \delta\lambda_0(T_{N_t}) dt \quad j = 1, 2, 3 \dots K \tag{III.6}$$

Nous remplaçons l'expression (III.6) dans l'expression du coût (III.2) :

$$C(T) = \frac{(k-1)C_p + C_{ov}}{KT} + \frac{C_c}{KT} \left[\int_0^T H_0(t)dt + \int_T^{2T} H_1(t)dt + \dots + \int_{(K-1)T}^{KT} H_{(K-1)}(t)dt \right]$$

$$C(T) = \frac{(k-1)C_p + C_{ov}}{KT} + \frac{C_c}{KT} \left[\sum_{(K=1)}^m \int_{(K-1)T}^{KT} H(t)dt \right]$$

$\lambda(t)$ Représente le taux de défaillance, dans le cas de Weibull son expression est comme suit :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{III.7}$$

Donc si nous remplaçons l'expression (III.7) dans (III.3) on trouve :

$$\lambda(t) = a \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \tau T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] - \delta \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right]$$

Donc :

$$C(T) = \frac{(k-1)C_p + C_{ov}}{KT} + \frac{C_c}{KT} \left[\sum_{(K=1)}^m \int_{(K-1)T}^{KT} a^{(K-1)} \left(\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right) - \delta \left(\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right) dt \right]$$

- Calcul de l'intégrale de $H(t)$:

$$H(t) = \sum_{(K=1)}^m \int_{(K-1)T}^{KT} [\alpha^{(K-1)} \lambda(t - \rho T_{N_t}) - \delta \lambda_0(T_{N_t})] dt \quad (\text{III.8})$$

Nous posons :

$$H(t) = \sum_{(K=1)}^m H_1(t) - H_2(t) \quad (\text{III.9})$$

Donc :

$$H_1(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \alpha^{(K-1)} \lambda(t - \rho T_{N_t}) dt \quad \text{Et} \quad H_2(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \delta \lambda_0(T_{N_t}) dt$$

D'où :

$$H_1(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \alpha^{(K-1)} \lambda(t - \rho T_{N_t}) dt$$

$$H_1(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \alpha^{(K-1)} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

$$H_1(t) = \alpha^{(K-1)} \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{(K-1)T}^{KT} (t - \rho T_{N_t})^{\beta-1} dt$$

$$H_1(t) = \alpha^{(K-1)} \frac{\beta}{\eta^\beta \beta} \left[(t - \rho T_{N_t})^\beta \right]_{(K-1)T}^{KT}$$

$$H_1(t) = \frac{\alpha^{(K-1)}}{\eta^\beta} \left[(t - \rho T_{N_t})^\beta \right]_{(K-1)T}^{KT}$$

$$H_1(t) = \frac{\alpha^{(K-1)}}{\eta^\beta} \left[(KT - \rho(K-1)T)^\beta - ((K-1)T - \rho(K-1)T)^\beta \right]$$

$$H_1(t) = \frac{\alpha^{(K-1)}[(KT - \rho(K-1)T)^\beta - ((K-1)T - \rho(K-1)T)^\beta]}{\eta^\beta}$$

$$H_1(t) = \alpha^{(K-1)} \left[\left(\frac{(KT - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-1)T - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta \right]$$

- Pour $H_2(t)$ on aura :

$$H_2(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \delta \lambda_0(T_{N_t}) dt$$

$$H_2(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

$$H_2(t) = \int_{(K-1)T}^{KT} \delta \frac{\beta}{\eta^\beta} (T_{N_t})^{\beta-1} dt$$

$$H_2(t) = \delta \frac{\beta (T_{N_t})^{\beta-1}}{\eta^\beta} [t]_{(K-1)T}^{KT}$$

$$H_2(t) = \delta \frac{\beta (T_{N_t})^{\beta-1}}{\eta^\beta} [KT - (K-1)T]$$

$$H_2(t) = \delta \beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta}$$

Et comme nous avons posé dans (III.9) que :

$$H(t) = \sum_{(K=1)}^m H_1(t) - H_2(t)$$

Donc :

$$H(t) = \sum_{K=1}^m \left[\alpha^{(K-1)} \left[\left(\frac{(KT - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-1)T - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta \beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta} \right]$$

D'où l'expression du coût devient :

$$C(T) = \frac{(k-1)C_p + C_{ov} + C_c \sum_{K=1}^m \left[\alpha^{(K-1)} \left[\left(\frac{(KT - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-1)T - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta \beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta} \right]}{KT} \quad (\text{III.10})$$

III.4. Vérification

Dans ce qui suit nous allons procéder à l'intégration de l'expression (III.8) sur plusieurs intervalles afin de se statuer sur un cas général. Nous notons qu'à chaque intervalle on calcule $H_0, H_1, H_2 \dots H_{100}$ tell que H_{100} représente l'intervalle $[(K-2)T ; (K-1)T]$.

- Calcul sur l'intervalle $[0, T]$ et on pose $H_0(t)$ comme suit :

$$\begin{aligned} H_0(t) &= H_{11}(t) - H_{21}(t) \\ H_{11}(t) &= \int_0^T \lambda(t) dt \\ H_{11}(t) &= \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_0^T (t)^{\beta-1} dt \\ H_{11}(t) &= \frac{\beta}{\eta^\beta \beta} [(t)^\beta]_0^T \\ H_{11}(t) &= \frac{T^\beta}{\eta^\beta} \\ H_{21}(t) &= \int_0^T \delta \lambda_0(T_{N_t}) dt \\ H_{21}(t) &= 0 \\ H_0(t) &= H_{11}(t) - H_{21}(t) \\ H_0(t) &= \frac{T^\beta}{\eta^\beta} \end{aligned}$$

(III.11)

- Calcul sur l'intervalle $[T, 2T]$:

$$H_1(t) = H_{13}(t) - H_{23}(t)$$

$$H_{13}(t) = \int_T^{2T} \alpha \lambda(t - \rho T) dt$$

$$H_{13}(t) = \alpha \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_T^{2T} (t - \rho T)^{\beta-1} dt$$

$$H_{13}(t) = \alpha \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_T^{2T} (t - \rho T)^{\beta-1} dt$$

$$H_{13}(t) = \frac{\alpha}{\eta^\beta} [(t - \rho T)^\beta]_T^{2T}$$

$$H_{13}(t) = \frac{\alpha}{\eta^\beta} [(2T - \rho T)^\beta - (T - \rho T)^\beta]$$

$$H_{23}(t) = \int_T^{2T} \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{23}(t) = \delta \frac{\beta(T)^{\beta-1}}{\eta^\beta} [t]_T^{2T}$$

$$H_{23}(t) = \delta \frac{\beta(T)^{\beta-1} 2T}{\eta^\beta} - \delta \frac{\beta(T)^{\beta-1} T}{\eta^\beta}$$

$$H_{23}(t) = \delta \beta \frac{(T)^\beta}{\eta^\beta}$$

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

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

(III.12)

- Calcul sur l'intervalle $[2T, 3T]$:

$$H_2(t) = H_{14}(t) - H_{24}(t)$$

$$H_{14}(t) = \int_{2T}^{3T} \alpha^2 \lambda(t - \rho 2T) dt$$

$$H_{14}(t) = \int_{2T}^{3T} \alpha^2 \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \rho 2T}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{14}(t) = \alpha^2 \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{2T}^{3T} (t - \rho 2T)^{\beta-1} dt$$

$$H_{14}(t) = \alpha^2 \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{2T}^{3T} (t - \rho 2T)^{\beta-1} dt$$

$$H_{14}(t) = \frac{\alpha^2}{\eta^\beta} [(t - \rho 2T)^\beta]_{2T}^{3T}$$

$$H_{14}(t) = \frac{\alpha^2}{\eta^\beta} [(3T - \rho 2T)^\beta - (2T - \rho 2T)^\beta]$$

$$H_{14}(t) = \alpha^2 \left[\left(\frac{3T - \rho 2T}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{2T - \rho 2T}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$H_{24}(t) = \int_{2T}^{3T} \delta \lambda_0(2T) dt$$

$$H_{24}(t) = \int_{2T}^{3T} \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{2T}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{24}(t) = \delta \frac{\beta (2T)^{\beta-1}}{\eta^\beta} [t]_{2T}^{3T}$$

$$H_{24}(t) = \delta \frac{\beta (2T)^{\beta-1} 3T}{\eta^\beta} - \delta \frac{\beta (2T)^{\beta-1} 2T}{\eta^\beta}$$

$$H_{24}(t) = \delta \beta \frac{(2T)^{\beta-1} T}{\eta^\beta}$$

$$\begin{aligned}
H_{24}(t) &= \delta\beta \frac{2^{\beta-1}T^\beta}{\eta^\beta} \\
H_2(t) &= \frac{\alpha^2}{\eta^\beta} [(3T - \rho 2T)^\beta - (2T - \rho 2T)^\beta] - \delta\beta \frac{2^{\beta-1}T^\beta}{\eta^\beta} \\
H_2(t) &= \alpha^2 \left[\left(\frac{(3T - \rho 2T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{(2T - \rho 2T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta\beta \frac{2^{\beta-1}T^\beta}{\eta^\beta}
\end{aligned} \tag{III.13}$$

- Calcul sur l'intervalle $[3T, 4T]$:

$$\begin{aligned}
H_3(t) &= H_{15}(t) - H_{25}(t) \\
H_{15}(t) &= \int_{3T}^{4T} \alpha^3 \lambda(t - \rho 3T) dt \\
H_{15}(t) &= \int_{3T}^{4T} \alpha^3 \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \rho 3T}{\eta} \right)^{\beta-1} dt \\
H_{15}(t) &= \alpha^3 \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{3T}^{4T} (t - \rho 3T)^{\beta-1} dt \\
H_{15}(t) &= \alpha^3 \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{3T}^{4T} (t - \rho 3T)^{\beta-1} dt \\
H_{15}(t) &= \frac{\alpha^3}{\eta^\beta} [(t - \rho 3T)^\beta]_{3T}^{4T} \\
H_{15}(t) &= \frac{\alpha^3}{\eta^\beta} [(4T - \rho 3T)^\beta - (3T - \rho 3T)^\beta] \\
H_{15}(t) &= \alpha^3 \left[\left(\frac{(4T - \rho 3T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{(3T - \rho 3T)}{\eta} \right)^\beta \right] \\
H_{25}(t) &= \int_{3T}^{4T} \delta \lambda_0(3T) dt
\end{aligned}$$

$$H_{25}(t) = \int_{3T}^{4T} \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{3T}{\eta}\right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{25}(t) = \delta \frac{\beta(3T)^{\beta-1}}{\eta^\beta} [t]_{3T}^{4T}$$

$$H_{25}(t) = \delta \frac{\beta(3T)^{\beta-1}4T}{\eta^\beta} - \delta \frac{\beta(3T)^{\beta-1}3T}{\eta^\beta}$$

$$H_{25}(t) = \delta\beta \frac{(3T)^{\beta-1}T}{\eta^\beta}$$

$$H_{25}(t) = \delta\beta \frac{3^{\beta-1}T^\beta}{\eta^\beta}$$

$$H_3(t) = \alpha^3 \left[\left(\frac{(4T - \rho 3T)}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{(3T - \rho 3T)}{\eta}\right)^\beta \right] - \delta\beta \frac{3^{\beta-1}T^\beta}{\eta^\beta}$$

(III.14)

.

.

.

- Calcul sur l'intervalle $[(K-2)T, (K-1)T]$:

$$H_{100}(t) = H_{101}(t) - H_{102}(t)$$

Donc nous aurons :

$$H_{101}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \alpha^{(K-2)} \lambda(t - \rho T_{N_t}) dt \quad \text{Et} \quad H_{102}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \delta \lambda_0(T_{N_t}) dt$$

$$H_{101}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \alpha^{(K-2)} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \rho T_{N_t}}{\eta}\right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{101}(t) = \alpha^{(K-2)} \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} (t - \rho T_{N_t})^{\beta-1} dt$$

$$H_{101}(t) = \alpha^{(K-2)} \frac{\beta}{\eta^\beta \beta} \left[(t - \rho T_{N_t})^\beta \right]_{(K-2)T}^{(K-1)T}$$

$$H_{101}(t) = \frac{\alpha^{(K-2)}}{\eta^\beta} \left[(t - \rho T_{N_t})^\beta \right]_{(K-2)T}^{(K-1)T}$$

$$H_{101}(t) = \frac{\alpha^{(K-2)}}{\eta^\beta} \left[((K-1)T - \rho(K-1)T)^\beta - ((K-2)T - \rho(K-1)T)^\beta \right]$$

$$H_{101}(t) = \frac{\alpha^{(K-2)} \left[((K-1)T - \rho(K-2)T)^\beta - ((K-2)T - \rho(K-2)T)^\beta \right]}{\eta^\beta}$$

$$H_{101}(t) = \alpha^{(K-2)} \left[\left(\frac{((K-1)T - \rho(K-2)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-2)T - \rho(K-2)T)}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$H_{102}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \delta \lambda_0(T_{N_t}) dt$$

$$H_{102}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \delta \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

$$H_{102}(t) = \int_{(K-2)T}^{(K-1)T} \delta \frac{\beta}{\eta^\beta} (T_{N_t})^{\beta-1} dt$$

$$H_{102}(t) = \delta \frac{\beta (T_{N_t})^{\beta-1}}{\eta^\beta} [t]_{(K-2)T}^{(K-1)T}$$

$$H_{102}(t) = \delta \frac{\beta (T_{N_t})^{\beta-1}}{\eta^\beta} [(K-1)T - (K-2)T]$$

$$H_{102}(t) = \delta \frac{\beta (T_{N_t})^{\beta-1}}{\eta^\beta} [KT - T - KT + 2T]$$

$$H_{102}(t) = \delta \beta \frac{((K-1)T)^{\beta-1} T}{\eta^\beta}$$

$$H_{102}(t) = \delta \beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta}$$

$$H_{100}(t) = \alpha^{(K-2)} \left[\left(\frac{((K-1)T - \rho(K-2)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-2)T - \rho(K-2)T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta\beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta} \quad (\text{III.15})$$

Pour le calcul d'intégrale de l'intervalle suivant $[(K-1)T, KT]$, nous aurons l'expression suivante :

$$H(t) = \alpha^{(K-1)} \left[\left(\frac{(KT - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-1)T - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta\beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta}$$

Et après intégration du résultat dans l'expression (III.9) nous obtenons la forme générale de l'intégrale comme suit :

$$H(t) = \sum_{K=1}^m \left[\alpha^{(K-1)} \left[\left(\frac{(KT - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{((K-1)T - \rho(K-1)T)}{\eta} \right)^\beta \right] - \delta\beta \frac{(K-1)^{\beta-1} T^\beta}{\eta^\beta} \right]$$

III.5. Conclusion

Ce chapitre était consacré pour la conception du modèle du coût, où nous avons procédé à l'incorporation du modèle d'efficacité hybride dans ce dernier, après le choix de la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance.

Suivant les hypothèses de cette politique les défaillances suivent un processus de poisson non-homogène où nous avons choisi d'exprimer le taux de défaillance suivant le cas de Weibull.

Enfin nous avons structuré notre modèle après calcul d'intégrales et simplifications, nous nous sommes statuer sur le modelé de coût a optimisé afin de déterminer les paramètres de décisions K^* et T^* .

Chapitre IV

« Application numérique »

IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une application numérique de notre modèle. Nous allons commencer par un algorithme de résolution, ensuite nous effectuons une étude de sensibilité où nous allons explorer le comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel (ρ), le facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance (δ), le facteur de réduction géométrique d'intensité de défaillance (α), du rapport (C_p/C_c) et enfin en fonction de la corrélation entre η et β .

IV.2. Algorithme de résolution

Afin de réaliser notre étude nous avons considéré un échantillon de données dans lequel nous avons simulé les différentes valeurs des paramètres constituant ce modèle comme suit :

Nous avons les interventions de maintenance préventive qui sont périodiques et imparfaites, elles sont effectuées selon des périodes fixes $KT, K = 1, 2, 3 \dots m$.

- Le coût de maintenance préventif est $C_p = 1000\text{€}$.
- Le coût de maintenance correctif est $C_c = 5000\text{€}$.

Après K interventions de maintenances préventives, l'élément est renouvelé complètement.

- Le coût de la révision général est $C_{ov} = 100000\text{€}$.

Les différents facteurs sont pris comme suit :

- $\rho = 0.6$
- $\delta = -0.5466$
- $\alpha = 1.6308$
- $\eta = 120$
- $\beta = 2.5$

Pour l'optimisation du coût nous avons utilisé le calculateur Matlab, en suivant l'organigramme de résolution (**Figure IV.1**) :

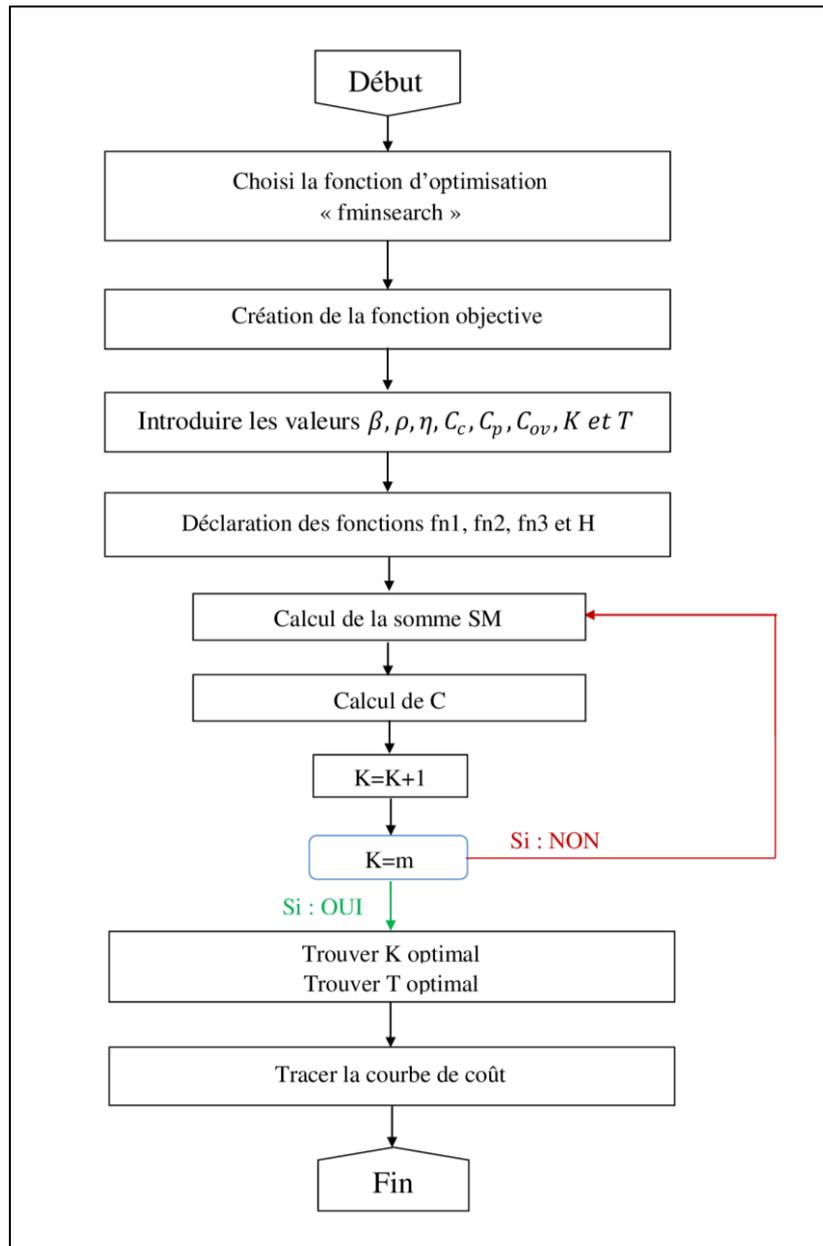


Figure IV.1 - Organigramme de résolution.

IV.3. Résultats obtenus

Après déroulement du programme les résultats suivant sont obtenus :

- Le nombre optimal des intervalles des maintenances préventives $K^* = 9$.
- La durée optimale des intervalles des maintenances préventives $T^* = 17.0536 \text{ jours}$.
- Le cout optimal $C^* = 1065.2684\text{€}$.

Ces résultats sont illustrés dans la figure suivante :

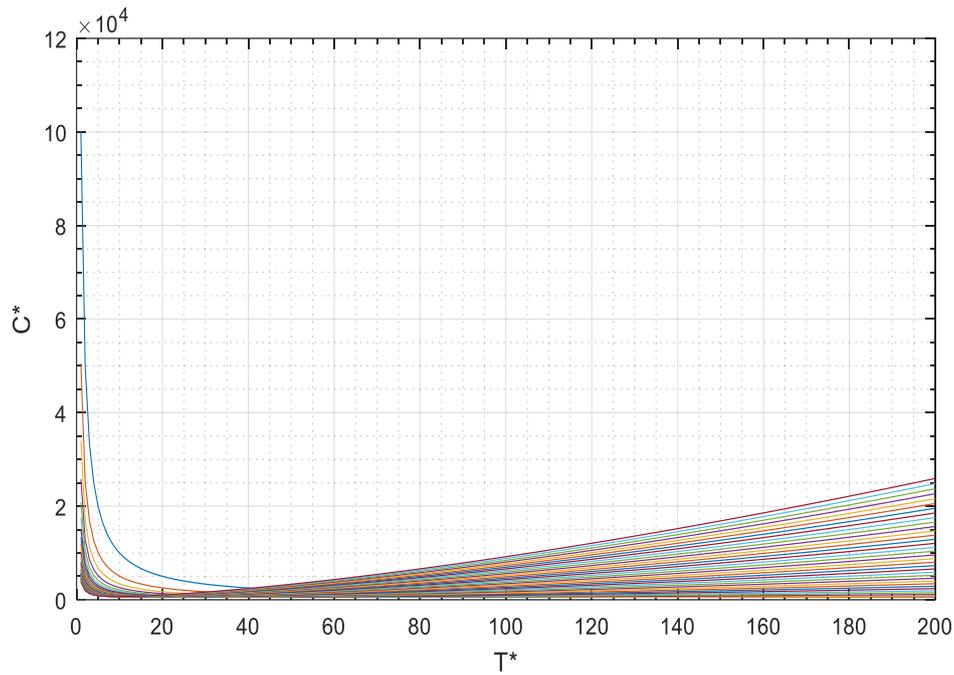


Figure IV.2 - Coût total en fonction de temps optimal.

IV.4. Etude de sensibilité

Dans ce qui suit nous allons étudier la sensibilité de notre modèle développé aux différents paramètres ρ , δ , α et (C_p/C_c) ainsi que la corrélation entre η et β .

IV.4.1. Comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel (ρ)

Etudions le temps et le coût optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel (ρ). Nous varions les valeurs de ce facteur (ρ) et nous fixons les coûts (C_p), (C_c), ainsi que les paramètres δ , α , η et β , les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau IV.1** :

Tableau IV.1 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (ρ).

| ρ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|--------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| K^* | 9 | 9 | 10 | 10 | 11 | 14 |
| T^* | 14,0179 | 15,776 | 13,9526 | 17,0536 | 18,0938 | 20,726 |
| C^* | 1426,743 | 1267,751 | 1301,8081 | 1065,2684 | 921,1284 | 648,9561 |

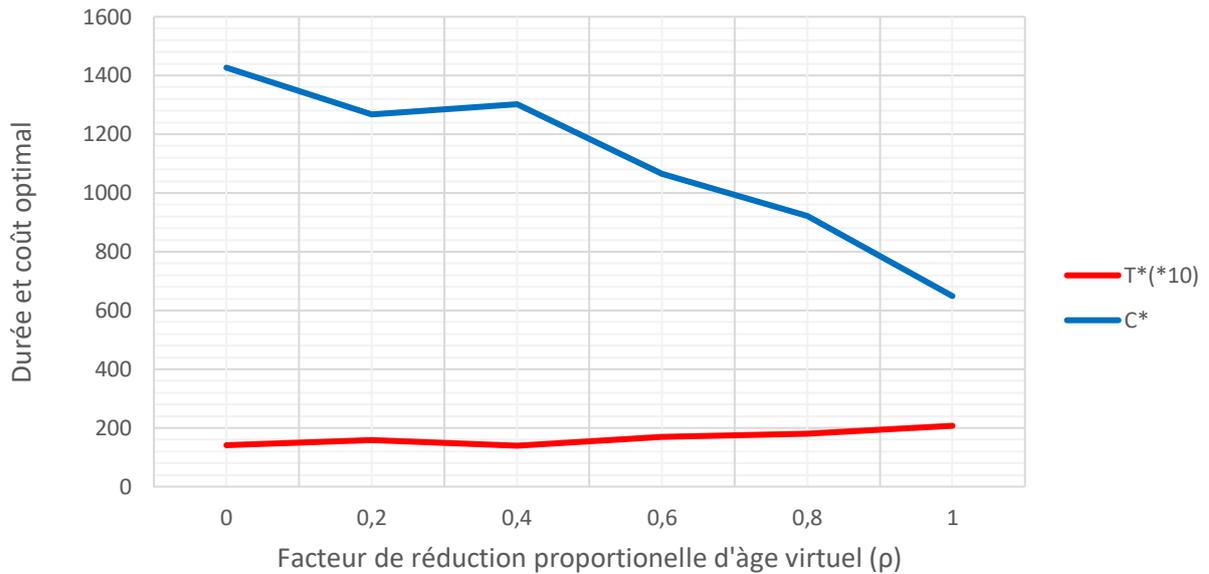


Figure IV.3 - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (ρ).

• **Discussion**

Nous remarquons que la durée optimale T^* augmente par contre le coût optimal C^* diminue. Cela revient à l'influence du facteur ρ sur l'efficacité de la maintenance c'est à dire en augmentant ce facteur cette efficacité s'améliore, autrement dit nous fournissons beaucoup d'efforts pour la maintenance préventive, ce qui nous autorise à prolonger les intervalles de révisions partielles ainsi que le nombre de ces révisions. Par conséquent, la durée de vie du système se trouve ainsi prolongée.

IV.4.2. Comportement du temps optimum en fonction du facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance (δ)

Etudions le temps et le coût optimum en fonction du facteur δ . Nous varions les valeurs de ce facteur et nous fixons les coûts (C_p), (C_c), ainsi que les paramètres ρ , α , η et β , les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau IV.2** :

Tableau IV.2 – Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (δ).

| δ | -0,8 | -0,6 | -0,5466 | 0 | 0,002 | 0.4 | 0.6 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| K^* | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| T^* | 16,866 | 17,0137 | 17,0536 | 17,0473 | 17,0473 | 18,1537 | 18,1584 |
| C^* | 1077,0561 | 1067,7684 | 1065,2684 | 1039,6448 | 1039,5971 | 1019,6601 | 1009,3604 |

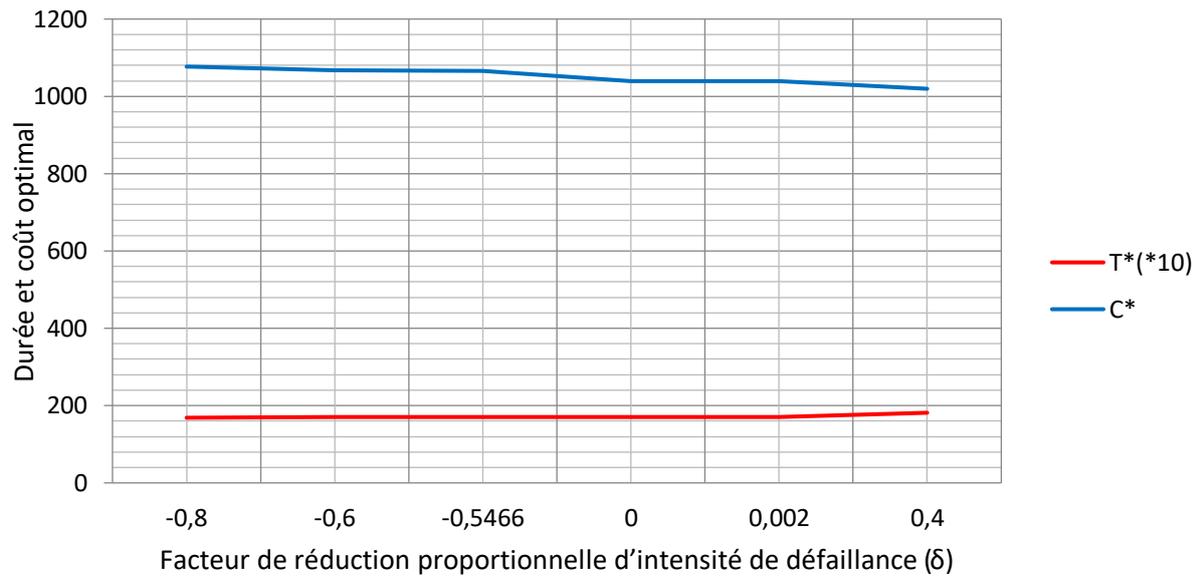


Figure IV.4 - Courbes de la durée et le coût optimaux en fonction de (δ).

• Discussion

Nous remarquons que la durée optimale T^* augmente par contre le coût optimal C^* diminue. Ce qui justifie qu'à chaque fois le facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance (δ) augmente, la réduction du taux de défaillance après chaque maintenance exécutée sera plus grande que la précédente. Par conséquent les durées des intervalles des révisions partielles seront allongées proportionnellement par rapport à ce facteur.

IV.4.3. Comportement du temps optimum en fonction de facteur de réduction géométrique d'intensité de défaillance (α)

Étudions le temps et le coût optimum en fonction du facteur α . Nous varions les valeurs de ce facteur et nous fixons les coûts (C_p), (C_c), ainsi que les paramètres ρ , δ , η et β , les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau IV.3** :

Tableau IV.3 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction de (α).

| α | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,4 | 1,6308 | 1,8 |
|----------|----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| K^* | 21 | 21 | 19 | 12 | 10 | 9 |
| T^* | 22,6862 | 23,3283 | 22,0618 | 17,0651 | 17,0536 | 17,3479 |
| C^* | 402,9114 | 408,251 | 469,1748 | 903,3956 | 1065,2684 | 1135,4205 |

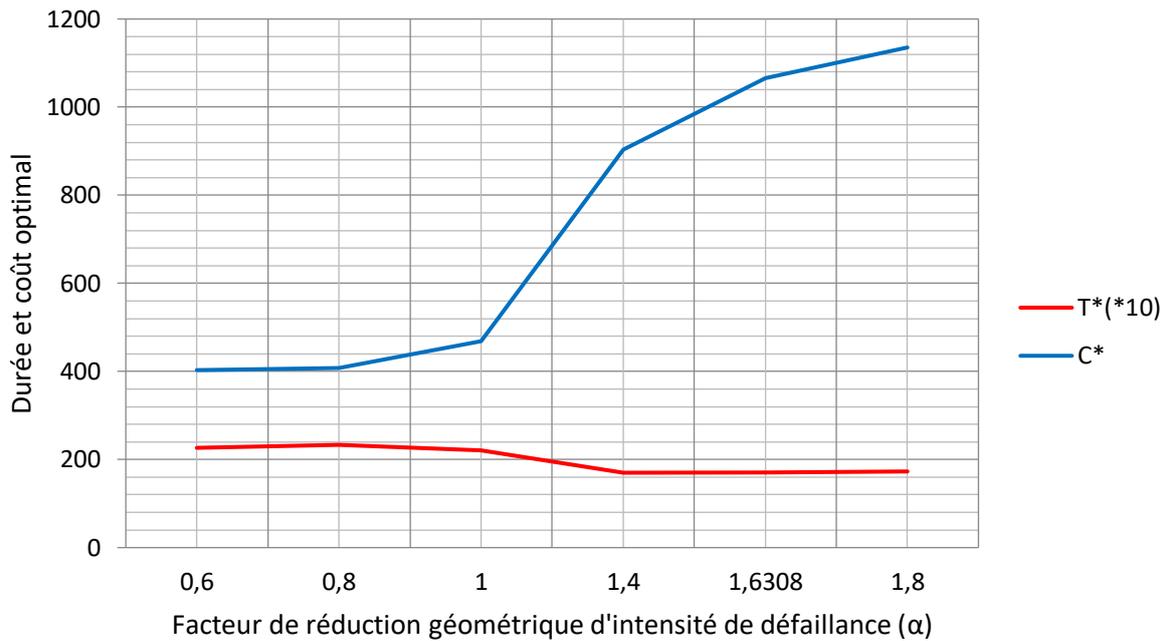


Figure IV.5 - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (α).

• **Discussion**

Nous remarquons que la durée optimale T^* diminue par contre le coût optimal C^* augmente contrairement aux résultats du facteur (δ). Nous tenons compte que si le facteur (α) prend des valeurs inférieures à 1, l'intensité de d' défaillance sera faible ce qui implique une bonne efficacité de maintenance et le prolongement des durées des intervalles de révision partielles. Par contre s'il prend des valeurs supérieures à 1 donc l'intensité de défaillance sera importante cela implique une médiocre efficacité de maintenance ainsi que la diminution des durées de ces intervalles.

IV.4.4. Comportement du temps optimum en fonction du rapport (C_p/C_c)

Etudions le temps et le coût optimum en fonction du rapport. Dans le **Tableau IV.4** nous varions le rapport du coût préventif sur le coût correctif (C_p/C_c) de 0.05 à 1 et nous fixons les paramètres δ , α , η et β .

Tableau IV.4 - Valeurs de K^* , T^* et C^* en fonction du rapport (C_p/C_c).

| C_p/C_c | 0,05 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| K^* | 9 | 10 | 11 | 12 | 12 | 12 |
| T^* | 12,7112 | 17,0536 | 17,4415 | 15,976 | 17,9244 | 19,5979 |
| C^* | 1573,4173 | 1065,2684 | 955,5805 | 904,9927 | 860,0985 | 786,6548 |

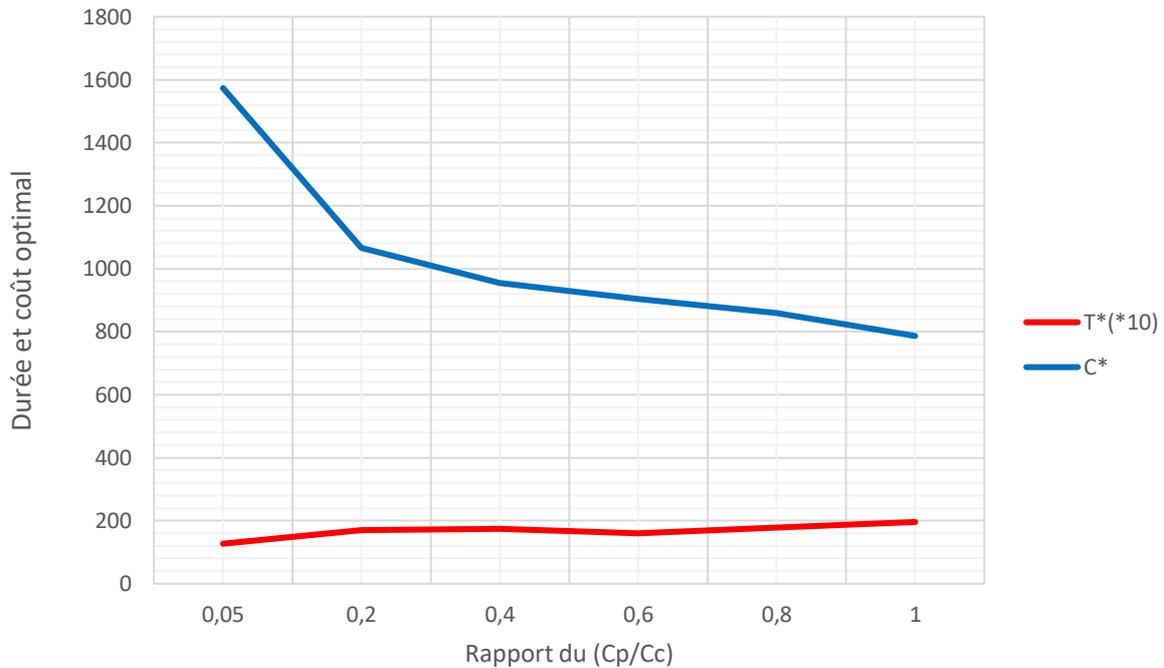


Figure IV.6 - Courbes de la durée et le coût optimales en fonction de (C_p/C_c) .

- **Discussion**

Nous remarquons que la durée optimale T^* augmente avec l'augmentation du rapport (C_p/C_c) , par contre le coût optimal C^* diminue. Ce qui explique qu'à chaque fois que ce rapport s'approche de 1 le coût du préventif s'approche de celui du correctif donc dans ce cas nous pencherons plus à la maintenance corrective, ce qui permet de prolonger l'instant de la prochaine maintenance. Par contre si le rapport (C_p/C_c) s'approche de 0 donc le coût du préventif est plus petit que celui du correctif C_c ; par conséquent dans ce cas nous privilégierons la maintenance préventive.

IV.4.5. Corrélation entre η et β et son influence sur le temps optimum

Etudions à présent la corrélation entre η et β et son influence sur les trois paramètres K^* , T^* et C^* . Dans la **Tableau IV.5** nous varions les paramètres η et β et nous fixons les coûts (C_p) , (C_c) , ainsi que les autres paramètres δ , α .

| $\beta \backslash \eta$ | | 120 | 200 | 300 | 400 | 800 | 1000 | |
|-------------------------|-------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-------|
| | | K^* | T^* | C^* | K^* | T^* | C^* | K^* |
| 1,5 | K^* | 4 | 10 | 12 | 13 | 2 | 6 | |
| | T^* | 313,0451 | 50,0756 | 37,0301 | 34,7887 | 9528,6708 | 1095,3751 | |
| | C^* | 246,9324 | 653,0133 | 749,3895 | 742,951 | 16,0843 | 47,9299 | |
| 2 | K^* | 10 | 12 | 13 | 13 | 2 | 6 | |
| | T^* | 19,4001 | 18,0641 | 20,3707 | 27,157 | 3595,9666 | 563,321 | |
| | C^* | 1123,7136 | 1024,124 | 845,9843 | 634,4882 | 28,0903 | 62,1587 | |
| 2,5 | K^* | 10 | 12 | 12 | 14 | 16 | 17 | |
| | T^* | 17,0536 | 17,1579 | 25,7283 | 21,0672 | 26,2087 | 25,9458 | |
| | C^* | 1065,2604 | 898,5111 | 599,0075 | 638,5623 | 457,064 | 438,319 | |
| 3 | K^* | 11 | 12 | 13 | 14 | 17 | 18 | |
| | T^* | 13,061 | 17,4681 | 20,9916 | 22,578 | 24,1799 | 24,6738 | |
| | C^* | 1148,4521 | 796,7129 | 615,6304 | 536,2361 | 423,3866 | 395,1546 | |
| 3,5 | K^* | 11 | 13 | 14 | 15 | 18 | 18 | |
| | T^* | 13,2476 | 14,771 | 18,2352 | 20,0773 | 23,035 | 28,7932 | |
| | C^* | 1056,8004 | 816,5619 | 619,7431 | 529,9506 | 395,0534 | 316,0427 | |

Tableau IV.5 - Corrélation entre η et β et son influence sur K^* , T^* et C^* .

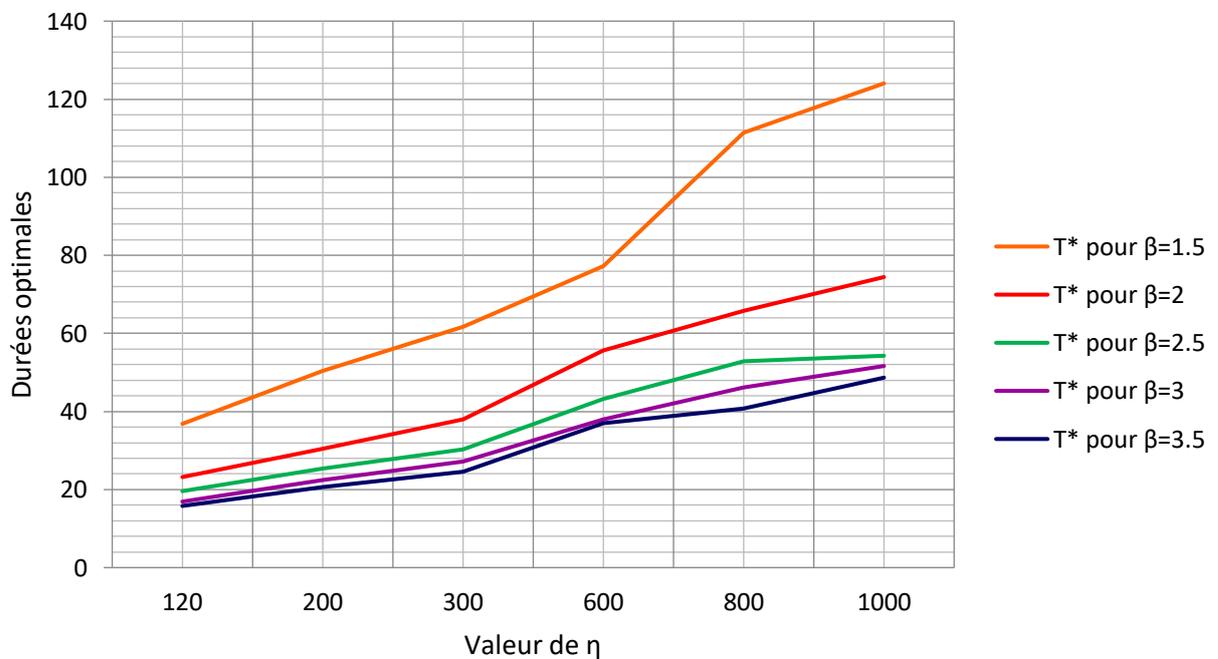


Figure IV.7 - Courbes des durées optimales en fonction de la corrélation entre η et β .

- **Discussion**

Nous remarquons (**figure IV.7**) que la durée optimale T^* augmente à chaque fois que nous augmentons les valeurs de η et elle diminue avec l'augmentation de β .

Ceci semble logique puisque η est la durée de vie caractéristique, elle représente le temps au bout duquel la probabilité de défaillance vaut 63.2%. Plus η augmente plus le système est plus fiable, donc nous pouvons prolonger les intervalles de maintenance préventive. D'un autre côté β représente la vitesse de dégradation du système, c'est-à-dire plus β est grand plus le système se dégrade rapidement. Par conséquent, il serait judicieux de réduire les intervalles de maintenance.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi une application numérique pour étudier la sensibilité du coût ainsi que la durée optimale des intervalles T^* aux facteurs ρ , α et δ , le rapport (C_p/C_c) et la corrélation entre η et β et son influence sur le modèle.

Nous avons constaté que l'augmentation des facteurs ρ et δ implique une bonne efficacité de maintenance, par conséquent un prolongement de la durée de vie du système. La diminution du facteur α donne aussi une bonne efficacité de maintenance. Le rapport (C_p/C_c) influe directement sur les durées des intervalles de révision partielle en augmentant à chaque fois que le rapport augmente. Enfin la corrélation entre η et β influe sur les valeurs optimales, le temps optimum augmente à chaque fois η augmente et β diminue et vice versa.

Conclusion générale

La maintenance a pour objet d'assurer la continuité du bon fonctionnement des systèmes, dans les meilleures conditions de qualité, de délai et de prix de revient.

Dans ce travail nous avons défini les notions de maintenance et de fiabilité, puis nous avons présenté les principaux processus stochastiques utilisés en maintenance ainsi que les différentes politiques de maintenance. Puis nous avons montré l'importance de l'efficacité de la maintenance sur les systèmes réparables.

L'objectif principal de ce travail est l'intégration du modèle d'efficacité hybride dans une politique de maintenance préventive pour un système réparable, permettant de définir les instants des révisions partielles optimales afin de minimiser le coût total. Nous avons choisi un modèle d'efficacité hybride, après le choix de la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance.

Pour l'optimisation du coût total par unité de temps de la maintenance, nous avons structuré, après le calcul d'intégrales et simplifications, une expression du coût à optimiser afin de déterminer les paramètres de décisions K^* et T^* .

Dans le dernier chapitre nous avons établi une application numérique pour étudier la sensibilité du modèle développé aux facteurs ρ , α et δ , ainsi que le rapport (C_p/C_c) et la corrélation entre η et β . Nous avons déduit que l'augmentation des facteurs ρ et δ implique une prolongation de la durée de vie du système, la diminution du facteur α donne une bonne efficacité de maintenance. Le rapport (C_p/C_c) influe directement sur les durées des intervalles de révision partielle. Enfin la corrélation entre η et β influe sur les valeurs optimales, le temps optimum augmente à chaque fois η augmente et β diminue et vice versa.

Références bibliographiques

- [1] : H. Procaccia, E. Fertou, M. Procaccia, « Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables », Tec & Doc Lavoisier, 2011.
- [2] : L. Doyen, O. Gaudoin, « Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables » - Synthèse bibliographique, INGP 2005.
- [3] : R. Laggoune, « Les couts de maintenance », département de génie mécanique, Université de Bejaia 2007/2008.
- [4] : AFNOR (NF-X 60-010) : Association française de normalisation 1994.
- [5] : R. Laggoune, « introduction à la maintenance », cours de maintenance industrielle Université de Bejaia 2006/2007.
- [6] : P. Alain, G. Michel, « Fiabilité des systèmes », Edition EYROLLES 1980.
- [7] : E. Ait Mokhtar, « Modèle de maintenance », cours de maintenance industrielle Université de Bejaia 2021/2022.
- [8] : Zhou, X., Xi, L., & Lee, J. (2007). « Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation ». *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4), 530–534.
- [9] : E. Ait Mokhtar, R. Laggoune, A. Chateaufneuf, « Modélisation hybride de l'efficacité de la maintenance des systèmes complexes réparables », 11^{ème} journées, Fiabilité des matériaux et des structures – Clermont – Ferrand, 5-7 juillet 2022.
- [10] : Y. Dijoux, « Modèles d'âge virtuel et de risques concurrents pour la maintenance imparfaite », Institut polytechnique de Grenoble, thèse doctorale, Octobre 2008.
- [11] : T. Nakagawa, « Maintenance Theory of Reliability », Springer-Verlag London Limited, 2005.

Résumé

Résumé

Aujourd'hui, les entreprises doivent répondre à plusieurs exigences, en termes de qualité et de quantité, sur les produits et services assurés avec un coût minimal. Afin de satisfaire ces exigences, nous admettons une optimisation de la maintenance avec une politique de la maintenance adéquate.

L'objectif de ce mémoire est de maintenir une optimisation des révisions partielles des systèmes réparables en intégrant un modèle d'efficacité hybride avec la politique de maintenance préventive périodique imparfaite avec réparation minimal. Nous avons déduit que l'augmentation des facteurs ρ et δ implique la durée de vie du système est prolongé, la diminution du facteur α donne une bonne efficacité de maintenance. Le rapport (C_p/C_c) influe directement sur les durées des intervalles de révision partielle. Enfin la corrélation entre η et β influe sur les valeurs optimales, le temps optimum augmente à chaque fois η augmente et β diminue et vice versa.

Mots clés

Optimisation de la maintenance, politique de la maintenance, coût minimal, révisions partielles, systèmes réparables, modèle d'efficacité hybride, maintenance préventive, imparfaite, durée de vie, efficacité de maintenance, temps optimum.

Abstract

Today, companies have to meet several requirements, in terms of quality and quantity, on the products and services provided with a minimum cost. In order to satisfy these requirements, we admit an optimization of the maintenance with an adequate maintenance policy.

The objective of this dissertation is to maintain an optimization of partial revisions of repairable systems by integrating a hybrid efficiency model with the imperfect periodic preventive maintenance policy with minimal repair. We deduced that increasing the factors ρ and δ implies the system lifetime is prolonged, decreasing the factor α gives a good maintenance efficiency. The report (C_p/C_c) directly affects the durations of partial overhaul intervals. Finally the correlation between η and β influences the optimum values, the optimum time increases every time η increases and β decreases and vice versa.

Résumé

ملخص

اليوم، يتعين على الشركات تلبية العديد من المتطلبات، من حيث الجودة والكمية، على المنتجات والخدمات المقدمة بأقل تكلفة. من أجل تلبية هذه المتطلبات، فإننا نعتزف بتحسين الصيانة من خلال سياسة صيانة مناسبة.

الهدف من هذه الرسالة هو الحفاظ على تحسين المراجعات الجزئية للأنظمة القابلة للإصلاح من خلال دمج نموذج الكفاءة الهجين مع سياسة الصيانة الوقائية الدورية غير الكاملة مع الحد الأدنى من الإصلاح. استنتجنا أن زيادة العوامل p وتعني إطالة عمر النظام، وتقليل العامل α يعطي كفاءة صيانة جيدة. يؤثر التقرير (Cp / Cc) بشكل مباشر على فترات فترات الإصلاح الجزئي. أخيراً، يؤثر الارتباط بين η وعلى القيم المثلى، ويزداد الوقت الأمثل في كل مرة η يزيد والعكس صحيح.