

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

Université des Frères Mentouri Constantine 1

Faculté des Sciences de la Technologie

Département Génie des transports



N° de série : 68/D3C/2022

N° d'ordre : 03/TR/2022

Thèse

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Hygiène et Sécurité Industrielle

**Modélisation et optimisation de la maintenance préventive des
équipements de production pétroliers en Algérie**

Soutenue le, 19 / 07 / 2022

Présentée par : **LALA Houssam**

Devant le Jury

Président :	KHOLAI Omar	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine -1-
Rapporteur :	BELLAOUAR Ahmed	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine -1-
Co-Rapporteur :	ZELLAGUI Redouane	MCB	Université des Frères Mentouri Constantine-1-
Examineur :	BOUYAYA Linda	MCA	Université des Frères Mentouri Constantine -1-
Examineur :	BENCHOUIA Nedjem -Eddine	Professeur	Université Mohammed-chérif messaadia, Souk ahras
Examineur :	MOUDA Mohammed	MCA	Université de Batna-2- Fesdis

REMERCIEMENT

*Louange à Dieu puissant qui m'a aidé et m'avoir donné le courage
et la volonté de mener à bien ce travail.*

*J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse
monsieur BELLAOUAR Ahmed professeur à l'université des Frères
Mentouri-Constantine-1 pour son aide, sa disponibilité et surtout pour
son intérêt, sa supervision éclairée qui a contribué à alimenter ma
réflexion tout au long de la rédaction de ma thèse.*

*Je remercie ainsi mon Co-encadreur monsieur ZELLAGUI Redouane
maitre de conférence à l'université des Frères Mentouri-Constantine-
1 pour son aide précieux et la valeur qu'il a ajoutée à ma thèse*

*Je remercie aussi le docteur BACHA Sidali pour sa collaboration
précieuse*

*Je tiens particulièrement à remercier Mr KHOLAI Omar Professeur à
l'université des Frères Mentouri-Constantine-1 de m'avoir fait
l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*J'exprime mes remerciements aux membres du jury, Mr BENCHOUIA
Nedjem-eddine professeur à l'université Mohammed Cherif Messadia-
Soukahras, Mr MOUDA Mohammed maitre de conférence à
l'université Fesdis-Batna-2, Mme BOUYAYA Linda maitre de
conférence à l'université des Frères Mentouri-Constantine-1.*

Je tiens également à remercier le laboratoire d'ingénierie des transports et environnement (LITE) dans lequel j'ai effectué ma thèse de doctorat. Je remercie aussi le directeur de laboratoire monsieur KHOLAI Omar et monsieur le responsable SEKFALI Younes pour leur aide.

Je réserve une pensée spéciale à tous les enseignants de poste graduation.

Je ne pourrais finir ces remerciements sans penser aux ingénieurs de la société SONATRACH pour leur aide.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour

À ma mère,

Mon père

Mon frère Mountassir

Toute ma famille

Merci d'être toujours là pour moi.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé.

LALA Houssam

Table des matières

Introduction générale.....	1
Modélisation de la fiabilité des systèmes	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Fiabilité et sûreté de fonctionnement	4
I.3. Grandeurs caractéristiques de la fiabilité	5
I.3.1. Fonction de répartition, Densité de probabilité.....	5
I.3.2. Taux de défaillance instantané.....	7
I.4. Approches d'évaluation de la fiabilité des systèmes	7
I.5. Processus de réparation.....	8
I.5.1. Processus de renouvellement (PR).....	8
I.5.1.1. Loi exponentielle	9
I.5.1.2. Loi de weibull	10
I.5.1.3. Loi de weibull mélangée	11
I.5.1.3.1. Estimation du coefficient de partage w	12
I.5.1.4. Autres lois usuelles	13
I.5.1.4.1. La loi Gamma	13
I.5.1.4.2. Loi Log-normale	14
I.5.1.5. Modèle du risque proportionnel de Cox (PHM)	14
I.5.1.5.1. Présentation des facteurs d'influence.....	15
I.5.1.5.2. Choix des facteurs d'influence.....	16
I.5.1.5.3. Modèle mathématique de Cox	16
I.5.1.5.3.1. Fonction d'influence $g(Z)$	16
I.5.2. Processus de poisson non homogène (NHPP)	17
I.5.2.1. Modèle mathématique du processus de poisson non homogène (NHPP).....	18
I.5.2.2. Loi de puissance.....	19
I.5.2.3. Loi log linéaire	20

I.5.2.4. Modèle d'intensité proportionnel (PIM).....	22
I.5.2.4.1. Estimation des paramètres du modèle d'intensité proportionnel (PIM) par l'approche du maximum de vraisemblance (MLE).....	23
I.5.3. Processus de réparation imparfaite	24
I.5.3.1. Modèle de Kijima I et II.....	24
I.5.3.2. Modèle de réduction d'intensité (IRM)	25
I.5.3.3. Modèle d'intensité proportionnel généralisé (GPIM)	26
I.5.3.3.1. Estimation des paramètres du GPIM par la méthode du maximum de vraisemblance.....	28
I.5.3.3.2. La qualité d'ajustement des modèles	29
I.6. Conclusion	29
II. Modélisation de la maintenance préventive des systèmes complexes	30
II.1. Introduction	30
II.2. Rappel sur la maintenance	30
II.3. La fonction maintenance	30
II.3.1. Méthodes	31
II.3.2. Ordonnancement.....	31
II.3.3. Réalisation des interventions	32
II.4. Objectifs de la maintenance.....	32
II.5. Types de la maintenance.....	32
II.6. Types de défaillance	35
II.7. La variation du taux de défaillance durant les trois phases de vie des systèmes.....	36
II.8. Influence de la maintenance préventive sur la fiabilité	37
II.9. La maintenance basée sur la fiabilité (MBF).....	40
II.9.1. Optimisation de la maintenance basée la fiabilité (OMF).....	40
II.10. Politiques basées sur la loi de durée de vie	42
II.10.1. Politiques basées sur l'âge du système.....	42

II.10.2. Politiques de remplacement par blocs	44
II.10.3. Politique de remplacement périodique avec réparation minimale.....	45
II.10.4. Politique de remplacement basée sur les modèles imparfaits.....	46
II.11. La politique de maintenance basée sur les conditions (MBC)	46
II.12. Conclusion	48
III. Optimisation de la périodicité de la maintenance préventive des systèmes.....	49
III.1. Introduction	49
III.2. Classification de l'optimisation de la maintenance	49
III.3. L'impact d'une politique de maintenance	50
III.4. Définition des actions de maintenance à prévoir dans le plan	51
III.5. Démarches de simulation de la périodicité de la maintenance préventive (MP)	53
III.5.1. La simulation à une échelle de temps variable.....	53
III.5.2. La simulation à une échelle de temps (horizon) fixe.....	56
III.6. Conclusion.....	58
IV. Application sur un turbocompresseur d'une installation pétrolière	59
IV.1. Introduction	59
IV.2. Description du turbocompresseur	59
IV.2.1. La turbine à gaz MS5002	59
IV.2.1.1. Comparaison entre les modèles des turbines A, B et D	60
IV.2.2. Le compresseur BCL.....	61
IV.3. Choix du système	62
IV.4. Politique de maintenance suivie par l'entreprise	64
IV.5. Modélisation de la fiabilité des turbocompresseurs	64
IV.5.1. Modélisation de la fiabilité du train B.....	65
IV.5.2. Modélisation de la fiabilité du train A	73
IV.5.3. Modélisation de la fiabilité du train D	79

IV.6. Optimisation de la périodicité de la maintenance préventive systématique des turbocompresseurs B, A et D	85
IV.7. Conclusion	91
Conclusion générale	92
Bibliographie	93
Annexes	102
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1 Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement.	4
Figure I.2 Allure de la fonction de fiabilité.....	6
Figure I.3 Modèle de processus de renouvellement [21].	9
Figure I.4 Densités obtenues pour le système huile de graissage-combustion turbine [30]. ...	12
Figure I.5 Forme générale du taux de défaillance d'une loi Log-normale [1].....	14
Figure I.6 Modèle de processus non homogène [21].	18
Figure I.7 Variation des allures des fonctions d'intensité de défaillance de la loi de puissance selon les valeurs de β [21].	20
Figure I.8 Fonction d'intensité de défaillance de la loi log linéaire avec différentes valeurs de paramètre de forme [21].	21
Figure I.9 Exemple d'un processus d'âge virtuel [21].	25
Figure I.10 Modèle de réduction d'intensité (IRM) [21].	26
Figure I.11 La relation entre les modèles des systèmes complexes réparables [57].	27
Figure II.1 Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance [76].	30
Figure II.2 Les différents types de la maintenance [1].	33
Figure II.3 Types de défaillance.	35
Figure II.4 Allure du taux de la défaillance, les causes et les remèdes [85].	36
Figure II.5 La prolongation de la durée de vie d'un matériel par des actions de maintenance.	37
Figure II.6 Effet de la maintenance idéale sur la fiabilité.	38
Figure II.7 Variation de fiabilité après les actions de la maintenance préventive systématique.	38
Figure II.8 Evolution de la fiabilité selon la valeur m et l'effet de la maintenance préventive [85].	40
Figure II.9 Etapes de la méthode d'optimisation basée sur la fiabilité [76].	42
Figure II.10 Schéma d'une politique de maintenance basée sur l'âge [1].	43
Figure II.11 Schéma d'une politique de remplacement par bloc [1].	44
Figure II.12 Logigramme de sélection des unités et des techniques pour la MBC [21].	47
Figure III.1 L'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective [89].	49
Figure III.2 L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF.	51
Figure III.3 Arbre décisionnel de définition des actions de maintenance [104].	52
Figure III.4 Algorithme de simulation des MP à une échelle de temps variable [21].	54
Figure III.5 Algorithme de simulation des MP à horizon fixe [21].	57

Figure IV.1 Les sections principales d'une turbine à gaz MS 5002 [109].	60
Figure IV.2 Codification du compresseur BCL 405/C (Nuovo pignone, SONATRACH).	61
Figure IV.3 Vue général d'un train de compression (Nuovo pignone, SONATRACH).	62
Figure IV.4 Evolution de la fonction d'intensité de la défaillance du NHPP avec la loi log linéaire.	69
Figure IV.5 Evolution de la fonction d'intensité de la défaillance du PIM avec la loi log linéaire.	69
Figure IV.6 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP avec la loi de puissance.	70
Figure IV.7 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM avec la loi de puissance.	70
Figure IV.8 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.	72
Figure IV.9 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.	72
Figure IV.10 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.	73
Figure IV.11 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.	77
Figure IV.12 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.	78
Figure IV.13 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.	78
Figure IV.14 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.	84
Figure IV.15 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.	84
Figure IV.16 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.	85
Figure IV.17 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train A.	88
Figure IV.18 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train B.	89
Figure IV.19 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train D.	89
Figure IV.20 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour les trois turbocompresseurs A, B et D.	90

Liste des tableaux

Tableau IV.1 La différence entre les turbines A, B et D.....	61
Tableau IV.2 Etude du danger du système étudié.....	63
Tableau IV.3 L'intervalle de maintenance.....	64
Tableau IV.4 Historique des pannes et des covariables du système étudié (turbocompresseur MS5002B).....	65
Tableau IV.5 Estimation des paramètres des modèles.....	68
Tableau IV.6 Estimation des paramètres des modèles.....	71
Tableau IV.7 Historique des pannes turbocompresseur MS 5002A avec ses covariables.....	74
Tableau IV.8 Estimation des paramètres des modèles.....	77
Tableau IV.9 Historique des pannes du turbocompresseur D avec ses covariables.....	79
Tableau IV.10 Estimation des paramètres des modèles.....	83
Tableau IV.11 Coûts moyens d'une action de maintenance.....	86
Tableau IV.12 Nombre moyen des barils perdus sur une échelle de 10 ans pour les différents intervalles de MP.....	86
Tableau IV.13 Coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans selon les intervalles de MP pour les trois Train A, B et D.....	87
Tableau IV.14 Différence entre les coûts moyens réels et simulés.....	91

Liste des abréviations

SdF : Sûreté de fonctionnement.

R(t) : Fonction de fiabilité.

F(t) : Fonction de répartition de la défaillance.

f(t) : Densité de probabilité de défaillance.

MTBF : La moyenne de temps de bon fonctionnement.

$\lambda(t)$: Taux de défaillance.

SCR : Systèmes complexes réparables.

PR : Processus de renouvellement.

NHPP : Non-Homogeneous Poisson Process (processus de poisson non homogène).

PHM : Proportional Hazard Model (modèle du risque proportionnel).

g(Z) : Fonction d'influence.

M'(t) : La fonction d'intensité cumulative de la défaillance.

PIM : Modèle d'intensité proportionnelle.

MLE : Maximum Likelihood Estimation (approche du maximum de vraisemblance).

MP : Maintenance préventive.

MC : Maintenance corrective.

IRM : Intensity Reduction Model (modèle de réduction d'intensité).

GPIM : Generalized Proportional Intensity Model (modèle d'intensité proportionnelle).

LR : Likelihood Ratio (rapport de vraisemblance).

R_m(t) : Fiabilité du système maintenu.

MTTF : Mean Time To Failure.

MBF : Maintenance basée sur la fiabilité.

OMF : Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité.

REX : Le retour d'expérience.

MBC : Maintenance basée sur les conditions.

J(T) : La fonction du coût moyen.

H(T) : Fonction cumulative du taux de défaillance.

TCF : Turbo-Compression-Facilities (unité de compression).

SONATRACH : Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures.

TBF : Temps de bon fonctionnement.

TTR : Temps technique de réparation.

Introduction générale

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir ou à rétablir une entité dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Les deux grands aspects de la maintenance sont « rétablir » et « maintenir ». Pour le premier, la maintenance est corrective et vise à limiter les conséquences d'une panne, tandis que pour le deuxième aspect, la notion de prévention est sous-entendue sur une entité supposée encore en fonctionnement [1]. Le secteur industriel de production en continue constitue le domaine le plus intéressé des actions de maintenance notamment pour les équipements pétroliers de production considérés comme des systèmes complexes réparables (SCR). Ces derniers sont, généralement, soumis à une routine de maintenance préventive (MP) dont l'objectif est d'améliorer leur performance en réduisant la fréquence d'occurrence des défaillances critiques pouvant atteindre à l'image de marque de l'entreprise. Etant donné que le processus de défaillance des systèmes complexes réparables dépend de plusieurs variables de condition ayant une influence directe et indirecte sur la performance du système, la gestion de la maintenance préventive (MP) basée sur la fiabilité constitue le choix préférable pour la plupart des entreprises. Ce type de gestion considère toute politique de maintenance basée sur des stratégies et des modèles mathématiques visant à atteindre les objectifs de la maintenance tout en proposant un équilibre optimal entre les actions de maintenance préventive et corrective. Ces stratégies s'expriment traditionnellement par une politique de remplacement par block ou remplacement basée sur l'âge suivant un processus de renouvellement en supposant que la réparation est parfaite et le système est restauré comme neuf immédiatement après l'achèvement de l'action de maintenance. Cette hypothèse permet de traiter facilement le problème par la théorie du renouvellement (i .e. as-good-as-new) [2], [3]. Cependant, pour un système qui constitue un nombre important des composants, le processus de renouvellement ne représente pas le modèle de maintenance approprié dans le cas où l'intervention sur un composant n'améliore pas forcément la fiabilité globale du système. Dans ce cas, la politique de remplacement périodique basée sur la réparation minimale (processus de Poisson non homogène NHPP) constitue la solution optimale pour modéliser toutes les interventions sur le système dans toute sa durée de vie.

Toutes les stratégies de maintenances décrites jusqu'ici permettent de modéliser le processus de réparation du système en négligeant de faire introduire les facteurs d'influence sur le bon fonctionnement du système. Afin de répondre à ce problème, les modèles de maintenance

peuvent se référer aux modèles d'intensité proportionnelle généralisée (GPIM) permettant de mettre en évidence l'influence des covariables sur le bon fonctionnement du système et de décrire le processus de la réparation imparfaite. Le GPIM permet d'établir un modèle de fiabilité consistant pour pouvoir s'engager efficacement dans une approche d'optimisation de la maintenance préventive.

Les résultats pour ce type d'approche d'optimisation de la maintenance préventive se divisent en deux parties :

- La première représente les valeurs des paramètres des modèles fiabilistes obtenues par l'approche du maximum de vraisemblance ;
- La deuxième partie, qui utilise les résultats du modèle fiabiliste, représente les résultats du critère optimisé en fonction de la meilleure périodicité de la maintenance préventive. Ces résultats nécessitent de procéder avec un algorithme de simulation en programmant sur MATLAB.

Notre thèse est structurée en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale :

Dans le premier chapitre, les notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement et les principales lois de fiabilité ont été discutées. Une description détaillée sur les processus de réparation, l'approche d'estimation des paramètres des modèles et le test de vraisemblance a été aussi considérée.

Dans le deuxième chapitre, un rappel sur la maintenance, ses fonctions et ses différents types a été présenté. Les politiques de maintenance basées sur les lois de fiabilité ont été aussi abordées pour comprendre les spécifications et les considérations qui doivent se prendre pour chaque politique de maintenance.

Dans le troisième chapitre, sont discutées en premier lieu les objectifs et les critères d'optimisation. Ensuite, les méthodes de simulation à une échelle de temps fixe et variable avec la description du processus de simulation de la maintenance préventive ont été considérées. A la fin du chapitre, les algorithmes d'optimisation ont été présentés sous forme des logigrammes.

Le quatrième chapitre est consacré à une application de l'approche d'optimisation basée sur les modèles de fiabilité (NHPP, PIM et GPIM) sur un historique des pannes de trois turbocompresseurs. Dans cette partie, la température, la programmation des actions de maintenance, le temps entre les défaillances ainsi que l'effet des actions de maintenance

préventive et corrective ont été considérés comme des facteurs d'influence sur le fonctionnement du système. En comparant les trois turbocompresseurs, l'interprétation de l'effet de ces facteurs a été donnée en se référant aux valeurs des paramètres des modèles de fiabilité données par l'approche du maximum de vraisemblance. Sur la base de ces résultats et de l'application de l'algorithme de simulation de la maintenance préventive à horizon fixe, une périodicité a été proposée pour chaque turbocompresseur en fonction d'un critère économique. A la fin du chapitre, la comparaison faite entre les coûts réels et simulés a permis de montrer le gain pouvant apporter le suivi des périodicités proposées.

Modélisation de la fiabilité des systèmes

I.1. Introduction

Dans ce chapitre on a présenté en premier lieu la définition des composantes de la sûreté de fonctionnement. Ensuite, on a détaillé sur les trois principaux processus de réparation représentant le processus de renouvellement (PR), le processus non homogène de Poisson (NHPP) et le processus de réparation imparfaite (IR) dans lesquelles les lois de probabilité de la défaillance et les grandeurs de la fiabilité représentent des spécifications différentes. Finalement, l'approche d'estimation des paramètres des modèles basées sur la méthode du maximum de vraisemblance ainsi que le rapport de vraisemblance ont été discutés.

I.2. Fiabilité et sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) représente au sens large la science des défaillances [4]. Elle vise à mettre en place des systèmes dans lesquels les défaillances sont prévues et tolérables. Laprie [5] a défini la sûreté de fonctionnement d'un système comme la propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans le service qu'il délivre [1]. Derrière ce concept, la notion de confiance est fondamentale. En effet, la SdF s'appuie généralement sur quatre concepts majeurs : la sécurité, la disponibilité, la Fiabilité et enfin la maintenabilité [1], [6]. La définition de ces concepts s'avère nécessaire pour replacer la fiabilité dans son contexte.

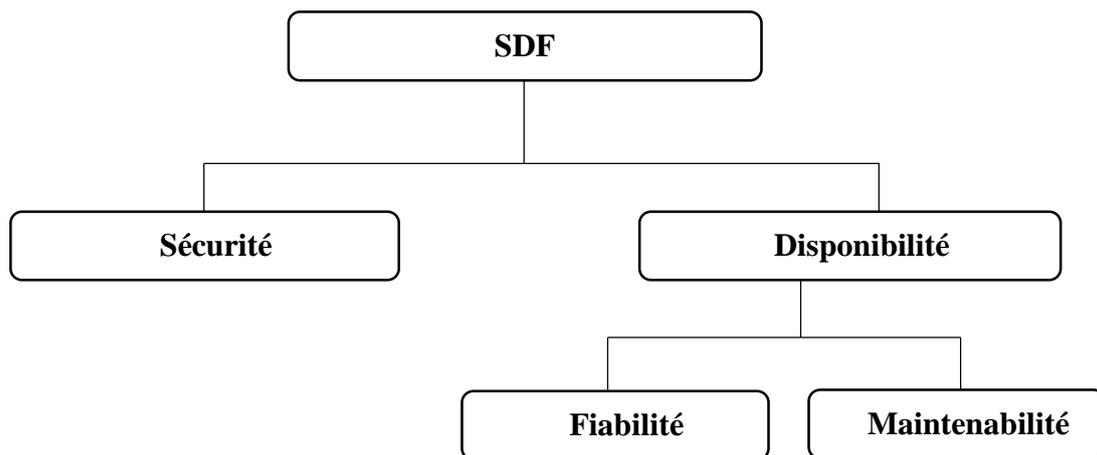


Figure 0.1 Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement.

La fiabilité (Reliability en anglais) est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Mathématiquement, la fiabilité se caractérise par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0, t]$, sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0 [7].

$$R(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]]$$

La maintenabilité (Maintainability en anglais) d'une entité est définie comme son aptitude à se maintenir ou se rétablir, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et moyens prescrits [8].

La disponibilité (Availability en anglais) d'une entité est définie comme son aptitude à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné, en supposant que la fourniture de moyens extérieurs nécessaires soit assurée [8], [9].

La sécurité (Safety en anglais) est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité $S(t)$ que l'entité E ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [7].

I.3. Grandeurs caractéristiques de la fiabilité

En s'intéressant par la fiabilité, cette composante de la SdF doit s'évaluer sur la base de plusieurs grandeurs.

I.3.1. Fonction de répartition, Densité de probabilité

Considérons « t » le temps écoulé entre la mise en service d'une entité et la première défaillance observée, la probabilité de défaillance s'exprime en fonction de la variable aléatoire T. La fiabilité $R(t)$ à l'instant t est la probabilité qu'une entité E soit non défaillante sur la durée $[0, t]$ et s'exprime comme suit [7]:

$$R(t) = P(T > t)$$

I-1

La figure I.2 présente l'allure de la fonction $R(t)$ en fonction du temps.

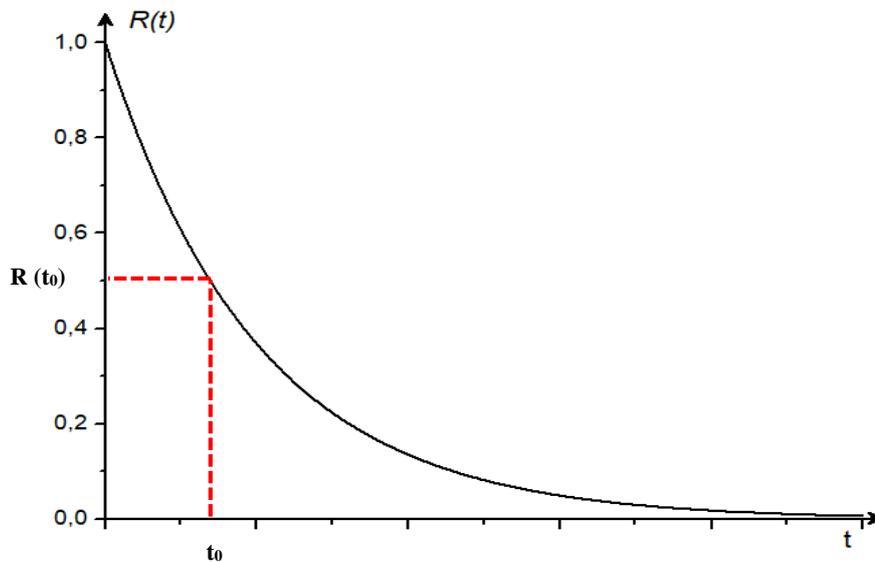


Figure 0.2 Allure de la fonction de fiabilité.

La probabilité complémentaire à 1 de cette fonction aboutit à l'expression de la fonction de répartition de la défaillance $F(t)$.

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

La dérivée de la fonction de répartition de la défaillance par rapport au temps représente la densité de probabilité de défaillance qui reflète la vitesse de mortalité de l'entité. Cette fonction de densité de probabilité de défaillance notée $f(t)$ et peut s'écrire comme suit :

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

Où

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad \text{I-4}$$

La densité de probabilité de défaillance permet aussi d'exprimer la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF) par la formule suivante :

$$MTBF = E(T) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt \quad \text{I-5}$$

I.3.2. Taux de défaillance instantané

Cette grandeur s'exprime en fonction de la probabilité conditionnelle et représente la probabilité pour qu'un dispositif en état de marche à l'instant t , tombe en panne entre l'instant t et $t+\Delta t$ [10]–[12] :

$$\lambda(t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad \text{I-6}$$

On divise par Δt :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} \quad \text{I-7}$$

$$\lambda(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} \quad \text{I-8}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{I-9}$$

I.4. Approches d'évaluation de la fiabilité des systèmes

Trois méthodes principales peuvent être utilisées pour évaluer la fiabilité des systèmes, à savoir [1], [13]:

- Une première démarche employée par les industriels est d'utiliser des bases de données génériques de fiabilité. Celles-ci proposent des modèles empiriques permettant de calculer le taux de défaillance basique d'une entité donnée. Ce taux de défaillance devra ensuite être ajusté en fonction des paramètres d'utilisation.
- Une toute autre démarche consiste à réaliser des essais sur des entités données pour évaluer leur fiabilité. Ces essais ont pour objectif de mettre l'entité dans des conditions proches de la réalité pour vérifier son fonctionnement. Dans l'industrie pétrolière, un grand nombre de composants possèdent une durée de vie importante. Les essais sur des composants de ce type sont particulièrement longs. Il n'est, dès lors, pas envisageable pour des contraintes de temps et d'argent de réaliser de tels essais. Dans ce contexte, les industriels privilégient des essais dits accélérés. Ces essais consistent à réduire significativement la durée de vie d'une entité par l'accélération des dégradations provoquant la défaillance. Pour retrouver la loi de fiabilité en conditions normales à partir des résultats d'essais accélérés, des modèles spécifiques sont

employés [14]. La complexité des essais, qu'ils soient standards ou accélérés, est de reproduire fidèlement les contraintes réelles rencontrées par ces entités.

- Enfin, une autre méthode consiste à évaluer la fiabilité d'une entité à partir des données issues du retour d'expérience. Pour notre cas, celle-ci s'appuie principalement sur l'historique de maintenance des turbocompresseurs. Cette méthode a pour avantage de se focaliser sur la fiabilité telle qu'elle est réellement observée par les utilisateurs. Hormis la question du coût, le principal inconvénient est d'attendre plusieurs années avant d'avoir suffisamment de données exploitables. A noter que l'évaluation de la fiabilité à partir du retour d'expérience est la méthode que nous allons privilégier dans cette thèse.

I.5. Processus de réparation

Une structure constituant un ou plusieurs composants dont les fonctions peuvent être restaurée, après défaillance ou dégradation, sans qu'il soit nécessaire de procéder à un remplacement complet peut se donner comme une définition des systèmes complexes réparables (SCR) [15]. Généralement, modéliser la fiabilité des systèmes se base sur l'un des processus suivants : processus de renouvellement (PR), processus de poisson non homogène (NHPP) et le processus de réparation imparfaite [16].

I.5.1. Processus de renouvellement (PR)

Le premier processus consiste à considérer les réparations comme maximales en rendant le système à son état initial après chaque intervention [17]–[20]. Ce processus est approprié pour une politique de remplacement complet. Cependant, si les temps entre les défaillances ne sont pas stationnaires, le PR ne constitue pas le modèle approprié.

La formule du taux de défaillance pour ce type de processus s'exprime comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - t_{N(t)}) \quad \text{I-10}$$

Avec $t - t_{N(t)}$ représente la différence de temps entre la dernière défaillance et sa précédente.

La Figure I.3 montre l'évolution du taux de défaillance pour ce type de processus.

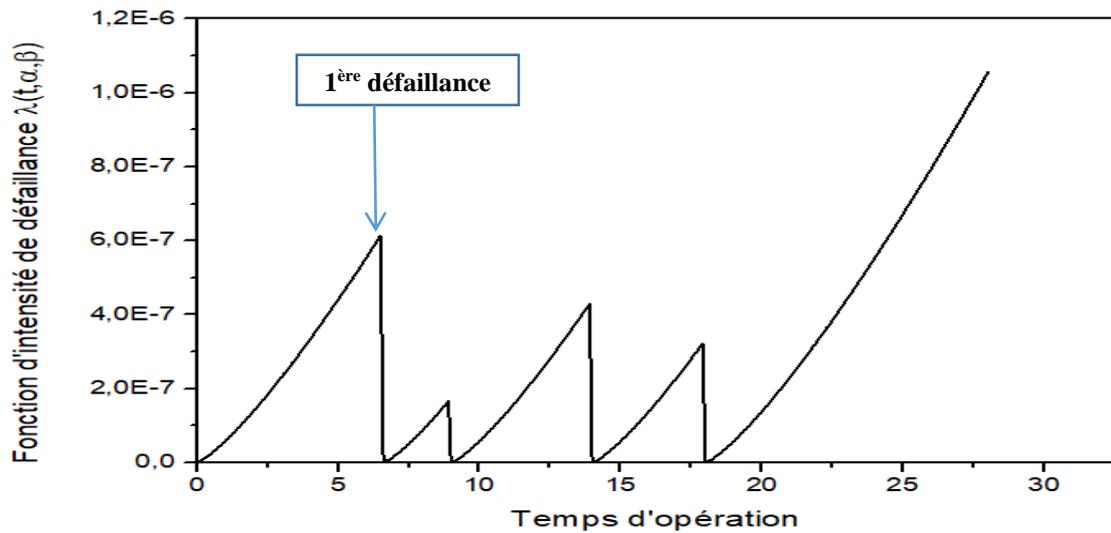


Figure I.3 Modèle de processus de renouvellement [21].

Ce processus englobe un ensemble des lois de probabilité de défaillance dont les plus utilisées sont décrites ci-dessous.

I.5.1.1. Loi exponentielle

C'est la loi la plus simple dans le domaine de la fiabilité et se caractérise par son taux de défaillance constant $\lambda(t) = \lambda$. La loi exponentielle permet, en particulier, de décrire les durées de vie ayant des pannes brutales [22].

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ s'écrit :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{I-11}$$

La fonction de fiabilité

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{I-12}$$

Le taux de défaillance est constant dans le temps

$$\lambda(t) = \lambda \quad \text{I-13}$$

Et

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad \text{I-14}$$

1.5.1.2. Loi de weibull

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (mécanique, électronique,..). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η et γ . La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression [22]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)} \quad t \geq \gamma \quad \text{I-15}$$

Où :

β est le paramètre de forme ($\beta > 0$) ;

η est le paramètre d'échelle ($\eta > 0$) ;

γ est le paramètre de position ($\gamma \geq 0$).

La fonction fiabilité s'écrit :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad \text{I-16}$$

Et la fonction répartition s'écrit :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad \text{I-17}$$

Le taux de défaillance est donnée par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad \text{I-18}$$

Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est soit décroissant ($\beta < 1$, période de jeunesse) soit constant ($\beta = 1$, période de vie utile), soit croissant ($\beta > 1$, période de vieillissement). La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un système.

1.5.1.3. Loi de weibull mélangée

Le modèle de mélange de lois de probabilité consiste à supposer que les données proviennent d'une source contenant plusieurs sous-populations. Chaque sous population est modélisée de manière séparée par une loi de probabilité. La population totale est donc un mélange de ces populations [23].

La composition de la distribution comme un mélange peut souvent être exploitée pour identifier une structure cachée dans le jeu de données, c'est-à-dire de déterminer des sous-populations intéressantes du point de vue de l'interprétation du jeu de données.

Le modèle de Weibull mélangé est une méthode de combinaison de deux ou plusieurs distributions de Weibull de paramètres différents (ex : machine composée de deux sous-systèmes). En plus de la distribution de Weibull simple, caractérisé par les paramètres de forme (β), d'échelle (η) et de position (γ), un paramètre de mélange ou de proportion (W_i) est ajouté pour représenter l'impact et le poids de chaque sous-système i sur le comportement global et sur l'ensemble des défaillances de l'entité [24]–[29].

La densité mélange de probabilité de défaillance est donnée par :

$$f(t) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot f_j(t) \quad \text{I-19}$$

$$\text{Avec} \quad 0 < w_j < 1 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad \text{I-20}$$

Pour un mélange de deux distributions Weibull on aura :

$$f(t) = w f_1(t) + (1 - w) f_2(t) \quad \text{I-21}$$

Avec une fonction de répartition de mélange donnée par :

$$F(t) = w F_1(t) + (1 - w) F_2(t) \quad \text{I-22}$$

$$\text{Et} \quad F_j(t) = 1 - R_j(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma_j}{\eta_j}\right)^{\beta_j}} \quad \text{I-23}$$

Le taux de défaillance par la loi de weibull mélangée se donne par :

$$h(t) = \sum_{j=1}^n w_j(t) \cdot h_j(t) \quad \text{I-24}$$

$$\text{Avec} \quad w_j(t) = \frac{w_j \cdot R_j(t)}{\sum_{j=1}^n w_j \cdot R_j(t)} \quad \text{I-25}$$

Ce qui nous donne :

$$h(t) = \frac{w \cdot R_1(t)}{w \cdot R_1(t) + (1-w)R_2(t)} h_1(t) + \frac{(1-w) \cdot R_2(t)}{w \cdot R_1(t) + (1-w)R_2(t)} h_2(t) \quad \text{I-26}$$

Ci-dessous un exemple réel d'un jeu de donnée comportant deux sous-systèmes différents : système huile de graissage et section de combustion-turbine.

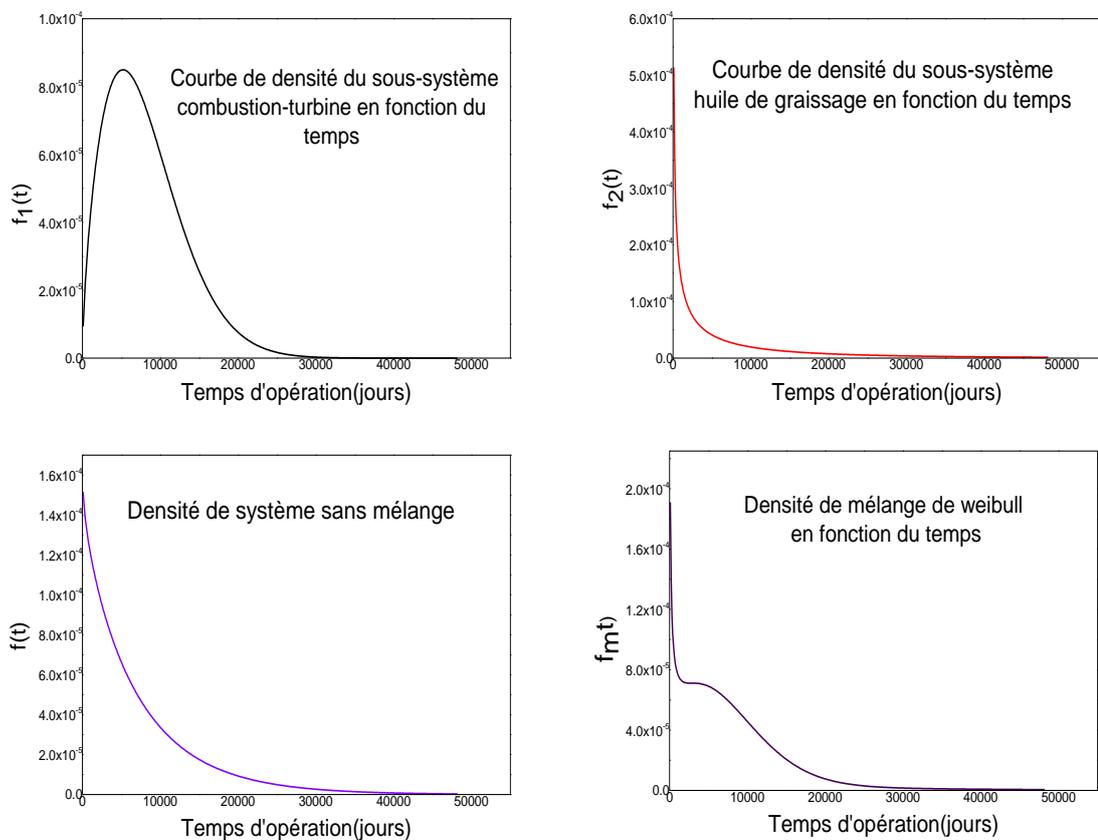


Figure I.4 Densités obtenues pour le système huile de graissage-combustion turbine [30].

1.5.1.3.1. Estimation du coefficient de partage w

Partant d'une série $\{t_i : i=1,2,\dots,n\}$ de temps de défaillance d'une variable aléatoire T relative à la durée de fonctionnement avant la défaillance, la formule de la fonction de vraisemblance peut être donnée comme suit :

$$L = \prod_{i=1}^n f(t_i) = f_1(t) \cdot f_2(t) \dots f_n(t) \quad \text{I-27}$$

Après avoir introduit la fonction log, nous dérivons la fonction log-vraisemblance par rapport au paramètre de mélange w , la formule sera :

$$\frac{dLL}{dw} = \sum_{i=1}^n \frac{f_1(t) - f_2(t)}{wf_1(t) + (1-w)f_2(t)} \quad \text{I-28}$$

La suite des opérations est bien sûr l'annulation des dérivées partielles.

$$\frac{dLL}{dw} = \sum_{i=1}^n \frac{f_1(t) - f_2(t)}{wf_1(t) + (1-w)f_2(t)} = 0 \quad \text{I-29}$$

L'utilisation d'une méthode numérique comme la bisection, la méthode Newton-raphson, etc. permet d'estimer le coefficient de partage w .

1.5.1.4. Autres lois usuelles

Dans cette partie nous citons autres lois utilisées pour modéliser la fiabilité des systèmes comme : la loi de gamma et la loi log normale qui sont expliquées plus loin [1].

1.5.1.4.1. La loi Gamma

La durée de fonctionnement T d'une entité suit une loi Gamma de paramètre de forme $\alpha > 0$ et de paramètre d'échelle $\beta > 0$, si sa densité de probabilité $f(t)$ est donnée par :

$$f(t) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta t} t^{\alpha-1} \quad \text{pour } t > 0 \quad \text{I-30}$$

Avec $\Gamma(\cdot)$ la fonction gamma qui s'exprime de la façon suivante :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad \text{I-31}$$

La durée moyenne de bon fonctionnement correspondante est :

$$MTTF = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{I-32}$$

En utilisant les propriétés de cette loi, on peut montrer que la loi d'une somme de $\alpha \in \mathbb{N}^*$ variables aléatoires indépendantes de loi $\exp(\beta)$ est une loi Gamma (α, β) . De même, la

somme de deux variables aléatoires indépendantes de loi Gamma (α_1, β) et Gamma (α_2, β) a pour loi Gamma $(\alpha_1 + \alpha_2, \beta)$.

I.5.1.4.2. Loi Log-normale

La durée de fonctionnement T d'une entité suit une loi Log-normale de paramètres $m \in \mathbb{R}$ et $\sigma^2 > 0$, si $\ln T$ est de loi Normale (m, σ^2) . En se basant sur cette définition, la densité de probabilité de la loi Log-normale est donnée par :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln t - m)^2\right)} \quad \text{pour } t > 0 \quad \text{I-33}$$

La durée moyenne de bon fonctionnement est :

$$MTTF = e^{\left(m + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad \text{I-34}$$

Cette loi a donc vocation à modéliser des entités qui se dégradent puis s'améliorent au bout d'un certain temps. La figure ci-dessous représente la forme générale d'une loi Log-normale.

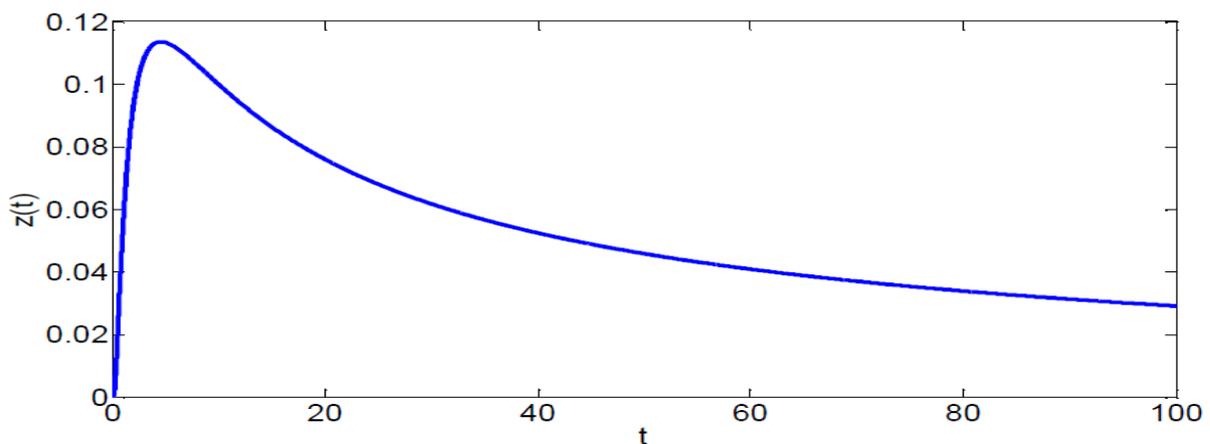


Figure I.5 Forme générale du taux de défaillance d'une loi Log-normale [1].

I.5.1.5. Modèle du risque proportionnel de Cox (PHM)

La fiabilité d'un système est souvent évaluée par des modèles paramétriques en supposant la connaissance préalable de sa loi de probabilité de défaillance. Cependant, le jeu de données du système est soumis à des facteurs d'influence différents, appelés parfois variables explicatives, qui n'ont pas pris en compte par les modèles de base (loi de Weibull, exponentielle, etc.). Dans ce cas, on fait appel souvent à des modèles semi-paramétriques

permettant de combiner entre la fonction de base $\lambda_0(t)$ et une autre fonction d'influence reflétant l'influence des différentes variables explicatives du système.

1.5.1.5.1. Présentation des facteurs d'influence

Le comportement d'un système de production peut être influencé non seulement par des variables explicatives d'environnement (température, humidité, pression...etc.), mais aussi par d'autres variables qualitatives tels que l'efficacité de remise en service, les erreurs engendrées à la suite d'une intervention, les facteurs liés à l'utilisation, etc.

Les facteurs d'influence sont des éléments, internes ou externes, qui ont pour effet d'agir sur la fiabilité du système [31]–[34]. Les facteurs d'influence peuvent être présents dans les différentes étapes du système, nous citons à titre d'exemple :

- Des facteurs liés à la conception ;
- Des facteurs liés à la fabrication ;
- Des facteurs liés à l'utilisation ;
- Des facteurs liés à la maintenance....etc.

Cette contrainte de modéliser la fiabilité du système en tenant compte de ses facteurs d'influence (covariables) peut être assurée par le modèle introduit par [17]. Ce dernier est introduit en 1972 par Mr. David Cox, il porte par la suite plusieurs appellations tels que modèle de hasards proportionnels, modèle à risques proportionnels ou encore modèle à risques proportionnels de Cox. Il permet, grâce à un modèle semi-paramétrique, de :

- Prendre en compte plusieurs variables explicatives, qualitatives et quantitatives ;
- Traiter un jeu de données aléatoires qui contient des variables censurées ;
- Etudier l'évolution du risque en fonction des variables explicatives.
- Garder la notion de l'évolution du risque avec le temps.
- Prendre en compte la notion de risque proportionnel.
- Déterminer l'influence de ces facteurs explicatifs sans connaissance préalable des relations souvent complexes entre le taux de défaillance et les covariables.

Le modèle de Cox est un modèle très important dans l'analyse de survie et les recherches de fiabilité des systèmes [35].

I.5.1.5.2. Choix des facteurs d'influence

Le choix d'un facteur d'influence doit être effectué en respectant certaines conditions telles que :

- La possibilité d'évaluer l'état de facteur dans chaque prélèvement.
- les facteurs d'influence sont identifiés de façon exhaustive pour montrer la significativité de chacun d'eux [31].

I.5.1.5.3. Modèle mathématique de Cox

Le modèle de Cox possède deux grandes caractéristiques importantes :

- Il est semi-paramétrique, c'est-à-dire que la fonction de survie n'est pas modélisée, seul l'effet d'une variable sur la survie est modélisé ;
- Il s'agit d'un modèle à risque multiplicatif suivant sa formule de taux de défaillance [36].

Le modèle de Cox est composé donc d'un taux de défaillance de base $h_0(t)$ qui dépend du temps et une autre fonction d'influence $g(Z)$ qui permet de caractériser les variables explicatives prise en compte par le modèle.

$$h(t, Z) = h_0(t) \times g(Z) \quad \text{I-35}$$

Où :

$h(t, Z)$: est le taux de défaillance du système, fonction du temps t et de l'état Z des facteurs d'influence ;

Puisque le modèle de Cox est libre de distribution, le taux de défaillance de base présente une souplesse dans le choix de la loi de distribution. Pour plusieurs travaux, la distribution exponentielle ou celle de Weibull ont été prises [37].

I.5.1.5.3.1. Fonction d'influence $g(Z)$

La fonction d'influence $g(Z)$ est en fonction des facteurs explicatives et elle est indépendante du temps. Cela implique que les distributions de jeu de données doivent posséder la même distribution quels que soient les états Z des facteurs d'influence.

La fonction d'influence $g(Z)$ est donnée par la formule suivante [32]:

$$g(z) = e^{B.Z} = e^{\sum_{i=1}^m B_i.Z_i} \quad \text{I-36}$$

Avec :

- m : le nombre de facteurs d'influence pris en compte dans le modèle ;
- $B = [b_1, \dots, b_m]$ le vecteur des coefficients du modèle de Cox ;
- $Z = [Z_1, \dots, Z_m]$ le vecteur des états des facteurs d'influence ;

A chaque valeur Z_i on affecte une covariable pouvant prendre des valeurs quantitatives ou qualitative. Cette opération s'appelle le codage et peut se faire par plusieurs possibilité, à savoir [31]:

- Pour les facteurs quantitatifs (pression en bar, température en degrés Celsius, diamètre en cm, ...) les valeurs de mesures peuvent être utilisées en l'état ;
- Pour les facteurs qualitatifs, on peut définir des valeurs discrètes associées à des « classes ». Par exemple un type de matériel est codé par la valeur 1, un second type par la valeur 2. Le même principe peut être utilisé pour les origines de fabrication, les matériaux utilisés, etc.[21], [32], [38].

L'effet des covariables s'interprète en fonction des valeurs des coefficients b_i trouvés par les méthodes d'estimation des paramètres des modèles. Le modèle de Cox a ensuite pris d'autres considérations telles que la prise en compte du processus non-homogène de Poisson (NHPP) pour aboutir au modèle d'intensité proportionnelle.

I.5.2. Processus de poisson non homogène (NHPP)

Le deuxième processus permet de modéliser la réparation minimale qui consiste à remettre le système à son état avant la défaillance. Ce processus a été discuté dans la modélisation du développement de la fiabilité en 1964 par Duane[39], puis plusieurs auteurs l'ont utilisé [40] et [41]. Le modèle NHPP est approprié pour modéliser les systèmes multi-composants comprenant un grand nombre de composants où l'intervention sur un équipement n'améliore pas la fiabilité de tout le système [42]. Cependant, ce processus n'est pas approprié aux systèmes contenant un petit nombre de composants. La figure I.6 représente le modèle de poisson non homogène.

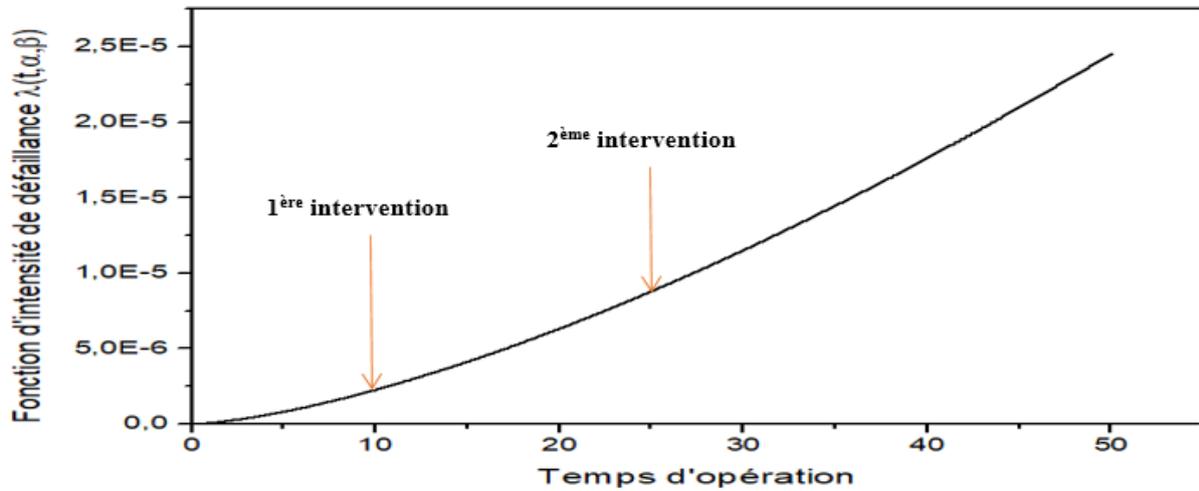


Figure I.6 Modèle de processus non homogène [21].

I.5.2.1. Modèle mathématique du processus de poisson non homogène (NHPP)

L'occurrence des défaillances des systèmes complexes réparables (SCR) peut être exprimée comme une variable stochastique de processus notée T_1, T_2, \dots, T_n , où T_i représente l'instant de l'apparition de la défaillance. L'ensemble des intervalles de temps X_1, X_2, \dots, X_n , où $X_i = T_i - T_{i-1}$, sont généralement ni indépendants ni identiques dont la fonction du taux conditionnel ou de l'intensité de défaillance peut être donnée comme suit [43] [16] :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\{n(t + \Delta) - n(t) \geq 1 | H(t)\}}{\Delta} \quad \text{I-37}$$

Où $H(t)$ représente l'histoire du processus jusqu'au temps t , avec t non inclus, et $n(t)$ est le nombre des intervalles de temps t .

Les modèles utilisés dans cette thèse se basent sur le processus de Poisson non-homogène (NHPP) [44]. Ce type de modèle doit satisfaire aux conditions suivantes pour $0 < k < t$ [45]:

- $n(0) = 0$ Initialisation du système à $t=0$;
- $n(t) - n(k) \perp n(k)$ Independence des incréments ;
- $\{n(t) - n(k)\} \sim P_0 \left\{ \int_k^t \lambda(u) d(u) \right\}$ Modèle de poisson de défaillance ;

La fonction d'intensité de défaillance $\lambda_0(t)$ se diffère du taux de défaillance $h_0(t)$ par l'incorporation de l'histoire de temps H_T et s'exprime par la formule suivante :

$$\lambda_t = \lambda(t|H_T) = \lambda_0(t) \quad \text{I-38}$$

Où $\lambda_0(t)$ peut prendre les formes des fonctions d'intensité présentées ci-dessous.

1.5.2.2. Loi de puissance

La loi de puissance la loi de Duane [39] permet d'exprimer la loi de Weibull dans sa forme étendue qui correspond à la notion d'intensité de défaillance. Ce modèle a étudié le processus de défaillance $N(t)$, pour plusieurs systèmes d'ingénierie différents en trouvant que les tracés $N(t)/t$ en fonction de t sont approximativement linéaires sur un papier log-log, $\ln(N(t)/t) \approx k + w \ln t$, où le nombre moyen des défaillances jusqu'à l'instant t , qui est égale à la fonction d'intensité cumulative $M'(t)$, est approximativement $M'(t) = EN(t) \approx \eta t^b$ où $\eta = \exp(k)$ et $b = w + 1$. Ensuite, Crow [40] a observé que ce comportement peut être présenté de façon stochastique comme un processus de Poisson non homogène (NHPP) avec $M'(t) \approx \eta t^b$ et $w > -1$ pour assurer que la fonction $M'(t)$ s'augmente avec le temps [46]. La dérivée de cette fonction cumulative donne la fonction d'intensité de défaillance comme une loi de puissance exprimée par [47] :

$$\lambda(t) = \eta b t^{b-1} \quad \text{I-39}$$

Avec η et b sont supérieurs à 0.

Afin de simplifier la formule d'intensité de défaillance, les auteurs supposent souvent que $b - 1 = \beta$ et $\eta b = \alpha$ ce qui nous donne la forme de la fonction d'intensité comme suit [48] :

$$\lambda(t) = \alpha t^\beta \quad \text{I-40}$$

Où α et β représentent respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme. Le paramètre d'échelle informe souvent sur la durée de vie moyenne du système, tandis que le paramètre de forme donne le degré d'amélioration ou de dégradation du comportement de système en précisant le phénomène qui est derrière la défaillance, à savoir :

- $\beta < 0$: $\lambda(t)$ est décroissant et le système se manifeste par un phénomène de rodage ;
- $\beta > 0$: $\lambda(t)$ est croissant et le système se détériore suite à une usure ou vieillissement ;

- $\beta = 0$: $\lambda(t)$ est constant et suit un processus de Poisson homogène HPP. Ce cas représente la loi exponentielle [21].

La figure I.7 représente la variation des allures des fonctions d'intensité de défaillance de la loi de puissance selon les valeurs de β .

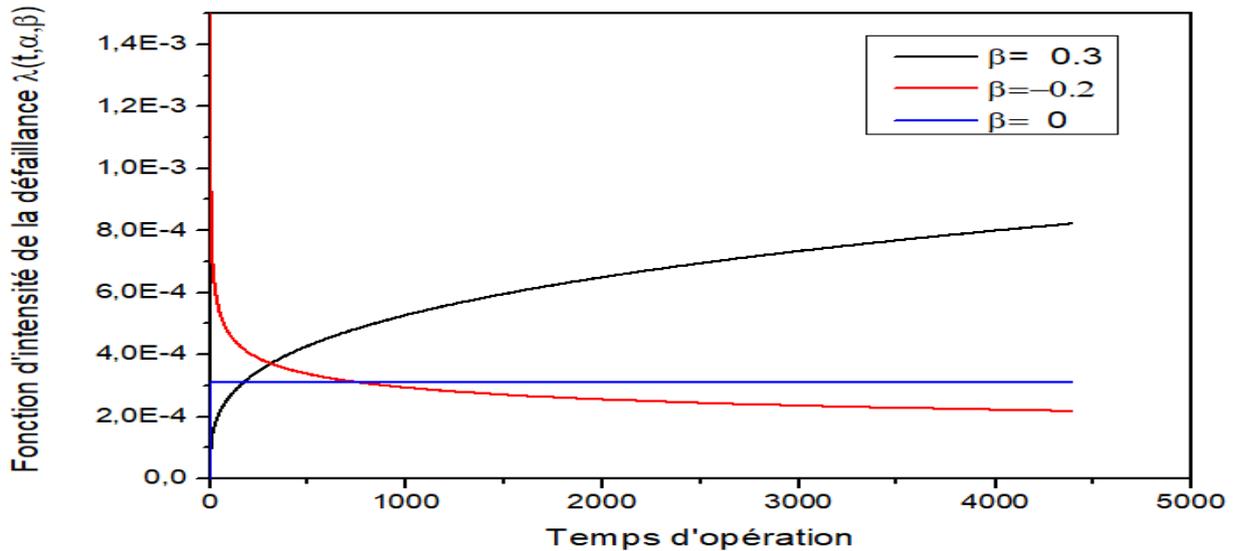


Figure I.7 Variation des allures des fonctions d'intensité de défaillance de la loi de puissance selon les valeurs de β [21].

1.5.2.3. Loi log linéaire

Le modèle log linéaire a été discuté pour l'intensité de défaillance par [18], [49] en se basant sur la formule simple de l'intensité de défaillance donnée par :

$$\lambda_i = \frac{n_i}{T_i} \tag{I-41}$$

Où n_i suit un processus de Poisson et représente le nombre de défaillance pour la population i sur l'intervalle de temps T_i [50], [51]. Supposant que λ_i a une relation log linéaire avec la variable du temps, l'intensité de défaillance peut s'exprimer comme suit :

$$\lambda_i = \alpha \exp(bt) \tag{I-42}$$

Avec $\alpha > 0$ et $b < \infty$.

Les paramètres α et b sont respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme [52]. Le temps t dans ce cas est considéré comme une variable du stress pour le facteur

d'échelle α [53], [54]. Cette loi log-linéaire, comme le cas pour la loi de puissance, permet de décrire le comportement du système sur toute sa durée de vie à savoir [55]:

- $b > 0$: usure du système ;
- $b < 0$: amélioration progressive du système vers sa phase utile ;
- $b = 0$: période de stabilité ou utile (Processus de Poisson homogène).

La figure I.8 représente la fonction d'intensité de défaillance de la loi log linéaire avec différentes valeurs de paramètre de forme.

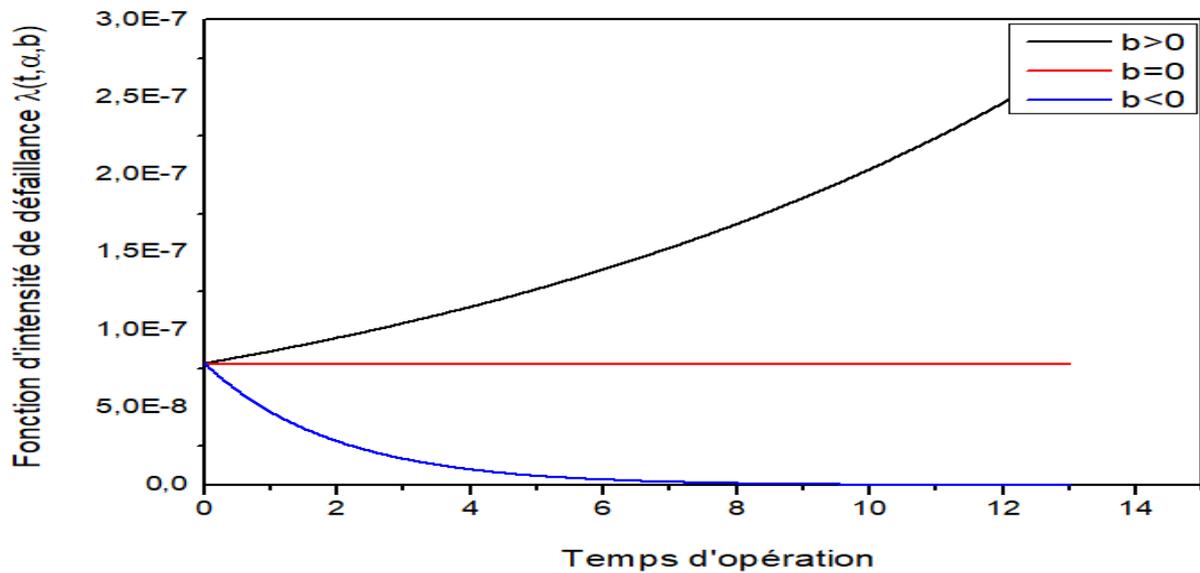


Figure I.8 Fonction d'intensité de défaillance de la loi log linéaire avec différentes valeurs de paramètre de forme [21].

Le cas où $b=0$ représente une stabilité de la fonction d'intensité de défaillance puisqu'elle suppose l'indépendance du paramètre d'échelle α du temps. Cependant, à l'instant $t=0$, toutes les intensités de défaillance ont une valeur supérieure à 0. C'est pour cela que ce modèle est approprié pour modéliser le comportement des systèmes ayant une détérioration rapide[44], [56]. Ce modèle peut être simplifier en le prenant comme suit [21] :

$$\lambda(t) = \alpha\beta^t \tag{I-43}$$

Avec
$$\beta = e^b \tag{I-44}$$

1.5.2.4. Modèle d'intensité proportionnel (PIM)

Ce modèle, introduit par Cox, se base sur la notion de la fonction d'intensité de défaillance décrite dans la section 0 et représente la forme étendue du modèle de risque proportionnelle PHM. Ce modèle est basé sur le processus de Poisson non-homogène (NHPP) et il a été utilisé par plusieurs auteurs notamment ceux basés sur les données d'Ascher et Feingold [15], [57]. Ce modèle permet une meilleure interprétation physique du système par la prise en compte des variables prédictives dites "Covariables" [47], [48], [57], [58]. Il a la capacité d'indiquer clairement l'influence de chaque covariable en utilisant, en plus de la fonction d'intensité de défaillance de base $\lambda_0(t)$ du NHPP, une autre fonction d'influence notée $g(Z)$ qui dépend que des facteurs d'influence. La formule du PIM peut se donner comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \exp(x_t^T \gamma) \quad \text{I-45}$$

Où $(x_t^T \gamma)$ représente la multiplication du vecteur des Covariables x_t par le vecteur de paramètres inconnus des coefficients de régression γ . Les variables prédictives (covariables) peuvent exprimer plusieurs facteurs d'influence, à savoir :

- La température, la pressionetc. [31];
- La gravité des défaillances et la planification des actions de maintenance ;
- La qualité de la dernière action de maintenance ;
- Indicateurs d'état...etc. [59], [60].

Selon les valeurs trouvées par le vecteur des coefficients γ , l'influence des covariables peuvent s'interpréter comme suit :

- Si la covariable $\gamma > 0$, la covariable fait augmenter l'intensité de la défaillance et reflète une condition défavorable au fonctionnement du système;
- Si la covariable $\gamma = 0$, aucune influence de cette covariable sur le fonctionnement du système.
- Si la covariable $\gamma < 0$, la covariable diminue l'intensité de la défaillance et reflète une condition favorable au fonctionnement du système ;

Les valeurs de l'ensemble des coefficients de régression ainsi que les paramètres du modèle sont obtenus par l'approche du Maximum de vraisemblance (MLE).

1.5.2.4.1. Estimation des paramètres du modèle d'intensité proportionnel (PIM) par l'approche du maximum de vraisemblance (MLE)

L'approche du maximum de vraisemblance (MLE) est considérée comme la méthode la plus utilisée pour estimer les paramètres d'un processus à partir des données émanant d'un système maintenu [41].

En définissant les événements comme des actions de maintenance préventive (MP) ou de maintenance corrective (MC) et supposant que nous observons les temps d'événements réels t_k dans l'intervalle $(0, T)$, avec les variables d'indicateur de censure c_k correspondantes, où

$$c_k = \begin{cases} 0, & \text{absence de défaillance à l'instant } t_k \text{ (MP),} \\ 1, & \text{présence de défaillance à l'instant } t_k \text{ (MC),} \end{cases}$$

Pour $k= 1, 2, \dots, n$, la fonction de vraisemblance pour le PIM peut être donnée comme suit :

$$L\{\lambda(t); H(t)\} \propto \left\{ \prod_{k=1}^n \lambda(t_k)^{c_k} \right\} \exp \left\{ - \int_0^T \lambda(t) dt \right\} \quad \text{I-46}$$

Et donc la fonction log vraisemblance est

$$LL\{\lambda(t); H(t)\} \doteq \sum_{k=1}^n c_k \log(\lambda(t)) - \int_0^T \lambda(t) dt \quad \text{I-47}$$

En remplaçant la fonction du PIM I-45, nous retrouvons

$$LL\{\lambda(t); H(t)\} \doteq \sum_{k=1}^n c_k [\log(\lambda_0(t)) + x_i^T \gamma] - \int_0^T \lambda_0(t) \exp(x_i^T \gamma) dt \quad \text{I-48}$$

Où Les estimateurs du maximum de vraisemblance $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ sont les valeurs de α, β et γ qui maximisent $L(\lambda(t); H(t))$ [61].

L'optimisation de la fonction du log de vraisemblance peut se faire avec une méthode d'optimisation des contraintes telle que l'approche de la région de confiance [62], [63]. Ces dernières ont l'avantage d'éviter le recours aux dérivés compliquées de la fonction I.48.

I.5.3. Processus de réparation imparfaite

Les réparations effectuées sur les systèmes sont souvent supposées parfaites avec une efficacité maximale, ou minimale en rendant le système à son état avant la défaillance. A cet effet, un autre type de processus qui permet de réduire partiellement l'intensité suite à une réparation a été discuté par plusieurs auteurs [64]–[66]. On appelle le processus permettant de décrire l'état du système réparable en tenant compte du degré d'efficacité de la réparation par **le processus de réparation imparfaite**. La réparation dans ce cas consiste à remettre le système à un état entre aussi bon que neuf (as good as new) et aussi mauvais que l'ancien (as bad as old) [67].

I.5.3.1. Modèle de Kijima I et II

Les modèles de Kijima de type I et II (ou modèles d'âge virtuel) ont permis de modéliser l'effet des actions de maintenance par un processus d'âge virtuel [68]. Ce processus reflète l'efficacité de la maintenance par une réduction de l'âge du système assurée à l'aide d'un facteur de réduction prenant ses valeurs entre 0 et 1. Ce modèle prend la notation I et II pour les considérations suivantes :

- Dans l'étude d'âge virtuel de type I, l'effet de l'action de maintenance ne peut influencer que la période qui suit cette réparation ;
- Dans l'étude d'âge virtuel de type II, l'action de maintenance peut éliminer complètement les dégradations dans l'état du système depuis sa mise en œuvre jusqu'à la dernière action de maintenance.

A cet effet, les deux processus d'âge virtuel dépendent d'un « degré de réparation » qui peut prendre une valeur comprise entre 0 (réparation parfaite) et 1 (réparation minimal). La figure I.9 montre un exemple d'évolution de la fonction d'intensité de défaillance correspondante au processus d'âge virtuel avec les trois types de réparation.

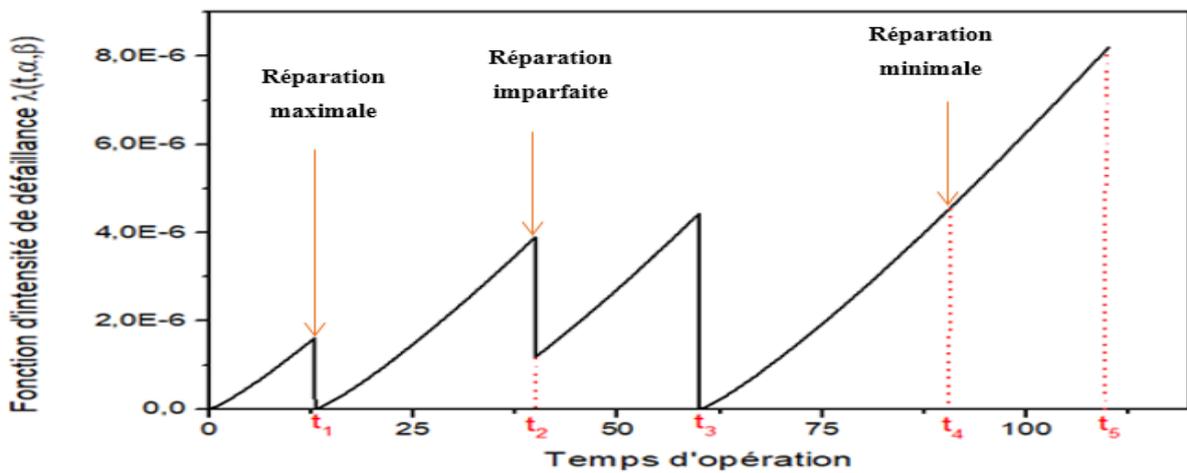


Figure I.9 Exemple d'un processus d'âge virtuel [21].

Les modèles d'âge virtuel peuvent prendre, à un moment donné, les formes suivantes :

$$\lambda(t) = \lambda_0 \left(t - \sum_{i=1}^{N(t)} s_i \right) \quad \text{I-49}$$

Représentant la forme additive avec du facteur d'âge virtuel constant s_i , tandis que la forme multiplicative de ce facteur se donne comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0 \left(t \prod_{i=1}^{N(t)} s_i \right) \quad \text{I-50}$$

Les facteurs d'échelle ont pour rôle dans les modèles d'âge virtuel la réinitialisation du système à un état plus jeune. On note que le modèle multiplicatif est plus souhaitable à cause des intensités négatives pouvant se produire par le modèle additif [69], [70].

Etant donné que le facteur utilisé par Kijima ne réduit pas réellement l'âge du système dans la présence d'autres composants qui ne sont pas moins probables de tomber en panne, les modèles de Kijima I et II ne fournissent pas réellement une description réaliste du processus de défaillance.

1.5.3.2. Modèle de réduction d'intensité (IRM)

Le modèle de réduction d'intensité (IRM), comme les modèles de Kijima, implique une mise à l'échelle multiplicative de la fonction d'intensité à chaque panne et réparation. C'est un modèle efficace et simple pour les systèmes qui s'améliorent ou se dégradent avec le temps et fournit une description parfaite de la situation physique du comportement du système.

En se basant sur le processus non-homogène de Poisson, le modèle de réduction d'intensité peut s'exprimer comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \prod_{i=1}^{N(t)} s_i \quad \text{I-51}$$

Où $s_i > 0$ sont des constants représentant l'intensité du facteur d'échelle multiplicatif. Ce modèle est différent des modèles de Kijima I et II puisque il agit sur la fonction d'intensité $\lambda_0(t)$ et non sur le temps (âge) du système en permettant d'indiquer, après chaque réparation, le degré de restauration du système comme il est montré sur la figure i.10.

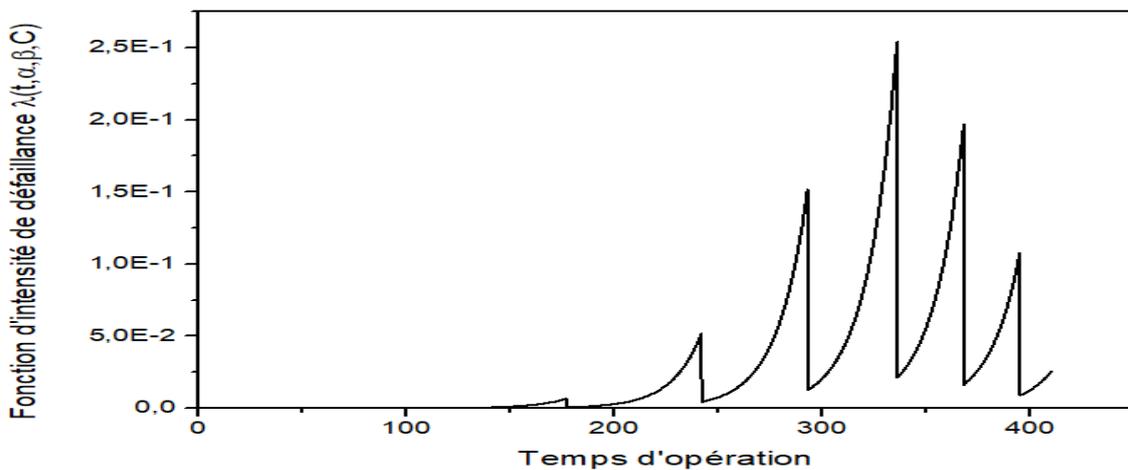


Figure I.10 Modèle de réduction d'intensité (IRM) [21].

1.5.3.3. Modèle d'intensité proportionnel généralisé (GPIM)

En 2005, Percy et Alkali [71] ont proposé une extension du modèle PIM en incorporant, sous forme d'une fonction exponentielle, des informations supplémentaires (covariables) sur l'environnement dans lequel le système fonctionne. Ces dernières ont constitué, avec des facteurs d'échelle multiplicatifs constants agissant sur l'intensité de réparation minimale (NHPP), le modèle appelé "modèle d'intensité proportionnel généralisé" noté GPIM.

Ce modèle permet une meilleure modélisation du comportement de système par la prise en compte des variables prédictives dites "Covariables" et plus de ça, il a la capacité de regrouper avec ces Covariables, l'effet de la maintenance corrective et préventive présenté respectivement par les facteurs d'échelle multiplicatifs et constant C et P.

Sur la même forme du IRM, le GPIM incorpore séparément l'effet des actions de maintenance préventive et corrective exprimées respectivement par les facteurs d'échelle multiplicatifs "P" et "C". Le GPIM permet aussi de mettre en évidence l'influence des covariables pouvant informer simultanément sur la performance du système, le stress environnemental, le type de panne et l'historique de maintenance. Algébriquement, ce modèle peut être donné par la formule suivante :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \left\{ \prod_{i=1}^{p(t)} P_i \right\} \left\{ \prod_{j=1}^{c(t)} C_j \right\} \exp(x_t^T \gamma) \quad \text{I-52}$$

Où :

$p(t)$ et $c(t)$ représentent respectivement le nombre total de PM et CM.

$(x_t^T \gamma)$ exprime la multiplication du vecteur des covariables x_t par le vecteur de paramètres inconnus des coefficients de régression γ .

Il est à noter qu'elles peuvent apporter plusieurs informations, à savoir :

- L'âge du système ;
- Le temps depuis la dernière MC et MP ;
- La gravité des défaillances ;
- La qualité de la dernière action de maintenance ;
- Indicateurs d'état...etc., [60], [72].

La figure I.11 représente la relation entre les modèles des systèmes complexes réparables.

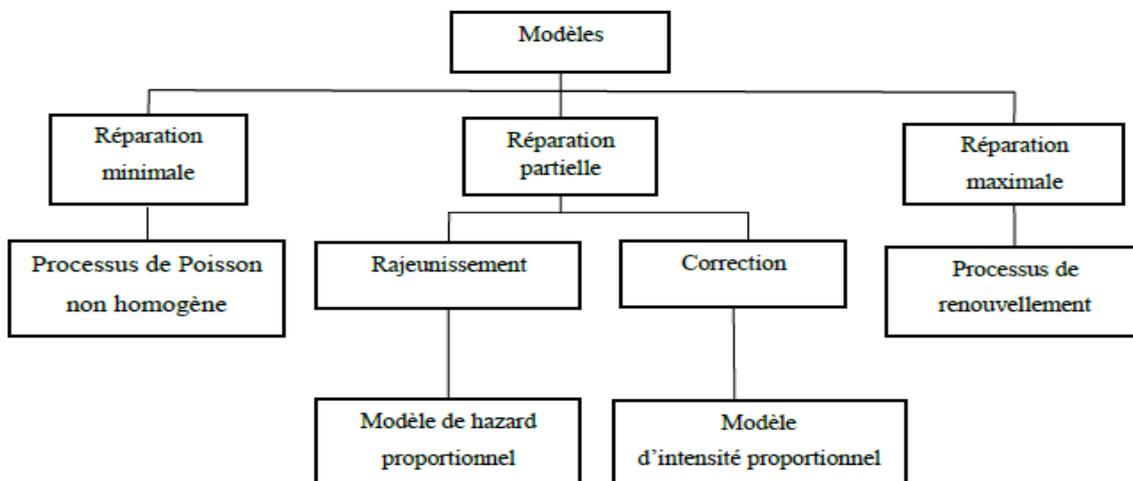


Figure I.11 La relation entre les modèles des systèmes complexes réparables [57].

Le GPIM a l'avantage de mettre en évidence comment les actions de maintenance préventives et correctives peuvent modifier la probabilité de sa défaillance future du système. En effet, les modèles des réparations minimales ne s'appliquent qu'aux systèmes comprenant un grand nombre de composants sans pouvoir incorporer les facteurs d'influence, tandis que l'hypothèse de réparations maximales (PR) ne s'applique qu'aux systèmes avec peu de composants. Les hypothèses de rajeunissement (processus d'âge virtuel, Kijima I et II) offrent de bons modèles statistiques mais ils ne sont pas faciles à être justifier physiquement. Le GPIM est un modèle simple et praticable pouvant s'appliquer sur plusieurs domaines industriels.

1.5.3.3.1. Estimation des paramètres du GPIM par la méthode du maximum de vraisemblance

Pour $k= 1, 2, \dots, n$, la fonction de vraisemblance pour le GPIM peut être donnée comme suit :

$$L\{\lambda(t); H(t)\} \propto \left\{ \prod_{k=1}^n \lambda(t_k)^{c_k} \right\} \exp \left\{ - \int_0^T \lambda(t) dt \right\} \quad \text{I-53}$$

Et donc la fonction log vraisemblance est

$$LL\{\lambda(t); H(t)\} \doteq \sum_{k=1}^n c_k \log(\lambda(t)) - \int_0^T \lambda(t) dt \quad \text{I-54}$$

En remplaçant à I-54 la fonction du GPIM I-52, nous retrouvons

$$LL\{\lambda(t); H(t)\} \doteq \sum_{k=1}^n c_k \left\{ \log(\lambda_0(t)) + p(t) \log(P) + c(t) \log(C) + x_{t_k}^T \gamma \right\} - \sum_{k=0}^n \left\{ P^{p(t_k)} C^{c(t_k)} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \lambda_0(t) \exp(x_{t_k}^T \gamma) dt \right\} \quad \text{I-55}$$

Où Les estimateurs du maximum de vraisemblance $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$, \hat{P} et \hat{C} sont les valeurs de α , β , γ , P et C qui maximisent $L(\lambda(t); H(t))$ [61].

1.5.3.3.2. La qualité d'ajustement des modèles

La qualité d'ajustement des modèles peut être estimée en se référant aux valeurs des Maximums de vraisemblance trouvées lors de l'estimation des paramètres. Cette approche se base tout d'abord sur les valeurs des Maximums de vraisemblance des modèles envisagés dont celui de grande valeur reflète le meilleur modèle. Ensuite, une autre vérification de l'ajustement des modèles est obtenue en utilisant le test du rapport de vraisemblance (LR). Ce test du rapport a une distribution de Khi-deux et se base sur deux hypothèses [58] :

L'hypothèse nulle H_0 : elle suppose qu'il n'y a pas une différence entre les deux modèles étudiés.

L'hypothèse alternative H_1 : elle suppose que la variable ajoutée au modèle de base sera significative et pourra ajouter plus d'information.

Le niveau de signification statistique s'exprime par la valeur- p de la distribution de Khi-deux qui varie entre 0 et 1 dont une valeur- p minimale (valeur- $p < 0.05$) permet de rejeter l'hypothèse nulle en gardant l'hypothèse alternative. La formule du test du rapport de vraisemblance (LR) peut être donnée comme suit :

$$LR = -2 \ln \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \cong \chi^2 (P_1 - P_2) \quad \text{I-56}$$

Où L_1, L_2 sont les fonctions de vraisemblance et $P_1 > P_2$ sont le nombre des paramètres des modèles [73].

I.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenté principalement la démarche à suivre dans la modélisation de la fiabilité des systèmes complexes réparables. La description détaillée sur les processus de réparation a permis de mettre en évidence l'utilité des modèles d'intensité proportionnelle (PIM et GPIM) pouvant tenir compte des conditions sur lesquelles le système fonctionne. Ces modèles servent à fournir une modélisation parfaites et réaliste du comportement des systèmes et peuvent constituer un outil d'aide à la décision pour une approche d'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité. Cette dernière a été discutée dans le deuxième chapitre.

II. Modélisation de la maintenance préventive des systèmes complexes

II.1. Introduction

Après avoir discuté les modèles de fiabilité nécessaires pour décrire le comportement des systèmes et tenir compte de l'influence des facteurs d'influence sur leur bon fonctionnement. Ce chapitre est consacré pour présenter les principales notions de la maintenance tout en évoquant ses fonctions, ses types et ses objectifs. Les politiques de la maintenance basée sur les lois de fiabilité ont été discutées en détail avec les différentes considérations devant être prises dans chaque politique de maintenance.

II.2. Rappel sur la maintenance

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir ou à rétablir une entité dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [74]. Dans cette définition, les termes « maintenir » et « rétablir » introduisent les deux grands aspects de la maintenance. Pour le premier, la notion de prévention est sous-entendue sur une entité supposée encore en fonctionnement. Pour le second, nous assimilons le verbe « rétablir » à une notion de correction sur une entité qui n'est plus en mesure d'accomplir convenablement sa fonction [1].

II.3. La fonction maintenance

La fonction de la maintenance a pour mission principale le maintien de la disponibilité du moyen de production par les différentes actions préventives et correctives. Autrement dit, elle vise une gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise [75], [76]. La figure II.1 montre les fonctions opérationnelles de la maintenance.

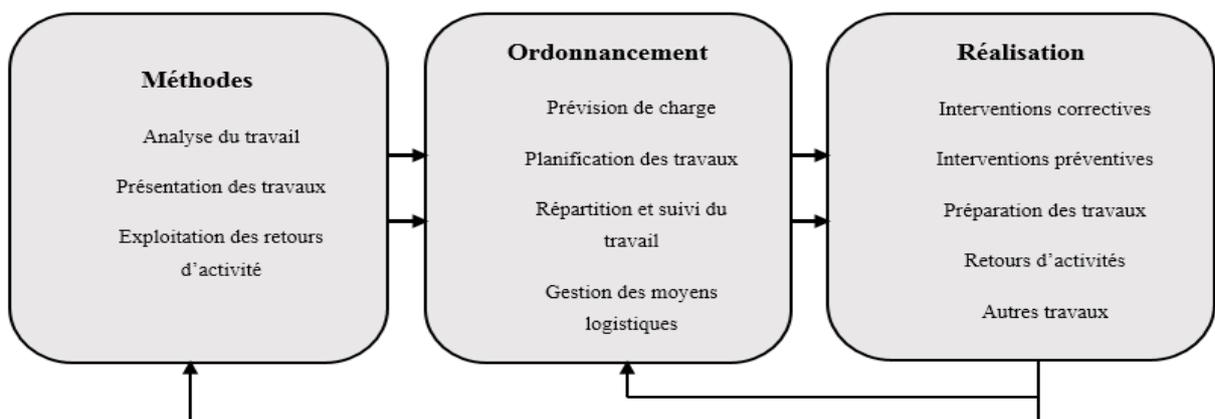


Figure II.1 Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance [76].

II.3.1. Méthodes

La préparation est la tâche la plus importante des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par la prévision des risques encourus, ensuite par une prévision des problèmes pouvant empêcher l'exécutant de la maintenance. Pour la maintenance préventive, la préparation consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser [77]. Pour la maintenance externalisée, elle consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis de l'accompagner lors de ces travaux sur site [78]. Le service de méthode peut aussi assurer d'autres activités telles que :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles ;
- Assistance technique sur site ;
- Soutien aux intervenants sur site ;
- Aide au diagnostic.

II.3.2. Ordonnancement

La fonction ordonnancement consiste à harmoniser les actions de maintenance [79]. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les objectifs principaux de l'ordonnancement sont :

- la planification des travaux ;
- L'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques ;
- Le suivi et le contrôle de l'avancement des travaux.

Dans la littérature, la fonction d'ordonnancement s'exprime par : « prévoir à l'instant t et un endroit x où un personnel p muni d'un outillage o et des matières m exécutera la tâche M en harmonie avec les autres travaux connexes » [77]. Parmi les difficultés pouvant être rencontrées dans l'ordonnancement est par quelle manière les dépannages peuvent s'intégrer dans un planning [79]. Certains services de maintenance prétextent cette contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités, si 90% de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si grâce à une politique de prévention, ce taux passe à moins de 50% ce fortuit devient programmable [78].

II.3.3. Réalisation des interventions

C'est dans cette étape qu'on doit utiliser les moyens mis à disposition, suivant les délais et les procédures imposés [80]. La réalisation peut nécessiter un diagnostic dans lequel nous devons identifier et caractériser [76].

II.4. Objectifs de la maintenance

Quatre objectifs principaux peuvent s'adresser à la maintenance en fonction du domaine d'application et des priorités du gestionnaire [81], [82]:

- Assurer le fonctionnement du système généralement vis-à-vis d'objectifs de production. La maintenance dans ce cas se mesure par des d'indicateurs fonctionnels tels que la disponibilité, fiabilité, son efficacité et aussi au travers d'indicateurs de contrôle de la qualité tels que le taux de rebut. Dans ce contexte, il est possible d'évaluer la valeur économique des résultats de maintenance au travers de ces indicateurs.
- Maintenir la valeur économique de l'entité en préservant l'état du système et augmentant sa durée de fonctionnement.
- Assurer la sécurité des matériels et des personnes. La sécurité est le premier objectif dans les cas où la défaillance peut causer des conséquences dramatiques, tels que le domaine pétrolier, nucléaire, l'aviation, etc. L'objectif de maintenance dans ces cas est d'assurer que le niveau de risque reste inférieur à une limite tolérable et appropriée. L'inspection et l'examen périodique jouent un rôle important pour atteindre cet objectif.

II.5. Types de la maintenance

La maintenance se décompose en deux types principaux : la maintenance préventive et la maintenance corrective, et chaque type aussi se compose en sous-types [1], [83], [84] comme il est montré dans la figure II.2.

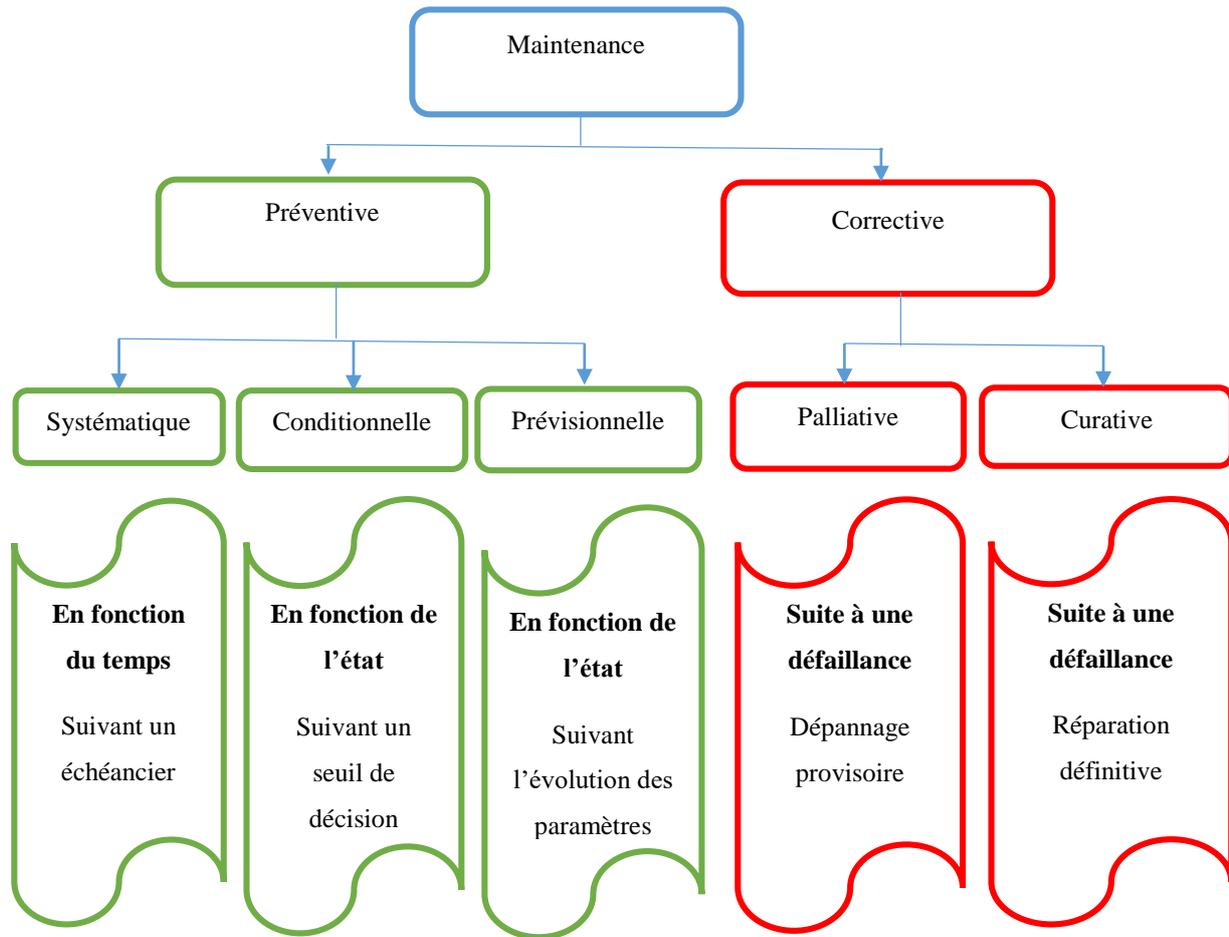


Figure II.2 Les différents types de la maintenance [1].

La maintenance corrective est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [74]. Ce type de maintenance coûte chère et peut influencer l'image de marque de l'entreprise (contrainte de délais, dégâts matériels, humaines, etc.).

La maintenance préventive est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la fréquence de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [74]. Contrairement à **la maintenance corrective**, elle s'inscrit dans une démarche proactive, en faisant l'intervention sur un équipement avant que celui-ci ne tombe en panne. La maintenance préventive trouve son intérêt :

- Soit pour des raisons de **sécurité** lorsqu'on parle des défaillances critiques ;
- soit pour des raisons **économiques** lorsque la maintenance préventive s'avère plus rentable que l'attente passive de la défaillance ;

- Soit pour des raisons **pratiques** qui imposent d'effectuer la maintenance à des moments précis [1].

La maintenance préventive se divise en elle-même en trois types : systématique, conditionnelle et prévisionnelle. La norme AFNOR 2001 définit ces derniers comme suit :

- **La maintenance systématique** est la maintenance préventive exécutée à des périodes de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage. Ce type de maintenance ne se base pas sur le contrôle préalable de l'état du bien.

Avec cette politique de maintenance, les actions de maintenance sont réalisées sur la base d'un échancier déterminé a priori. L'objectif consiste principalement à déterminer au mieux la périodicité des interventions pour optimiser le/les critères préétablis. Ce type de maintenance, très simple à mettre en place, trouve son intérêt quand la surveillance de l'entité est impossible ou quand celle-ci engendre des coûts supérieurs aux gains espérés.

- **La maintenance conditionnelle** correspond à la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

Cette politique de maintenance est subordonnée à l'apparition de certains paramètres révélateurs de la détérioration ou de la baisse de performance de l'entité considérée. Les données recueillies ou mesurées sont comparées à un seuil prédéterminé, appelé également seuil de décision. Le franchissement de ce seuil fonctionne comme une alerte qui déclenche une intervention de maintenance. Cette politique de maintenance exige le bon choix des paramètres reflétant réellement la santé du système.

- **La maintenance prévisionnelle** est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

Précisons que cette maintenance prévisionnelle tient compte également des conditions d'utilisations et de l'environnement futurs du système. Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle associe une prévision sur les indicateurs de santé du système pour la prise de décision de maintenance. La mise en place de ce type de maintenance nécessite une forte maîtrise du comportement du système. L'utilisation de cette connaissance permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention doit être exécutée.

La maintenance prévisionnelle nécessite le recours aux différentes technologies de surveillance (détecteur, capteur, logiciels ...) ce qui augmente ses coûts. Dans ce cadre, l'enjeu de la modélisation est de réaliser une analyse coût/bénéfice pour montrer la rentabilité de la mise en place de ce type de maintenance.

Ces définitions nous donnent une vision globale des différents types de maintenance pouvant être considérés pour une entité. Cependant, dans la pratique, on applique généralement une maintenance mixte qui consiste à combiner la maintenance préventive et corrective. L'équilibre optimal entre préventif et correctif est déterminé grâce à la modélisation de la maintenance [1].

II.6. Types de défaillance

Les types de défaillance d'un système peuvent se caractériser par une altération (défaillance partielle) ou une cessation (défaillance complète) à accomplir une fonction requise dans des conditions données. Les deux types de défaillance doivent obligatoirement découler à une maintenance curative. Cependant, dans les deux cas de la défaillance soit partielle ou complète, la maintenance peut être palliative afin de répondre aux différentes exigences telles que le maintien de la disponibilité du système, la possession de la pièce de rechange, etc. Les types de défaillance sont représentés dans la figure ci-dessous.

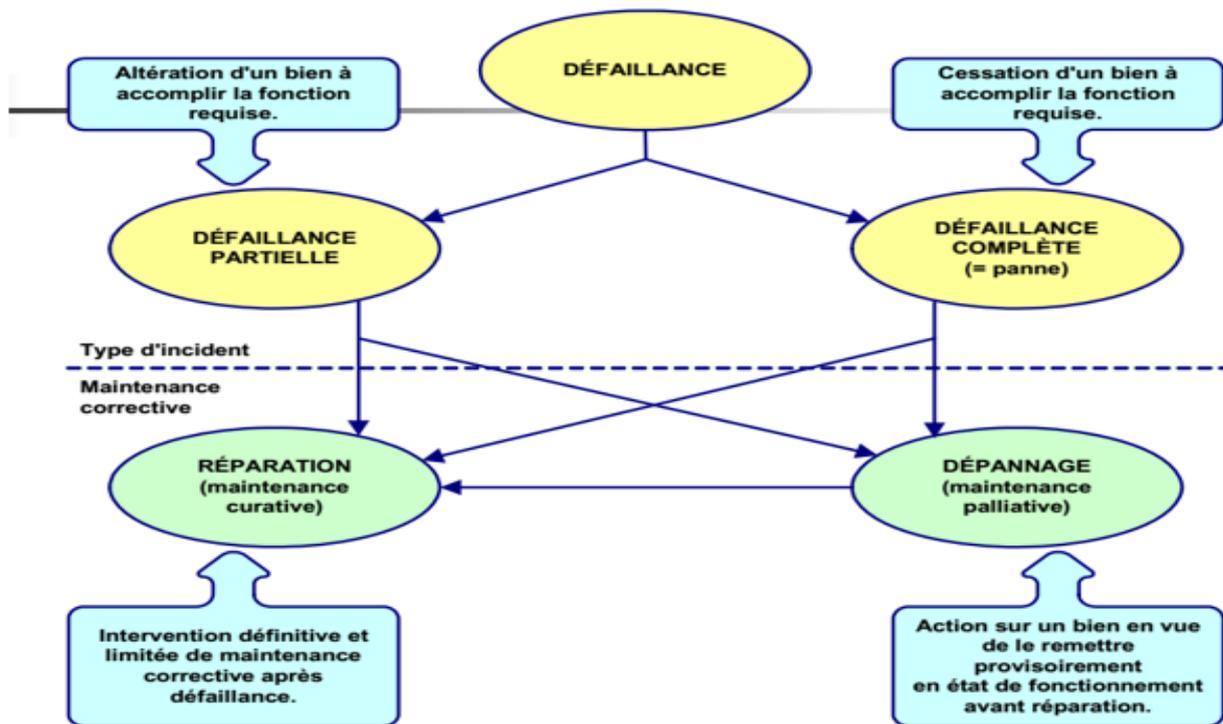


Figure II.3 Types de défaillance.

II.7. La variation du taux de défaillance durant les trois phases de vie des systèmes

L'évolution de taux de défaillance d'un système prend la forme d'une courbe en baignoire pendant toute sa durée de vie comme il est montré dans la figure ci-dessous.

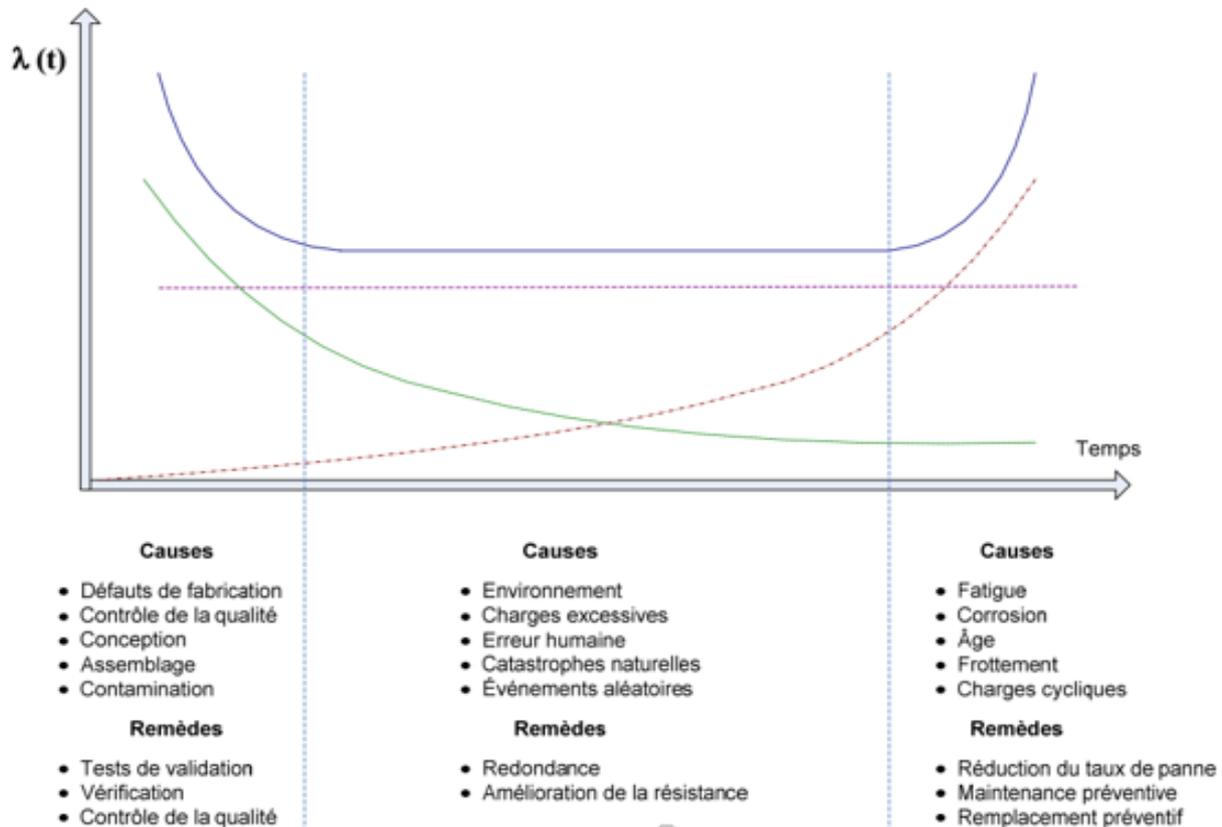


Figure II.4 Allure du taux de la défaillance, les causes et les remèdes [85].

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Elle se caractérise par les défauts de fabrication, de contamination, de conception, etc. Dans cette phase des contrôles de la qualité, des tests de validation et de vérification sont recommandés.

Après, le taux de défaillance se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). Cette période se caractérise par des événements aléatoires dont les défaillances peuvent être liées à l'environnement, aux erreurs humaines, aux catastrophes naturelles, etc. Dans ce cas, la redondance des composants et l'amélioration de leur résistance constituent les solutions les plus recommandées.

A la fin, le taux de défaillance remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de Vieillessement (taux de défaillance croissant). On s'intéresse dans cette partie par la réduction du taux de défaillance dont l'objectif est d'allonger au maximum la durée de vie du système. A cet effet, des maintenances et des remplacements préventifs sont fortement recommandés. La figure ci-dessous montre l'évolution du taux de défaillance d'un système durant les trois phases de vie.

Donc, la prolongation de la durée de vie d'un matériel ne peut se faire que par des actions de maintenance comme est présenté dans la figure suivante.

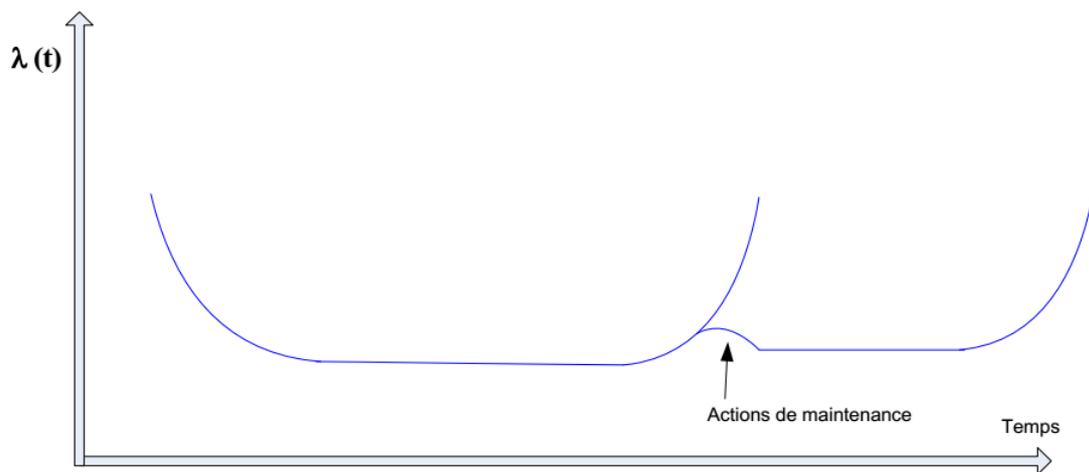


Figure II.5 La prolongation de la durée de vie d'un matériel par des actions de maintenance.

II.8. Influence de la maintenance préventive sur la fiabilité

On examine les effets de la maintenance préventive sur la fiabilité des systèmes. La maintenance peut :

- Diminuer la fiabilité (erreur humaines dues à l'intervention).
- N'avoir aucun effet (aucun mécanisme de vieillissement, aucun phénomène d'usure).
- Améliorer la fiabilité (présence de mécanisme de vieillissement, de phénomène d'usure).

Si $R(t)$ = fiabilité du système, t = temps d'opération et $R_m(t)$ = fiabilité du système maintenu.

T = temps auquel on effectue la maintenance.

$$\text{Pour } 0 \leq t < T \Rightarrow R_m(t) = R(t)$$

II-1

La maintenance dans ce cas n'a aucun effet sur la fiabilité du système entre 0 et T.

Au temps T, on effectue la maintenance, le système devient aussi bon que neuf.

L'effet de la maintenance idéale sur la fiabilité est représenté sur la figure suivante :

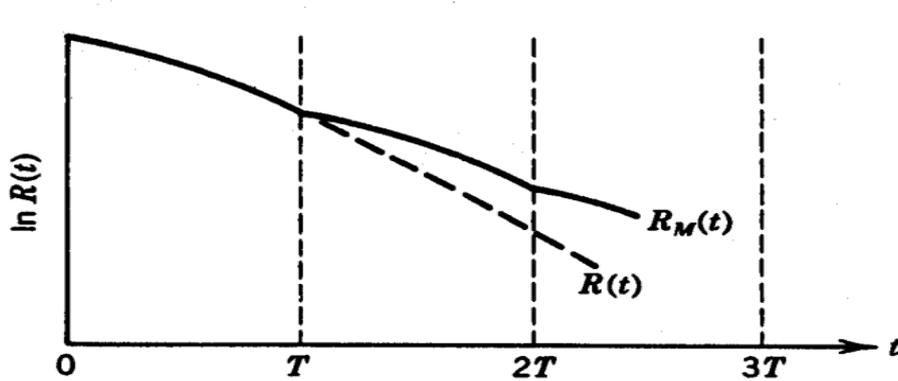


Figure II.6 Effet de la maintenance idéale sur la fiabilité.

La maintenance idéale est la probabilité que le système survive au temps t.

$$\text{Pour } T \leq t < 2T \Rightarrow R_m(t) = R(T) \times R(t-T) \quad \text{II-2}$$

Après 2 opérations de maintenance : $2T \leq t < 3T$

$$R_m(t) = R(T)^2 \times R(t - 2T) \quad \text{II-3}$$

La variation de fiabilité $R_m(t)$ après les actions de maintenance préventive systématique est présentée dans la figure suivante.

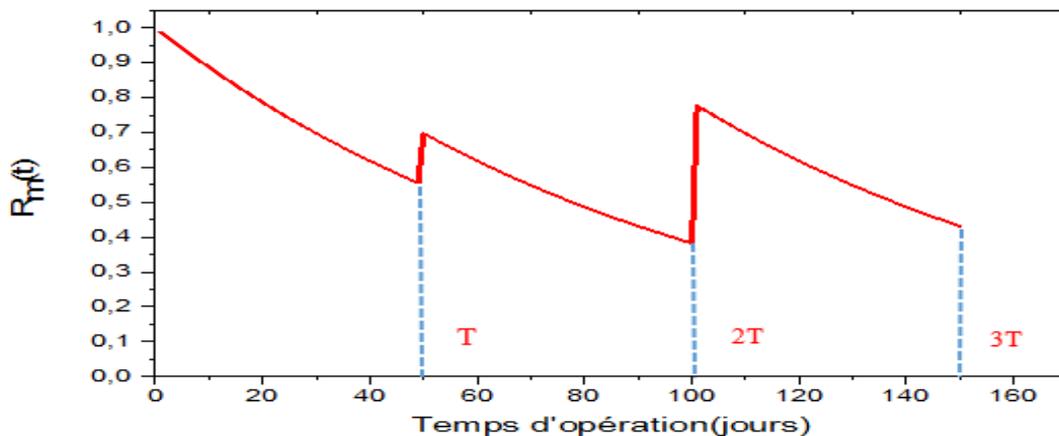


Figure II.7 Variation de fiabilité après les actions de la maintenance préventive systématique.

Après N opérations de maintenance :

$$NT \leq t < (N+1)T \Rightarrow R_m(t) = R(T)^N \times R(t - NT) \quad \text{II-4}$$

En maintenance idéale la MTTF se calcul par l'expression :

$$\begin{aligned} MTTF &= \int_0^{\infty} R_m(t) dt = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R_m(t) dt \\ &= \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R(T)^N \times R(t - NT) dt \end{aligned} \quad \text{II-5}$$

$$\text{Pour } t'=T-NT \Rightarrow MTTF = \sum_{N=0}^{\infty} R(T)^N \times \left[\int_0^T R(t') dt' \right] \quad \text{II-6}$$

$$\sum_{N=0}^{\infty} R(T)^N = \frac{1}{1 - R(T)} \quad \text{II-7}$$

$$\Rightarrow MTTF = \frac{\int_0^T R(t) dt}{1 - R(T)} \quad \text{II-8}$$

Effet de la maintenance sur la fiabilité Pour $\lambda = \text{constant}$. (Panne aléatoire, distribution exponentielle).

$$R_m(t) = (e^{-\lambda T})^N \times e^{-\lambda(t-NT)} = e^{-\lambda t} \quad \text{II-9}$$

$$\Rightarrow R_m(t) = e^{-\lambda t} ; 0 < t < \infty \quad \text{II-10}$$

Ceci implique que la maintenance n'a aucun effet sur la fiabilité du système dans le cas où $\lambda = \text{constant}$.

Si on considère l'effet de vieillissement qu'on peut modéliser par la loi de Weibull à deux paramètres pour la simplification.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \quad \text{II-11}$$

$$R_m(t) = e^{-N\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \times e^{-\left(\frac{t-NT}{\theta}\right)^m} ; NT \leq t < (N+1)T \quad \text{II-12}$$

$$\text{Pour } t=NT ; \frac{R_m(t)}{R(NT)} = e^{-N\left(\frac{T}{\theta}\right)^m + \left(\frac{NT}{\theta}\right)^m} \quad \text{II-13}$$

Δt après une maintenance préventive = 0.

Il y a un gain à faire de la maintenance préventive lorsque l'exposant à droite est > 0 :

$$\left(\frac{NT}{\theta}\right)^m > N\left(\frac{T}{\theta}\right)^m \Rightarrow N^{m-1} - 1 > 0 \quad \text{II-14}$$

Si $m > 1$: faire la maintenance préventive (MP a un effet positif)

Si $m = 1$: distribution exponentielle (MP n'a pas d'effet sur la fiabilité)

Si $m < 1$: MP diminue la fiabilité (dans la période de rodage par exemple)

La figure ci-dessous représente l'évolution de la fiabilité selon la valeur m et l'effet de la maintenance préventive.

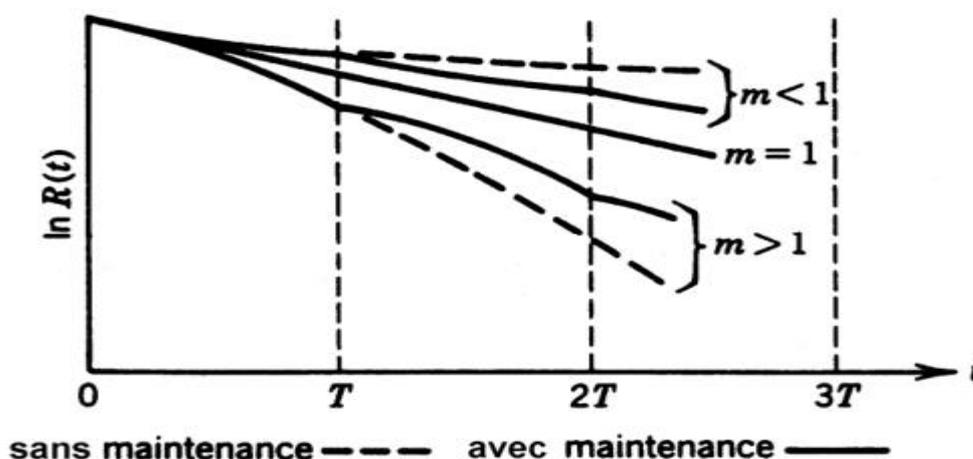


Figure II.8 Evolution de la fiabilité selon la valeur m et l'effet de la maintenance préventive [85].

II.9. La maintenance basée sur la fiabilité (MBF)

La maintenance basée sur la fiabilité a été abordée premièrement en aéronautique vers 1960 aux États-Unis. La MBF (ou Reliability Centerd Maintenance) a pour objectif principale la détermination des programmes de maintenance [86] et la réduction des durées de pertes de production par une nouvelle répartition des tâches entre production et maintenance. Elle peut se définir comme toute politique de maintenance visant l'amélioration de la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des fonctions des systèmes à travers un programme des interventions préventives [76], [87].

II.9.1. Optimisation de la maintenance basée la fiabilité (OMF)

L'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité (OMF) a été proposée par l'entreprise d'électricité de France (EDF) à partir des années 1990 [4]. Après des études préliminaires, la

première mise en œuvre de l'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité était en 1993 où des centrales nucléaires ont été considérées pour les critères de sûreté-disponibilité-coûts d'exploitation. A partir de 1995, l'approche a été adaptée pour d'autres systèmes tels que les centrales thermiques de charbon, les turbines à combustion, les lignes de transport d'électricité, éoliennes,...etc. [88].

Ensuite, par l'intermédiaire de sociétés prestataires de services en maintenance, d'autres secteurs industriels (automobile, offshore,...) ont été traités par l'OMF. Maintenant, les principes de l'OMF sont utilisés pour considérer la maintenance et le soutien logistique dans la phase de conception des futurs réacteurs nucléaires [89].

La méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité permet d'assurer :

- Une démarche d'aide à la décision permettant à déterminer les actions de maintenance préventive aidant à maîtriser les coûts et le niveau exigé de disponibilité d'une installation ou d'une entité [90].
- Une démarche rationnelle qui vise à faire éviter au mieux les effets néfastes des défaillances d'origine matérielle, sur le fonctionnement de l'installation [89].

L'application de l'OMF passe généralement par plusieurs étapes [76], [91] :

- L'analyse fonctionnelle (description fonctionnelle et technique du système d'étude) ;
- L'analyse de dysfonctionnement des systèmes (identification des modes de défaillance des équipements) ;
- L'analyse du retour d'expérience (rassembler les données essentielles pour établir les choix de maintenance) ;
- L'analyse des dysfonctionnements des horizons (munir l'analyste des informations nécessaires à l'évaluation de la criticité des modes de défaillances) ;
- La sélection des tâches de maintenance (proposition des tâches élémentaires justifiées pour couvrir les modes de défaillance significatifs et écrire le programme de maintenance préventive).

La figure ci-dessous décrit les étapes générales de l'OMF.

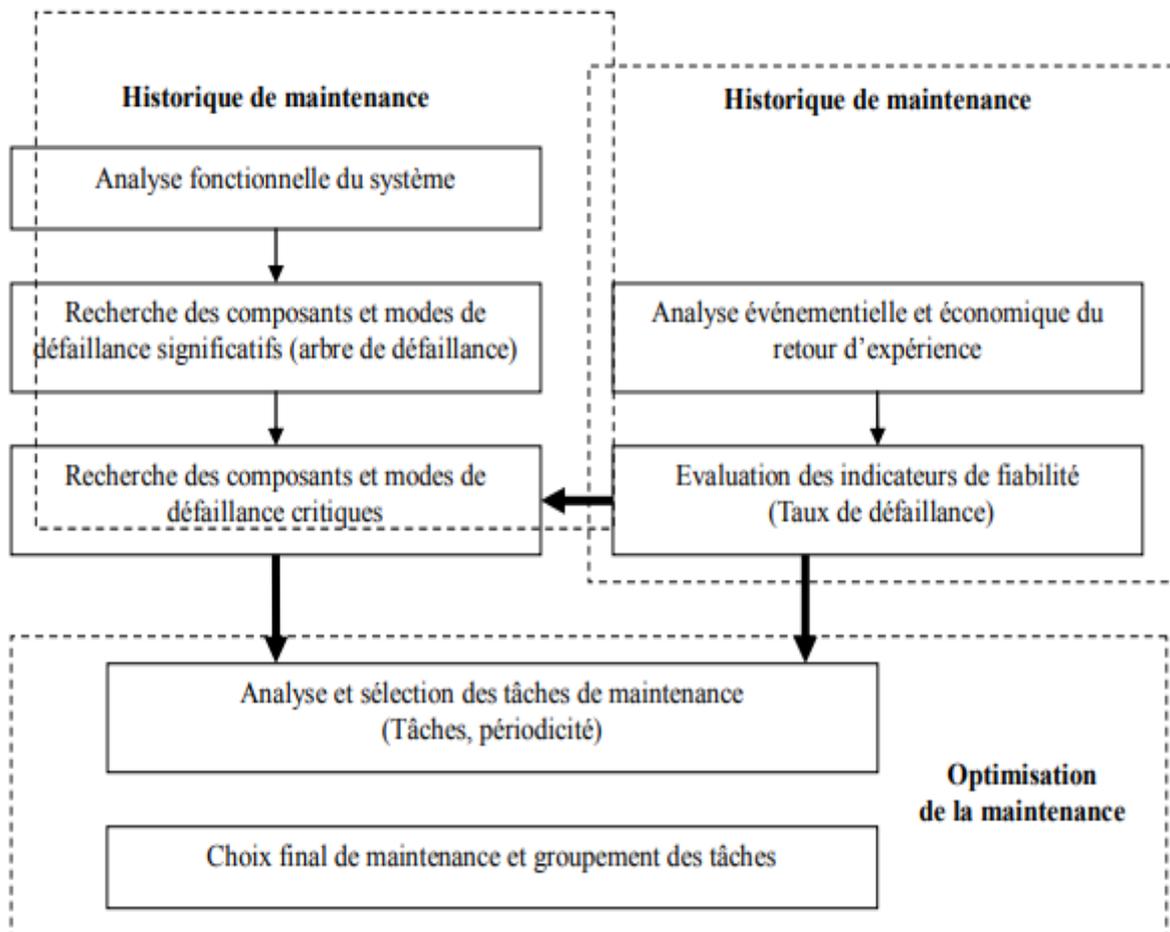


Figure II.9 Etapes de la méthode d'optimisation basée sur la fiabilité [76].

Cependant, d'autres approches basées principalement sur le retour d'expérience (REX) et les lois de durée de vie peuvent s'utiliser pour atteindre les objectifs de cette approche.

II.10. Politiques basées sur la loi de durée de vie

Ces politiques considèrent des modèles mathématiques pour chercher le moment de remplacement optimal. Elles permettent de décider et prédéfinir la maintenance préventive systématique, qui consiste en des remplacements, en fonction du temps [92].

II.10.1. Politiques basées sur l'âge du système

Les politiques de maintenance basées sur l'âge, ou « *age-replacement policies* », consiste à prévoir le remplacement du système par un système neuf après sa défaillance ou après une durée de T unités de temps. En remplaçant le système avant qu'il ne soit défaillant, on limite ses pannes, et donc les coûts liés à son indisponibilité fortuite et à la réalisation de réparations correctives.

L'optimisation se fait dans ce cas sur la base d'un paramètre de décision T visant à diminuer les coûts tout en cherchant un compromis entre les actions de maintenance préventive et corrective. Bien que la politique de remplacement strictement périodique soit considérée comme la meilleure des politiques où la périodicité de remplacement est une variable de décision, l'hypothèse faite d'un remplacement à neuf n'est pas totalement réaliste. De plus, une planification à long terme n'est pas possible dans cette politique au moment où les pannes survenant avant la maintenance préventive décalent sa période déjà déterminée comme est montré dans la figure suivante [92].

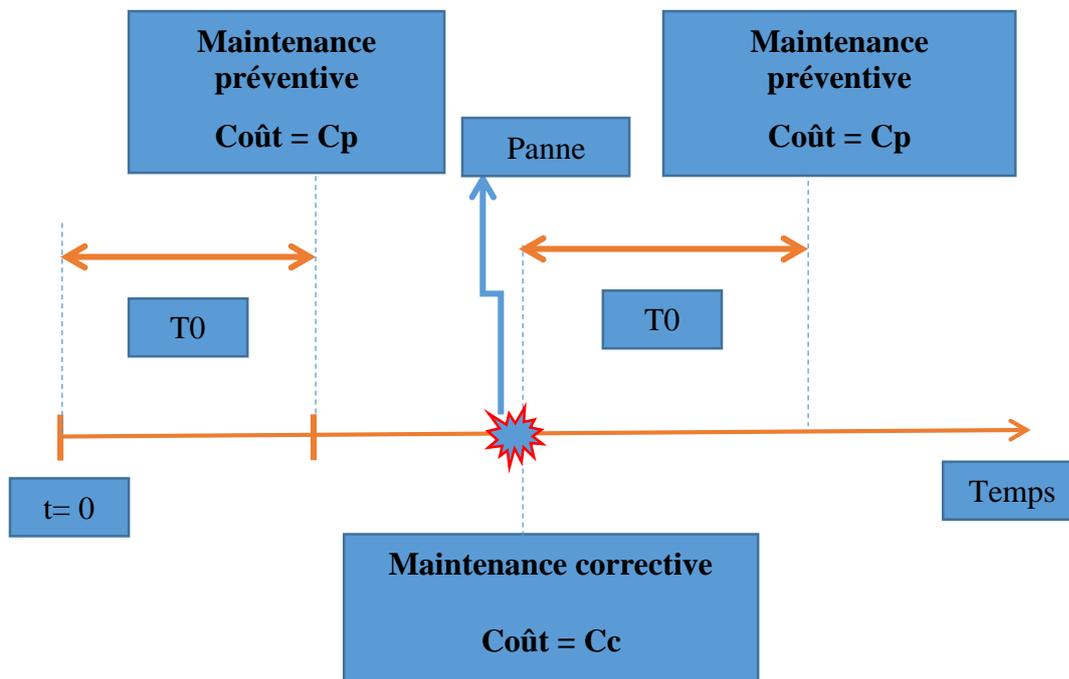


Figure II.10 Schéma d'une politique de maintenance basée sur l'âge [1].

L'optimisation de l'intervalle de temps optimal T_0 peut s'expliquer en considérant un coût unitaire de remplacement c et un autre coût additionnel k de la défaillance d'un composant avant T_0 comme il est montré dans la figure ci-dessus. La fonction économique du coût moyen à long terme par unité de temps est donnée par :

$$C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(c+k)E(N_{cor}(t)) + cE(N_{prev}(t))}{t} \quad \text{II-15}$$

Avec $N_{cor}(t)$ est le nombre de remplacements correctifs sur l'intervalle $[0, t]$ et $N_{prev}(t)$ est le nombre de remplacements préventifs sur $[0, t]$. Si on considère que les remplacements effectués permettent au composant de se remettre à son état initial de fonctionnement, il est

alors possible d'utiliser le théorème de renouvellement. Dans ce cas, le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini se donne comme suit :

$$C(T_0) = \frac{E(C(T_{cycle}))}{E(T_{cycle})} = \frac{c + k \cdot F(T_0)}{\int_0^{T_0} R(t) dt} \quad \text{II-16}$$

La période de remplacement optimale T_0 est déterminée en minimisant le coût $C(T_0)$ dans l'équation II-16 [1].

II.10.2. Politiques de remplacement par blocs

Les politiques de remplacement par blocs, contrairement aux modèles de maintenance basés sur l'âge du système, ne s'influencent pas par les actions de maintenance corrective. A cet effet, la périodicité suit un programme strict de la forme $T, 2T, 3T, 4T, \dots$ etc., même si la défaillance a entraîné une action de remplacement. Dans cette politique, à chaque action de maintenance préventive le système est substitué par un autre neuf et les interventions sont réalisées aux dates prédéfinies quel que soit le temps de fonctionnement du système comme il est montré dans la figure ci-dessous [92].

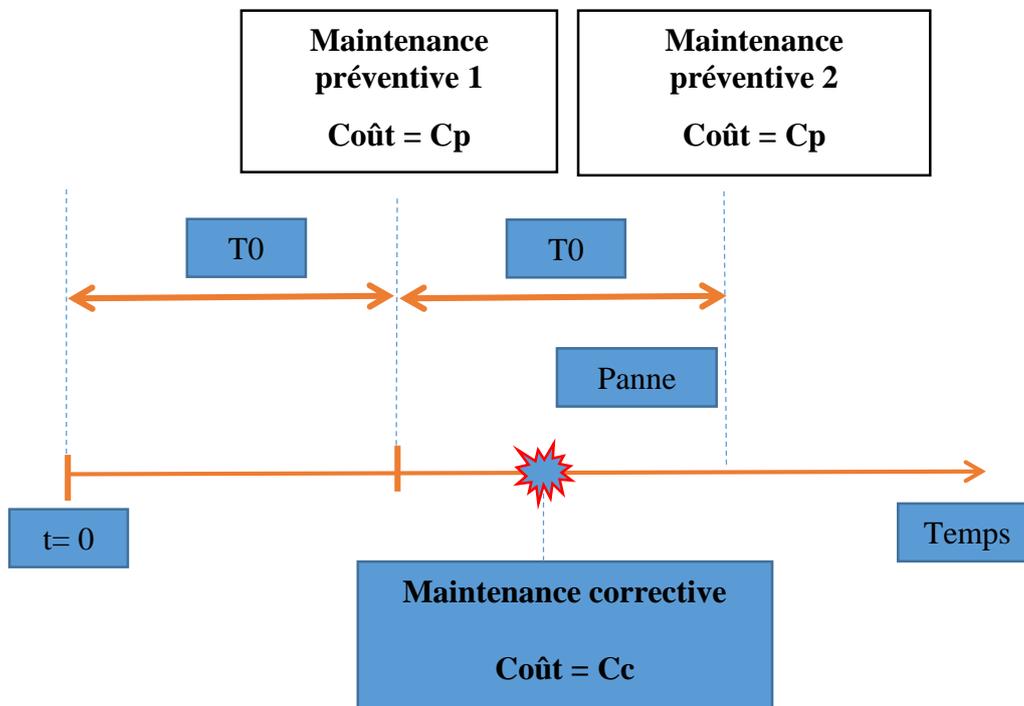


Figure II.11 Schéma d'une politique de remplacement par bloc [1].

La politique de remplacement par blocs considère un modèle simple à gérer en comparaison avec celui de remplacement basé sur l'âge du système. Cependant, le risque de remplacer des systèmes presque neufs constitue l'inconvénient majeur de cette politique de remplacement.

L'optimisation pour un remplacement par bloc peut se faire selon un critère de coût et/ou de disponibilité en faisant varier la durée de la période T et le type de réparations effectuées[92]. Nous considérons la période de remplacement T_0 comme le paramètre à optimiser, on s'intéresse au coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon fini. Le coût moyen des actions de maintenance pour un processus de renouvellement supposant une seule intervention sur un intervalle de temps T_0 , se donne comme suit :

$$C(T_0) = \frac{E(C(T_{cycle}))}{E(T_{cycle})} = \frac{c + (c + k) \cdot F(T_0)}{T_0} \quad \text{II-17}$$

La durée de remplacement optimale T_0 pour cette politique est déterminée en minimisant le coût (T_0) dans l'équation II-17 [1].

II.10.3. Politique de remplacement périodique avec réparation minimale

En se référant au processus non homogène de Poisson (NHPP) supposant que l'intervention remise le système à son état avant la défaillance, la politique de remplacement se différencie de la politique de remplacement par blocs par la prise en compte de plusieurs interventions dans la même périodicité T . Elle est comme toute politique de remplacement vise à remplacer, préventivement, l'élément à un instant de temps KT ($K=1,2,\dots, n$).

Nous supposons que C_p et C_m représentent respectivement les coûts de la maintenance préventive et ceux de la réparation minimale (maintenance corrective). La fonction du coût moyen peut se donner comme suit :

$$J(T) = \frac{C_p + C_m H(T)}{T} \quad \text{II-18}$$

Où $H(T)$ représente la fonction cumulative du taux de défaillance. L'intervalle du coût optimal peut s'obtenir en minimisant la fonction du coût (II-18).

Dans le cas où nous avons plusieurs composants, N , représentant les mêmes caractéristiques de fiabilité, la fonction (II-18) se donne comme suit :

$$J(T) = \sum_{i=1}^N \frac{[C_{p,i} + C_{m,i} H_i(T)]}{T} \quad \text{II-19}$$

Les systèmes adoptant cette politique se bénéficient de la possibilité de s'évoluer avec nombre des défaillances en considérant le taux de défaillance cumulé [93] contrairement aux deux autres politiques de maintenance considérant qu'une seule défaillance avec sa fonction de répartition de défaillance $F(T_0)$ [21], [94].

II.10.4. Politique de remplacement basée sur les modèles imparfaits

Les politiques de remplacement basées sur les modèles imparfaits constituent une extension de celles basées sur la réparation minimale et permettent de donner le nombre de défaillances v_i en fonction de l'influence de certaines covariables tout en considérant l'effet des actions de maintenance corrective et préventive. La maintenance dans ce cas est considérée partielle et sa modélisation doit se baser sur les différents modèles de réparation imparfaite tels que le modèle de réduction d'intensité (IRM) et le modèle d'intensité proportionnelle généralisée (GPIM). La fonction du coût moyen $C(L)$ peut se donner comme suit :

$$C(L) = \frac{\sum_{i=1}^k c_i(MP) + v_i c_i(MC)}{kL} \quad \text{II-20}$$

Où $C_i(MP)$ et $C_i(MC)$ sont respectivement les valeurs moyennes des coûts de MP et MC pouvant s'obtenir opérationnellement [21].

II.11. La politique de maintenance basée sur les conditions (MBC)

La politique de maintenance basée sur les conditions se base sur des variables de conditions pour exécuter une action de maintenance. Ces variables décrivent l'état du système à l'aide de plusieurs techniques de la maintenance conditionnelle telles que l'analyse vibratoire et l'analyse des huiles [94]. L'objectif de procéder avec ce type de politique est de minimiser au maximum les pertes engendrées par des interventions inutiles (précoces ou retardées) [95].

La maintenance basée sur les conditions, selon Starr[96] , doit suivre les étapes du logigramme montré sur la figure II.12 Ce dernier donne une vue globale sur le processus à suivre pour appliquer ce type de politique [21].

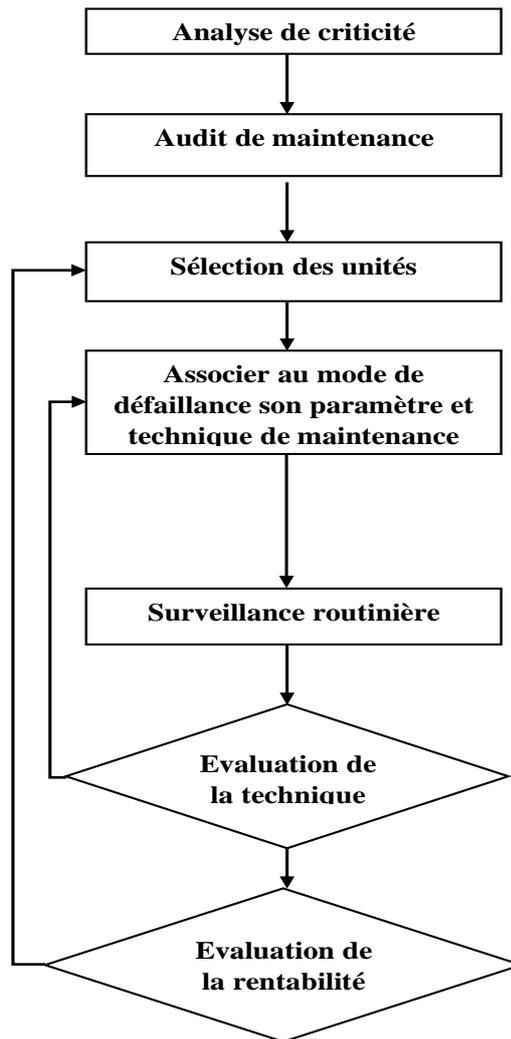


Figure II.12 Logigramme de sélection des unités et des techniques pour la MBC [21].

Cette politique est recommandée si le processus de défaillance d'une machine peut être représenté par une seule variable de condition. Cependant, les systèmes complexes présentent souvent un nombre important des modes de défaillance ce qui va rendre impossible, pour des raisons techniques ou économiques, de proposer le moyen de surveillance et le paramètre appropriés qui reflète réellement l'état de santé du système [97]. C'est pour cela que la politique basée sur les conditions est efficace uniquement pour les défaillances prévisibles (avec un mécanisme de défaillance d'usure bien déterminé) ou pour les composants critiques d'un système [21], [98].

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a considéré les principes de base de la maintenance basée sur la fiabilité. Les spécifications, les limites et les avantages des politiques de maintenance ont été aussi discutés pour savoir les différentes considérations devant être prise en compte lors de l'optimisation. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une nouvelle politique d'optimisation qui se base sur celle de remplacement périodique avec réparation minimale (NHPP).

III. Optimisation de la périodicité de la maintenance préventive des systèmes

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on a traité les classifications de l'optimisation de la maintenance préventive, les différents critères d'optimisation et les difficultés devant être surmontées par les gestionnaires de la maintenance. Une démarche d'optimisation de la maintenance préventive basée sur la fiabilité a été discutée en donnant les algorithmes et les spécifications des simulations à échelle de temps fixe et variable.

III.2. Classification de l'optimisation de la maintenance

Comme nous avons déjà vu dans le chapitre précédent, l'optimisation de la maintenance préventive consiste à trouver la balance optimale entre la maintenance préventive et la maintenance corrective tout en respectant les objectifs fixes. Ceci nécessite de procéder avec un critère d'optimisation où les instants de maintenance et les actions à effectuer permettent son optimisation. Ce critère de décision peut se baser sur le coût, par exemple un coût moyen des actions de maintenance à long terme ou le coût d'exploitation par unité de temps, en relation avec la disponibilité du système ou encore avec la sécurité [99], [100]. La (figure III.1) montre une illustration des effets de la fréquence des opérations de maintenance sur les coûts liés, soit à la maintenance corrective, soit à la maintenance préventive.

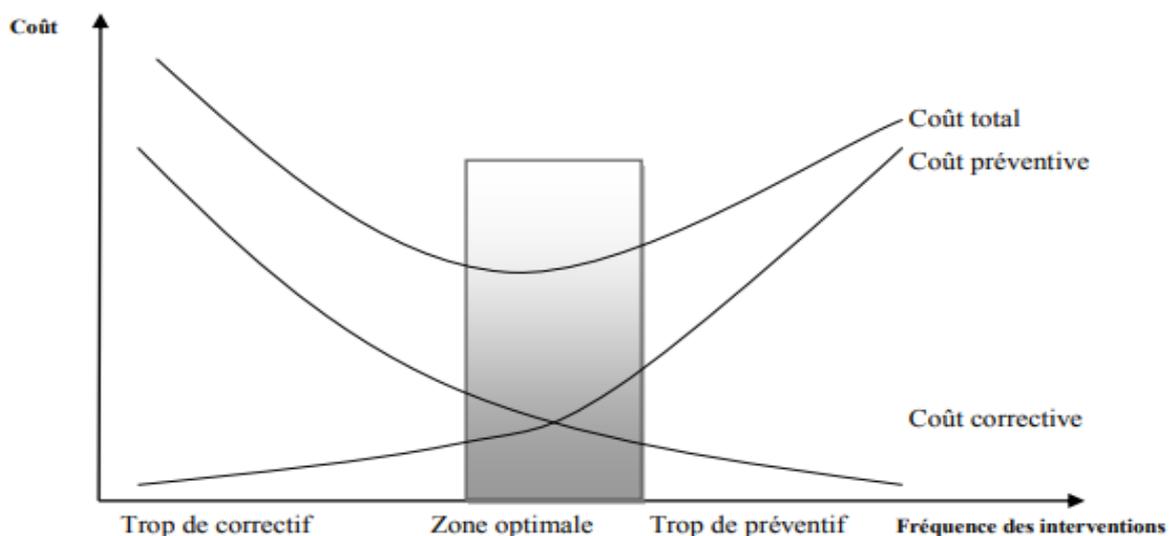


Figure III.1 L'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective [89].

L'augmentation de la fréquence des interventions sur le système conduit à réduire les effets indésirables engendrés par une défaillance mais pénalise la disponibilité du système et peut entraîner une augmentation du coût global d'exploitation du système dans la mesure où chaque opération de maintenance engendre un coût direct et indirecte [89], [101].

La classification d'optimisation est basée le plus souvent sur les objectifs de chaque critère, à savoir [89], [102]:

- La sûreté : l'objectif pour ce critère est de maximiser des indices et les facteurs liés à la sûreté avec des contraintes données, comme par exemple des contraintes de coût, de la faisabilité technique, etc.
- Le coût : L'objectif dans ce cas consiste à minimiser le coût de la maintenance avec différentes contraintes, sur la sûreté et/ou des exigences sur la maintenance ;
- Le coût total : minimiser le coût total en tenant compte des coûts directs et indirects (maintenance et interruptions).

III.3. L'impact d'une politique de maintenance

Les gestionnaires de maintenance doivent surmonter plusieurs difficultés afin d'argumenter et justifier leurs décisions en ce qui concerne les différentes actions de maintenance préventives. Des questions se posent quant aux effets de la politique établie, en termes de coûts et de disponibilité, et quant à la rationalité des choix effectués. La complexité réside donc dans l'évaluation des bénéfices qui en découlent et non seulement aux dépenses relatives aux tâches de maintenance. C'est ici qu'on doit apporter un outil d'aide à la décision pour la maintenance à caractère quantitative [89].

Comme le décrit la figure III.2, les performances d'un programme de maintenance fondé sur le processus d'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité (OMF) peuvent être obtenues après plusieurs années d'application, et entraînent éventuellement des changements pour la mise en œuvre d'un nouveau programme [103]. Cependant, s'il est possible de faire une comparaison entre la différence économique de l'ancien programme de maintenance préventive et celui du nouveau, il est difficile d'évaluer les dépenses de maintenance corrective évitées ainsi que les gains obtenus en termes de disponibilités suite aux modifications d'amélioration. Pour gagner du temps et éviter d'attendre d'autres années d'application avant d'obtenir ces informations, il s'avère nécessaire le recours aux modèles

permettant de prévoir la performance future des systèmes et les conséquences susceptibles de se déclencher suite à de la mise en place du nouveau programme. Ceci passe par la modélisation et la simulation d'un programme permettant aussi de laisser place à de possibles modifications ultérieures, en gris sur la figure III.2 [89].

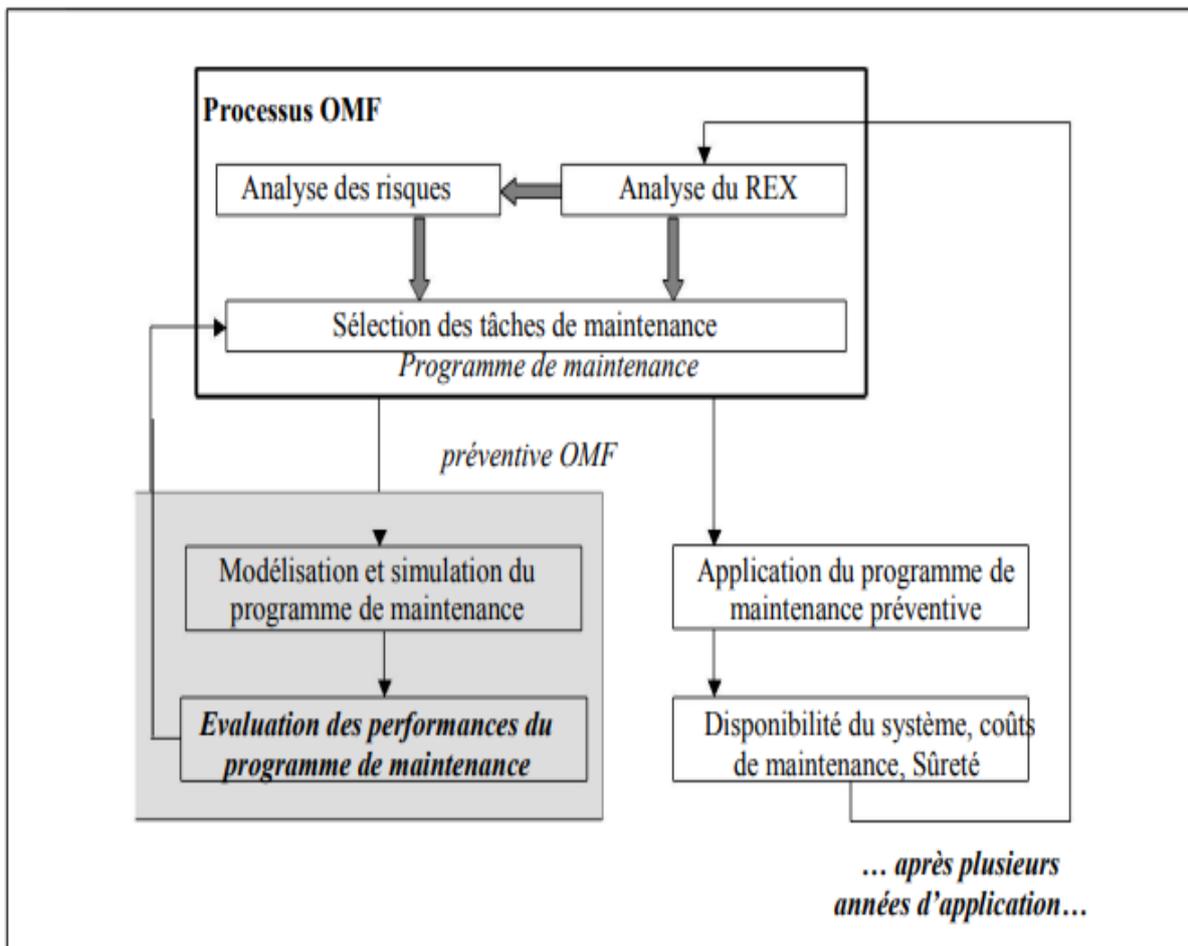


Figure III.2 L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF.

III.4. Définition des actions de maintenance à prévoir dans le plan

Afin de choisir les actions de maintenances appropriées, l'arbre décisionnel montré dans la figure III.3 peut être utilisé.

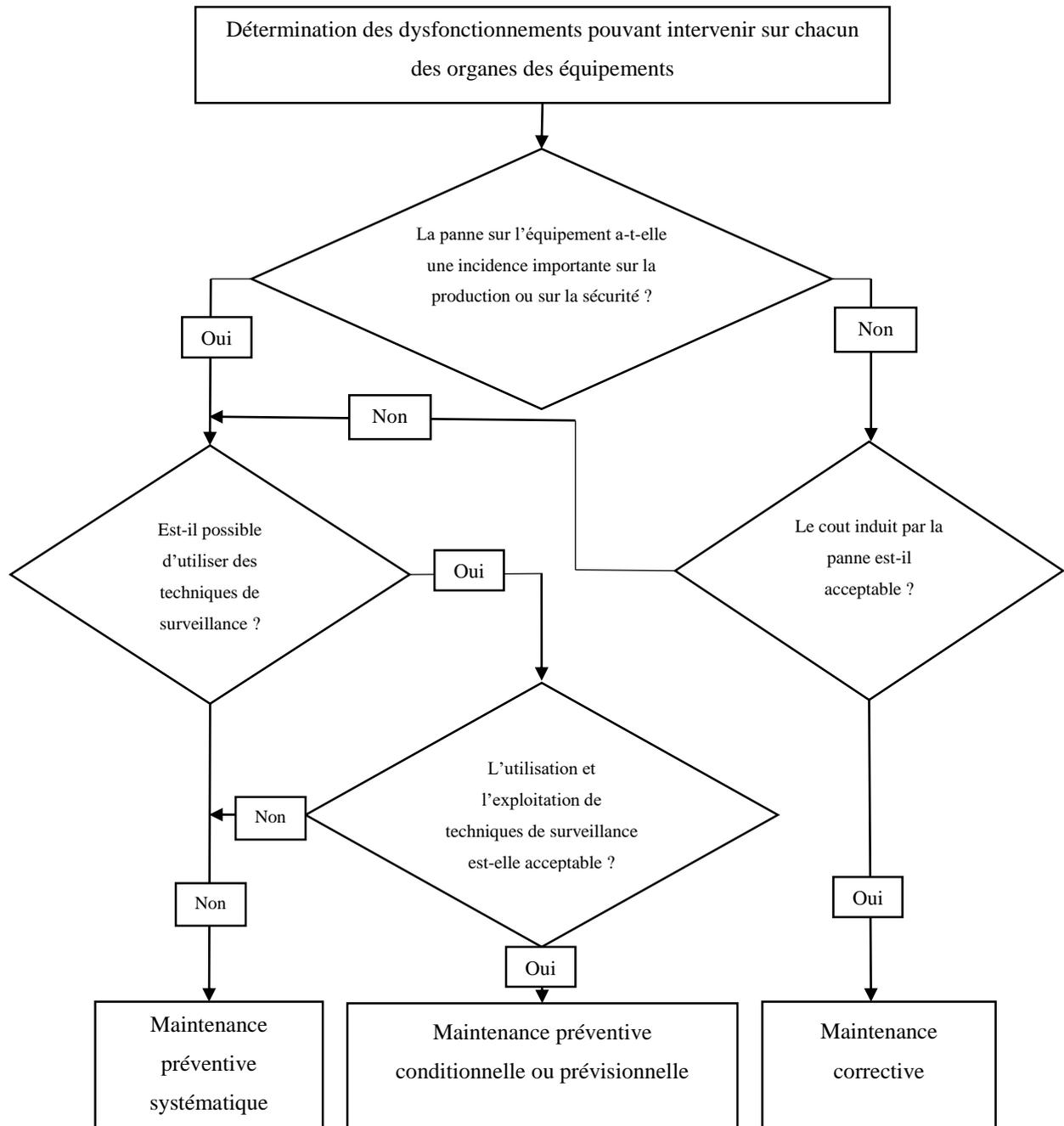


Figure III.3 Arbre décisionnel de définition des actions de maintenance [104].

L'arbre décisionnel de définition des actions de maintenance (figure III.3) sert à déterminer les types de maintenance à réaliser sur chaque composant et pour chaque type de défaillance [104].

III.5. Démarches de simulation de la périodicité de la maintenance préventive (MP)

L'optimisation de la fréquence de la maintenance préventive s'effectue généralement à l'aide des algorithmes pour une échelle de temps donnée. Ceci implique le recours à des logiciels informatiques tels que FORTRAN, MATLAB, etc., permettant de considérer un nombre important des répétitions.

La simulation de la maintenance préventive dépend du type d'échelle de temps ou d'horizon pour lequel nous voulons optimiser la périodicité. Par conséquent, les deux principales démarches de simulations sont présentées ci-dessous [21].

III.5.1. La simulation à une échelle de temps variable

Une échelle de temps variable est choisie dans le cas où aucun horizon n'est spécifié. La simulation à une échelle de temps variable est souvent appropriée pour les systèmes suivant un processus de renouvellement.

La simulation à une échelle de temps infinie est commencée par la génération d'un nombre pseudo aléatoire, x , qui représente les durées de défaillances associés à une loi de probabilité de défaillance prédéterminée. Ces temps simulés sont comparés avec un horizon L comme suit [21], [105] :

- Si $x < L$, le nombre des défaillances est incrémenté par 1 ;
- Si $x > L$, le nombre de défaillance prend sa dernière valeur et la simulation s'arrête.

Cette opération se fait pour $i=1000$ (ou plus) simulations et le coût moyen pour l'intervalle de MP est donné comme suit :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n=1000} K_i}{L} \quad \text{III-1}$$

Avec K_i est le coût moyen pour une seule simulation.

Ensuite, parmi une série d'intervalles (L_1, L_2, \dots, L_n), nous choisissons celui qui minimise le coût attendu par unité de temps. L'horizon ne s'appelle « horizon variable » que lorsqu'on fait cette variabilité des intervalles L de MP [21], [106], [107].

Chapitre III : Optimisation de la périodicité de la maintenance préventive systématique des systèmes

L'algorithme ci-dessous permet d'illustrer les étapes à suivre pour une simulation à une échelle de temps variable.

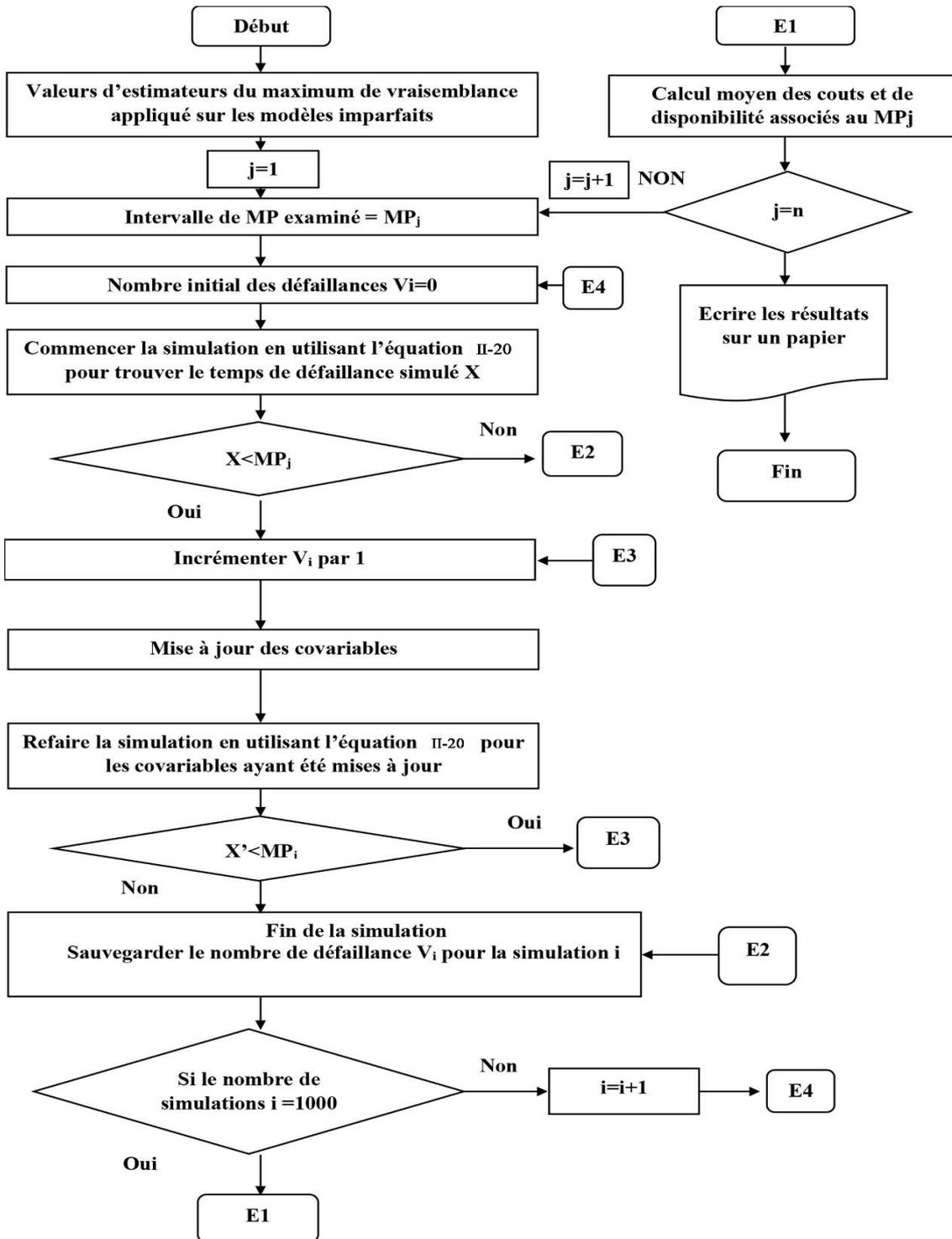


Figure III.4 Algorithme de simulation des MP à une échelle de temps variable [21].

Etant donné que notre approche d'optimisation se base sur la fiabilité, les paramètres du modèle de fiabilité considéré pour l'algorithme sont obtenus de l'approche du maximum de vraisemblance. Il ne reste pour pouvoir commencer l'algorithme d'optimisation que l'équation permettant de générer des temps de défaillance. Si on procède avec la loi log linéaire, nous commençons par l'instant t , le temps jusqu'à la prochaine défaillance à l'instant $t+x$ peut être déterminé en passant par la densité de probabilité de défaillance conditionnelle suivante :

$$\begin{aligned}
 f(x|t, \lambda(t)) &= \lambda_0(t+x) \left(\prod_{i=1}^{p(t)} P_i \right) \left(\prod_{j=1}^{c(t)} C_j \right) \exp(X'_t \gamma) \\
 &\times \exp \left\{ - \left(\int_t^{t+x} \lambda_0(u) du \right) \left(\prod_{i=1}^{p(t)} P_i \right) \left(\prod_{j=1}^{c(t)} C_j \right) \exp(X'_t \gamma) \right\} \\
 &= k_t \alpha \beta^{t+x} \exp \left\{ - \frac{k_t \alpha}{\log(\beta)} (\beta^{t+x} - \beta^t) \right\}, x > 0
 \end{aligned} \tag{III-2}$$

Avec le constant connu

$$k_t = \left(\prod_{i=1}^{p(t)} P_i \right) \left(\prod_{j=1}^{c(t)} C_j \right) \exp(X'_t \gamma) \tag{III-3}$$

A ce niveau de résolution, la méthode de la transformée inverse s'avère efficace pour générer des valeurs de temps de défaillance x en se basant sur la fonction de répartition de la défaillance de la loi log linéaire qui se donne par :

$$\begin{aligned}
 F(u|t, \lambda(t)) &= \int_0^x f(u|t, \lambda(t)) du \\
 &= k_t \alpha \beta^t \exp \left(\frac{k_t \alpha}{\log(\beta)} \right) \int_0^x \beta^u \exp \left(- \frac{k_t \alpha}{\log(\beta)} \beta^{t+u} \right) du \\
 &= 1 - \exp \left(- \frac{k_t \alpha}{\log(\beta)} (\beta^{t+x} - \beta^t) \right), \quad x > 0
 \end{aligned} \tag{III-4}$$

Si nous définissons $U(1,0)$ un nombre pseudo aléatoire (de loi uniforme) et nous réorganisons l'équation III-4, nous obtiendrons :

$$x = \log \left(1 - \frac{\log(\beta)}{k_i \alpha \beta^t} \log(p) \right) / \log(\beta) \quad \text{III-5}$$

C'est à partir de cette équation que nous pouvons générer des temps de défaillance aléatoires. Chaque valeur de temps trouvée doit être comparée avec la périodicité de la maintenance préventive sélectionnée au départ. Si cette dernière est supérieure à la valeur de temps aléatoire, les valeurs des covariables sont mises à jour et le temps jusqu'à la prochaine défaillance sera réexaminé. Ce processus continue jusqu'à ce que le temps de la défaillance suivante dépasse l'intervalle ou la périodicité de la maintenance préventive sélectionnée. Le nombre moyen de pannes (noté V_i dans l'algorithme de simulation) est compté sur $k = 1000$ (ou plus) simulations et le coût moyen par unité de temps pourra donc être estimé pour cet intervalle de MP. La simulation à une échelle de temps variable discuté ci-dessus peut être critiquée pour son critère. Fondamentalement, les coûts par unité de temps sont comparés entre eux sur des différentes échelles de temps. A cet effet, la programmation à une échelle de temps variable peut être substituée par la programmation à horizon fixe décrit ci-dessous [21].

III.5.2. La simulation à une échelle de temps (horizon) fixe

Dans cette échelle de temps fixe, la simulation est effectuée sur tout l'horizon h en accumulant les coûts de MP et de MC sur cette période. Dans ce modèle, on cherche à trouver la meilleure combinaison (équilibre entre MP et MC), sur l'horizon h , entre les différents cycles de MP simulés. Le nombre de défaillance sur chaque intervalle de MP est obtenu de la même façon que la programmation à horizon variable, cependant, sur chaque MP ou MC enregistrée dans la simulation, les covariables doivent se mettre à jours et le processus continu à simuler une autre MP jusqu'à la fin de l'horizon fixe [108]. Dans ce cas, l'horizon est fini et permet d'établir une politique de remplacement sur une période prédéfinie [21].

La figure III.5 représente l'algorithme de simulation des MP à horizon fixe.

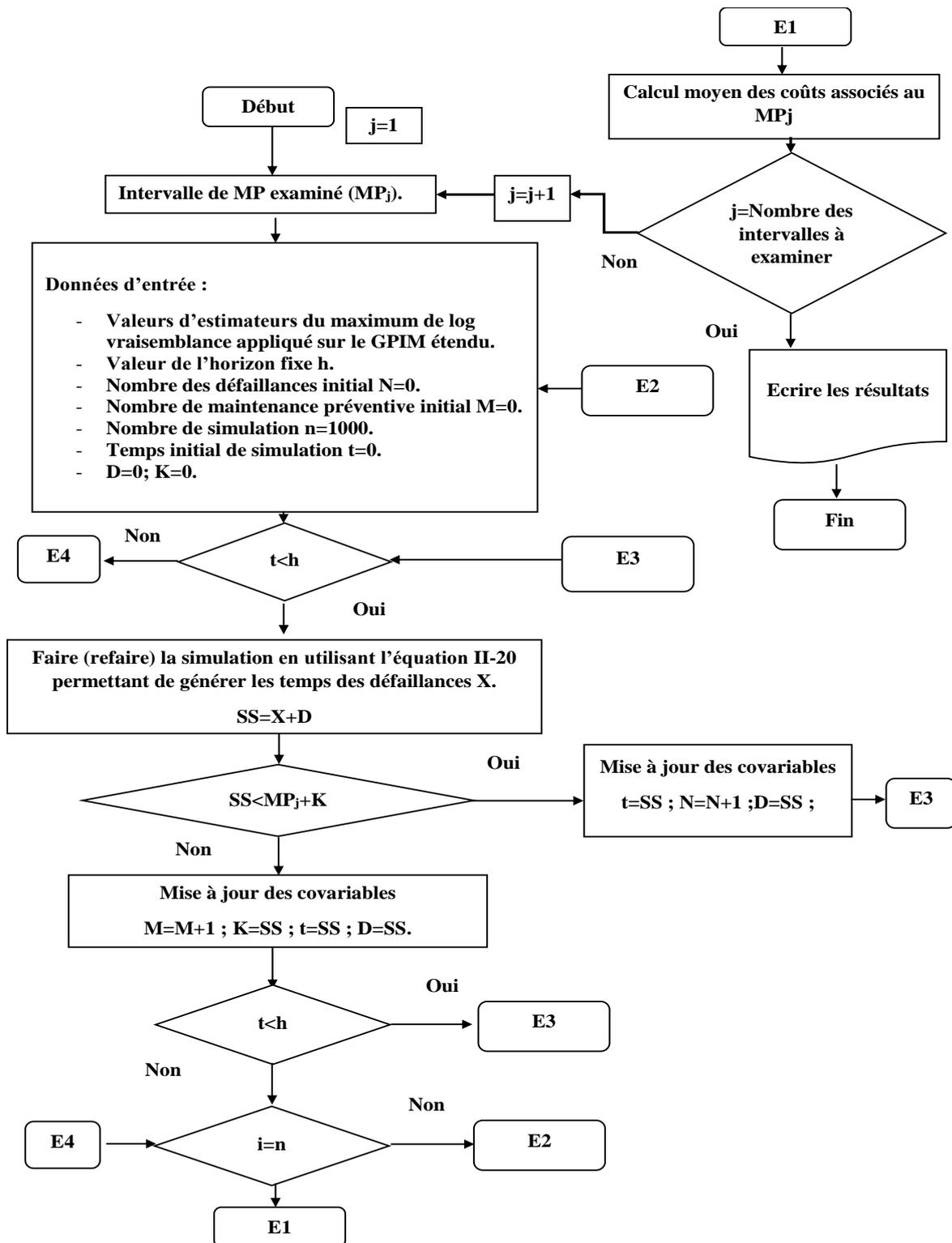


Figure III.5 Algorithme de simulation des MP à horizon fixe [21].

III.6. Conclusion

Après avoir discuté l'approche d'optimisation de la maintenance préventive basée sur la fiabilité, nous avons adopté la simulation à horizon fixe pour optimiser la périodicité de notre système d'étude. Ce type de simulation est approprié pour proposer la fréquence optimale des actions de maintenance préventive des systèmes ayant une durée de vie importante.

Dans le chapitre suivant, on s'est basé les résultats des modèles d'intensité proportionnelle généralisée (GPIM) pour optimiser la périodicité de la maintenance préventive (MP) des trois turbocompresseurs sur une échelle de temps fixe et prédéfini.

IV. Application sur un turbocompresseur d'une installation pétrolière

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, le système complexe réparable considéré est un turbocompresseur qui contribue à garantir la production d'une installation pétrolière située dans la région de Hassi Messaoud. Ce système est l'un des éléments principaux de l'unité TCF (Turbo-Compression-Facilities, unité de compression) ayant comme but la compression de gaz sec à une pression donnée afin d'être injecter dans les puits pour maintenir la pression du gisement et avoir du brut.

Dans cette partie d'étude, nous avons commencé tout d'abord par une modélisation du comportement de trois turbocompresseurs (train A, B et D), par des modèles fiabilistes tels que : le modèle d'intensité proportionnel (PIM) et le modèle d'intensité proportionnel généralisé (GPIM) permettant d'introduire les facteurs d'influence sur les systèmes étudiés. Ces facteurs représentent la température, la programmation des arrêts de maintenance, le temps entre les défaillances et l'effet des actions de maintenance corrective et préventive appliquées sur les systèmes.

Ensuite, nous avons optimisé la périodicité de la maintenance préventive en prenant comme critère d'optimisation les coûts des actions de maintenance exprimés par le nombre des barils perdus durant une intervention de maintenance sur le turbocompresseur.

IV.2. Description du turbocompresseur

Le turbocompresseur considéré se compose de deux parties essentielles :

IV.2.1. La turbine à gaz MS5002

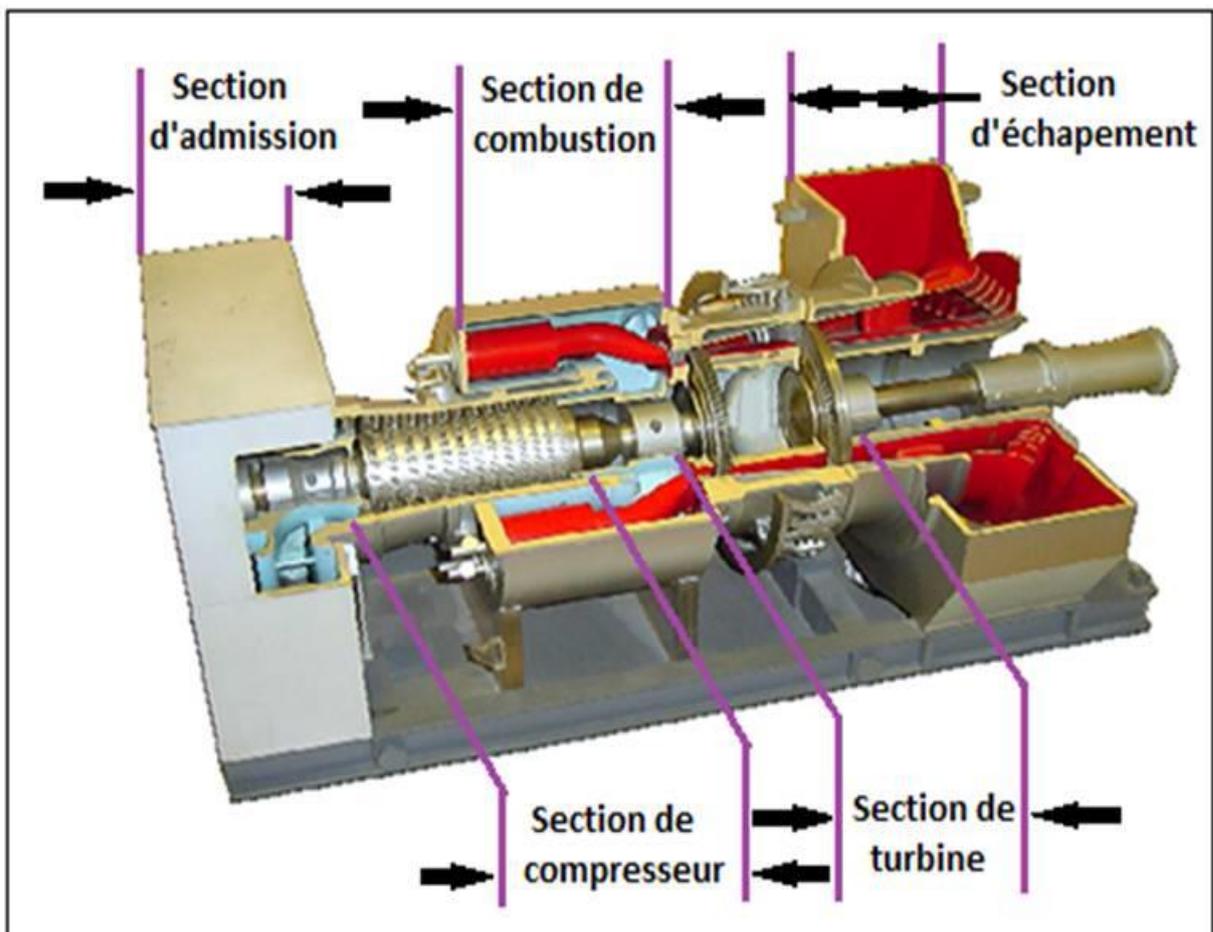
La turbine à gaz est un moteur à combustion interne, dont le rôle est la reconversion de l'énergie thermique due à la combustion d'un carburant en énergie mécanique qui sera transmise à l'aide d'un arbre rotatif à une charge mécanique (compresseur centrifuge, pompe, générateur, etc.). Les principaux composants de la turbine à gaz sont :

- La section de compression : caractérisée par 16 étages pour le model A, B et 17 étage pour le model D.

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

- La section de combustion (ensemble des chambres de combustion) : contient 12 chambres de combustion.
- La section turbine : assure la rotation de l'arbre par la roue HP (haute pression) et la roue BP (basse pression).
- La section d'échappement.

Les principales sections d'une turbine à gaz MS5002 sont présentées dans la figure suivante.



IV.1 Les sections principales d'une turbine à gaz MS 5002 [109].

IV.2.1.1. Comparaison entre les modèles des turbines A, B et D

Le tableau ci-dessous représente la différence entre les modèles des turbines A, B et D.

Tableau IV.1 La différence entre les turbines A, B et D.

Série du model	MS5002 A et B	MS5002 D
Rendement thermique	≈27,7%	29,4%
Vitesse de l'arbre BP	4670 tr/min	4670 tr/min
Section du compresseur	16	17
Température à l'échappement	516C°	509 C°
Commande	MARK V	MARK V
Puissance débitée	28340 KW	32580 KW
Débit à l'échappement	123.4 kg/s	141.4 kg/s
Température de combustion	966 °C	986 °C
la consommation spécifique	12470 kj/kwh	12240 kj/kwh

IV.2.2. Le compresseur BCL

La fonction de compression peut s'assurer par les compresseurs centrifuges de type BCL / 505, 404, 305 (NUOVO PIGNONE). Les lettres majuscules indiquent les caractéristiques du corps ; les lettres BCL indiquent un compresseur ayant un corps ouvert verticalement (corps du type en forme de « barrel »). Les numéros placés après les lettres indiquent le diamètre nominal et nombre des roues. Les compresseurs de type BCL ont été conçus pour comprimer les gaz à haute pression.

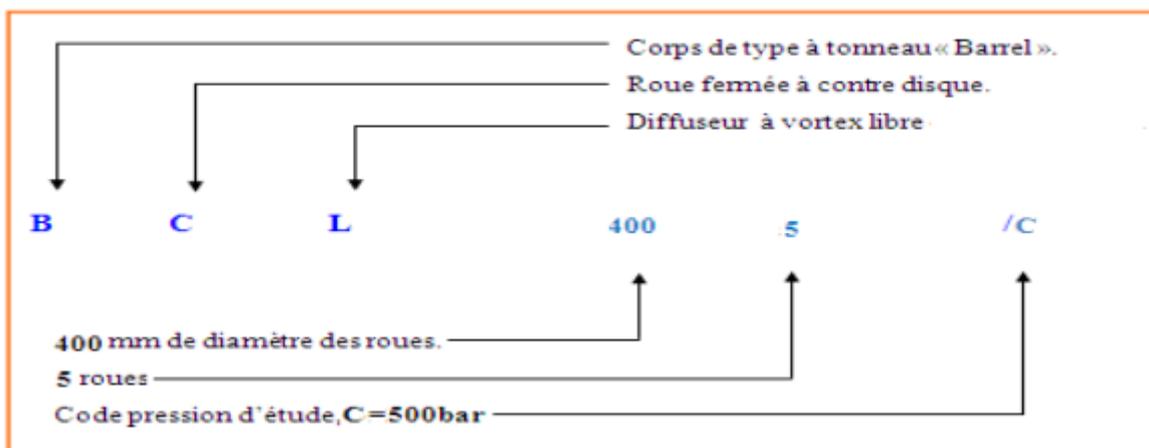


Figure IV.2 Codification du compresseur BCL 405/C (Nuovo pignone, SONATRACH).

La figure ci-dessous montre la composition générale d'un turbocompresseur.

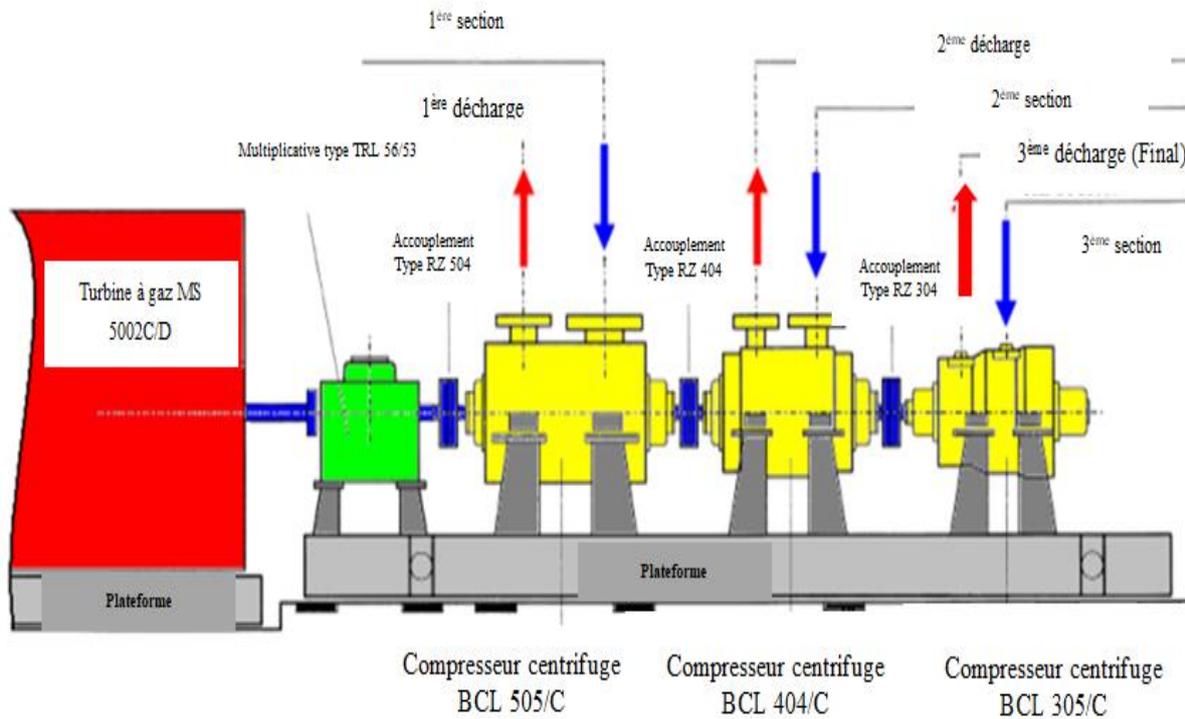


Figure IV.3 Vue général d'un train de compression (Nuovo pignone, SONATRACH).

IV.3. Choix du système

Le turbocompresseur constitue la solution technologique la plus favorisée et généralisée par SONATRACH pour résoudre le problème du chute de pression dans le gisement pétrolier du sud algérien. Grâce aux turbocompresseurs, la technique de réinjection du gaz comprimé permet d'avoir la quantité du brut suffisante pour atteindre l'objectif de production journalière. Cependant, le recours à ce type de système peut présenter un risque important se concrétisant par certaines défaillances critiques capables d'atteindre non seulement l'image de marque de l'entreprise, mais aussi la population, l'environnement et les matériels. Afin de montrer les phénomènes dangereux pouvant être déclenchés suites aux différentes défaillances sur les composants du turbocompresseur, nous avons proposé l'étude des dangers ci-dessous.

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

Tableau IV.2 Etude du danger du système étudié.

Evènement initiateur	Evènement Redouté Central	Phénomène Dangereux	Barrières mises en œuvre par Sonarco
Effet domino (Rupture du tuyau d'alimentation de l'épurateur d'huile du groupe diesel)	Fuite d'huile 5 bar sur une conduite en aval du compresseur dont la température de surface est de 400°C	Feu de jet entretenu par un débit d'huile dû à une pompe attelée au moteur diesel	Equipe d'intervention pour agir sur le sinistre et limiter les effets dominos.
Erreur opératoire (Sous tarage d'une soupape, et défaillance opération de jointage lors de maintenance)	Fuite au niveau de la bride de la soupape d'un turboalternateur (au moment du redémarrage)	Explosion et fuite Enflammée	Personnel formé. Procédures.
Détérioration des conduites d'huile de lubrification du turbocompresseur suite à une rupture sur l'arbre d'accouplement	Perte de confinement du circuit d'huile et présence de point chaud (parties chaudes du turbocompresseur)	Incendie	Capteurs de température et de vibrations sur la turbine entraînant son arrêt en cas de problème.
Déflagration sur le circuit d'huile du turbocompresseur	Perte de confinement du circuit d'huile	Incendie sur le turbocompresseur	Pas de barrière spécifique pour la déflagration. Capteur de niveau bas sur la caisse à huile de la turbine pour détecter la fuite.
Non connu	Fuite d'huile hydraulique utilisée sous pression et à haute température sur les parties chaudes de la turbine	Incendie sur la turbine à gaz	Niveau de détail de l'évènement initiateur insuffisant pour pouvoir conclure
Non connu	Fuite d'huile de lubrification au niveau de la garniture d'une turbine entraînant un compresseur	Incendie sur la turbine (inflammation de l'huile au contact des parties chaudes)	Niveau de détail de l'évènement initiateur insuffisant pour pouvoir conclure
Rupture des paliers d'une turbine sur un train Tournant	Fuite sur le circuit d'huile	Incendie sur la turbine (inflammation de l'huile au contact des parties chaudes)	Capteurs de température et de vibrations sur la turbine entraînant son arrêt en cas de problème.
Opération de régulation	Fuite d'huile de lubrification sur le réducteur mécanique de vitesse de la turbine	Incendie sur la turbine Eclatement de la turbine	Personnel formé. Procédures.
Erreur opératoire (fermeture inopinée d'une vanne de refoulement)	Montée en pression dans le casing de la turbine	Explosion du casing	Personnel formé. Procédures.

Dans ce cas, une approche d'optimisation de la maintenance préventive joue un rôle très important pour prévenir la survenance des défaillances et maintenir le bon fonctionnement du système.

IV.4. Politique de maintenance suivie par l'entreprise

L'exploitation d'un turbocompresseur de même que n'importe quelle machine tournante de puissance, doit comprendre un programme planifié d'inspections périodiques ainsi que le remplacement des pièces défectueuses, afin d'assurer une utilisation et une fiabilité maximales de la machine.

Un livre de suivi technique, contenant tous les travaux d'entretien et d'inspection effectués, est très précieux lors de l'établissement d'un bon programme d'entretien pour les turbocompresseurs. Ce programme d'entretien commence, en principe, par des travaux mineurs, et prend de l'importance au fur et à mesure qu'il se déroule, jusqu'à la révision générale, puis le cycle se répète. Les inspections peuvent être optimisées pour minimiser les temps d'arrêt du turbocompresseur ainsi que les coûts d'entretien.

Les inspections peuvent être distinguées comme suit :

- Inspections du système de combustion.
- Inspections de la veine des gaz chauds.
- Révision générale du turbocompresseur.

Tableau IV.3 L'intervalle de maintenance.

Types d'inspections	Intervalles aux conditions de référence (heures de fonctionnement)
Inspection de combustion	12000
Inspection de la veine des gaz chauds	24000
Révision générale	48000

IV.5. Modélisation de la fiabilité des turbocompresseurs

La modélisation de la fiabilité des turbocompresseurs a été faite sur la base du modèle non homogène de Poisson (NHPP) permettant de prendre en compte toute la durée de vie du système. Pour chaque turbocompresseur, la comparaison entre les modèles NHPP, PIM et GPIM permet de mettre en évidence la qualité d'ajustement de chaque modèle.

IV.5.1. Modélisation de la fiabilité du train B

L'historique des données représentant l'historique des pannes et les covariables qui ont été considérées pour le train B est montré sur le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4 Historique des pannes et des covariables du système étudié (turbocompresseur MS5002B)

N°	Date de défaillance	Description de la défaillance	TBF (jours)	Cumule de TBF (jours)	TTR (jours)	Covariables			Type de la maintenance
						Codage de la température	Codage de la programmation	Le temps entre les défaillances	
1	30-05-2002	Arrêt volontaire pour inspection compartiment turbine	111.85	111.85	5.15	1	0	112	MP
2	22-08-2002	SHUT DOWN 1h19min BY XA 6732 TURB.ACC Comp .FIRE Trip FAULT	78.05	189.9	0.63	1	1	78	MP
3	08-12-2002	Arrêt pour travaux CI Le baroscope a détecté des fissurations sur la directrice. Ce qui nécessite le HGPI.	108.23	298.13	55.74	0	1	108	MC
4	18-05-2003	Gear Box Inspection Des travaux d'alignement sont nécessaires avant la remise en marche du train	44.42	342.55	18.6	1	0	44	MP
5	23-08-2004	Arrêt normal pour travaux sur l'aero huile	505.44	847.99	2.02	1	0	505	MP
6	11-09-2004	Arrêt volontaire du train B	16.94	864.93	5.66	1	0	17	MP

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

		pour travaux CI							
7	20-09-2005	S/D HP Train B par TSHH6001A*/1B*(Très haute T° d'huile au niveau du collecteur de lubrification 26QT	367	1231.93	1.88	1	1	367	MP
8	05-10-2005	S/DOWN DU TRAIN B PAR TAHH TEMPERATURE HUILE DE LUBRIFICATION Déclenchement du HP Train B par défaut détection feu coté accouplement turbine	13.15	1245.08	4.81	1	1	13	MC
9	09-11-2005	Arrêt volontaire du train B pour inspection M.I	30.25	1275.33	194.92	0	0	30	MC
10	01-06-2006	S/DOWN HP TRAIN B PAR VAHH6502B VIB. RAD. ARBRE HP GEAR BOX	9.01	1284.34	0.27	0	1	9	MP
11	29-06-2006	Déclenchement train B par détection gaz sur chaîne de filtration AE 6258 B	27.38	1311.72	0.11	1	1	27	MC
12	08-07-2006	Arrêt Volontaire Du TRAIN HP/B; Travaux Sur Aeros huile	9.51	1321.23	1.09	1	0	10	MC
13	25-07-2006	21h 20mn S/D Train Injection B Très Basse Pression Huile Hydraulique 22h 45 mn S/D Train Injection B par perte flamme	16.09	1338.13	5.15	1	1	16	MP

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

		(défaut sur La GCV) Intervention des instrumentistes sur la GCV Négatif							
14	01-05-2007	S/D Détection feu compartiment	278.38	1616.51	0.63	1	1	278	MC
15	25-12-2007	Déclenchement par détection feu niveau turbine	237.12	1853.63	55.74	0	1	237	MC
16	17-02-2008	Arrêt volontaire pour CI	51.61	1905.24	18.6	0	0	52	MC
17	25-08-2008	S/D PAR DETECTION FEU COMPARTIMENT TURBINE	175.43	2080.67	2.02	1	1	175	MP
18	15-11-2008	S/D Arrêt -over speed electrical	78.8	2159.47	5.66	0	0	79	MC
19	05-12-2009	SD CI+	385.1	2544.57	1.88	0	0	385	MC
20	01-11-2010	Veuillez vérifier huff and buff chaîne de filtration, Défaut de 125 V DC pompe de secours (moteur ELEC, Arrêt volontaire HP/B pour travaux sur le system de détection de feu turbine	301.22	2845.79	4.81	0	0	301	MP

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

Le codage des covariables a été fait suivant deux façons différentes :

- Codage qualitative : La covariable qui représente la programmation (Pr) indique sur la manière avec laquelle l'arrêt du turbo compresseur a été réalisé. On prend l'état normale, codé dans la fonction d'influence $g(Z)$ par 0, lorsque on a l'arrêt du turbocompresseur est programmé (sinon, on considère l'effet de cette covariable en prenant le codage 1). Concernant la température (T), elle prend le codage 1 si la température ambiante est supérieure à 30 C°. Sinon, on suppose que cette dernière n'a pas d'influence sur le turbocompresseur.
- Codage quantitative : La dernière covariable représente le temps entre les défaillances (E) a été prise à l'état. Cette covariable permet de montrer la possibilité que le système se détériore rapidement après une intervention suite à un phénomène de rodage.

Afin de choisir la loi de probabilité la plus appropriée pour notre historique, une modélisation préliminaire a été faite entre le NHPP et le PIM en considérant la loi de puissance et la loi log linéaire. En utilisant le langage de programmation MATLAB et l'approche du maximum de vraisemblance (MLE), les résultats d'estimation des paramètres sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau IV.5 Estimation des paramètres des modèles.

Lois de probabilité	Modèles	Maximum de log-vraisemblance	Estimation des paramètres			
			$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	\hat{P}_r	\hat{t}
Loi de puissance	NHPP	-71.7	3.76E-4	0.33	/	/
	PIM	-68.59	4.96E-5	0.46	1.75	-0.089
		-71.19	3.31E-5	0.61	/	0.73
		-68.59	4.37E-5	0.47	1.71	/
Log linéaire	NHPP	-71.96	0.0029	1.0002	/	/
	PIM	- 68.38	4.088E-4	1.00063	1.93	0.037
		- 71.4	9.0633E-4	1.00059	/	0.91
		-68.38	4.182E-4	1.00062	1.94	/

La loi log linéaire avec le PIM représente une meilleure qualité d'ajustement avec la plus grande valeur du maximum de vraisemblance (-68.38). L'évolution de la fonction d'intensité

de la défaillance pour chaque loi de probabilité de défaillance (Loi de puissance et log linéaire) et pour la qui suivent.

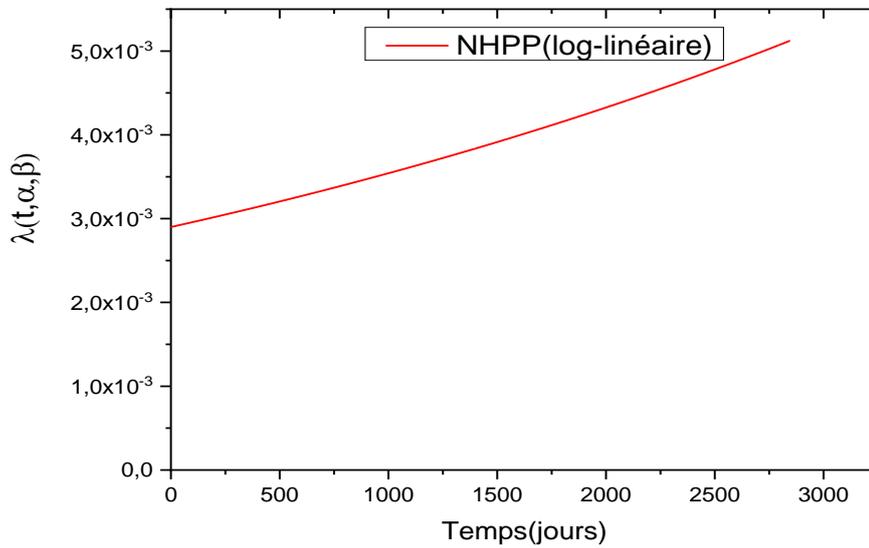


Figure IV.4 Evolution de la fonction d'intensité de la défaillance du NHPP avec la loi log linéaire.

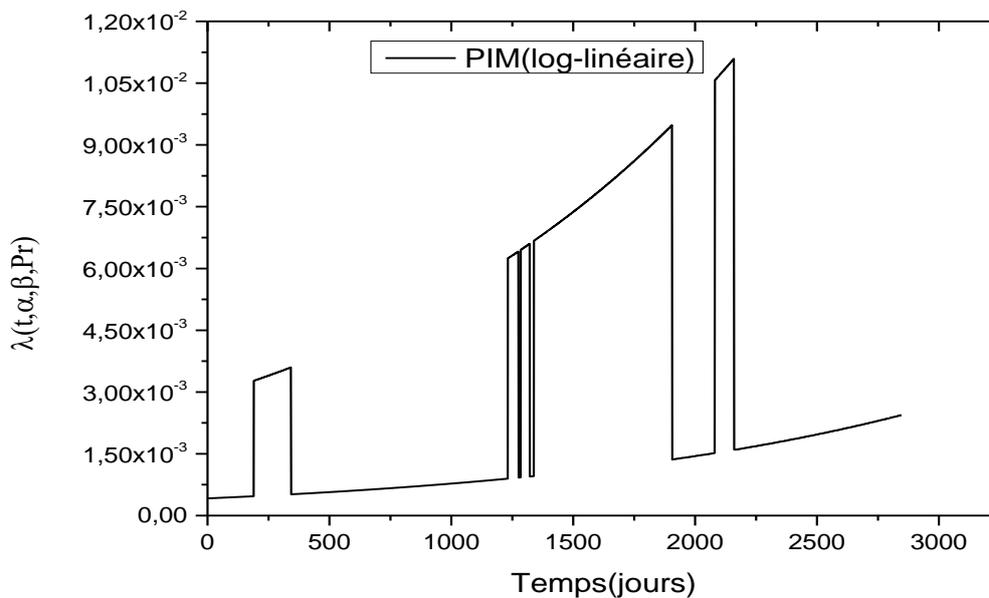


Figure IV.5 Evolution de la fonction d'intensité de la défaillance du PIM avec la loi log linéaire.

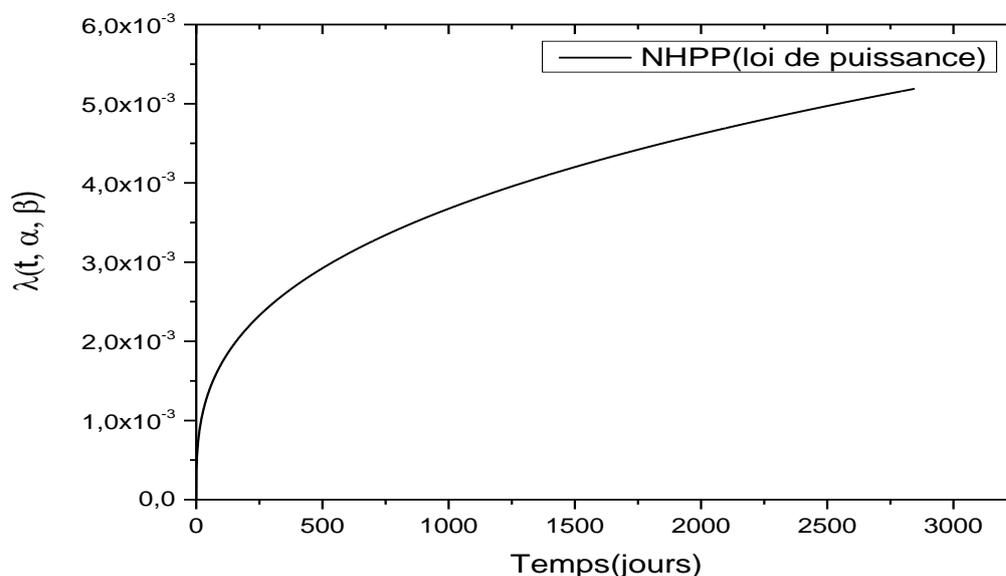


Figure IV.6 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP avec la loi de puissance.

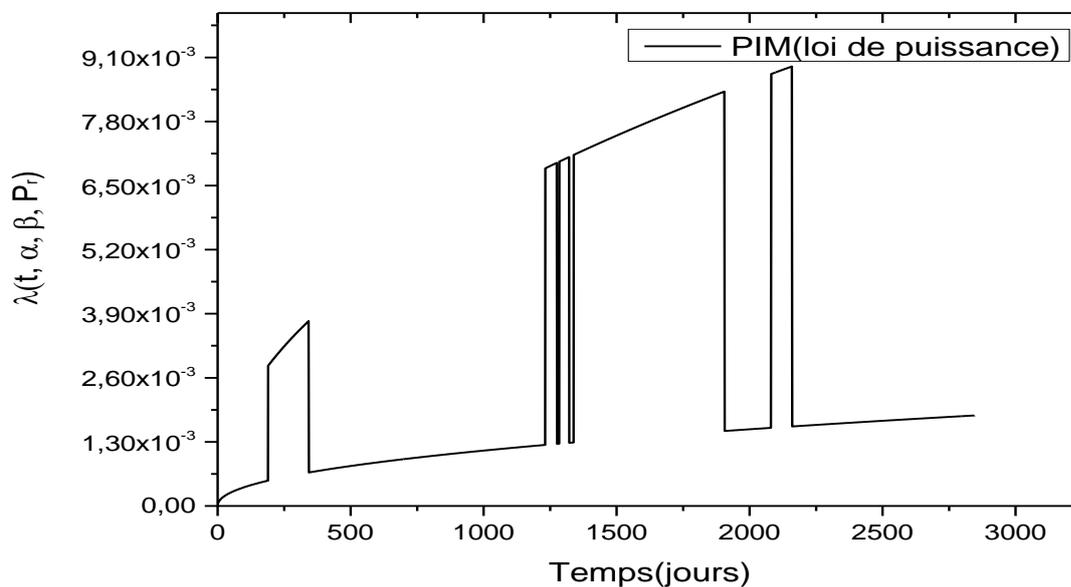


Figure IV.7 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM avec la loi de puissance.

On remarque que le NHPP ne donne pas beaucoup d'information sur les variations dans l'état du système. Cependant, le PIM indique sur l'effet des arrêts non programmés et permet de le considérer dans la fonction d'intensité de défaillance. Ceci signifie que cette covariable doit

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

se prendre en compte lors de l'optimisation de la politique de maintenance préventive en donnant plus de détail sur la prévision de l'arrêt du turbocompresseur.

Nous considérons maintenant les trois modèles NHPP, PIM et GPIM pour la loi log linéaire on trouve les résultats suivants :

Tableau IV.6 Estimation des paramètres des modèles.

Loi de probabilité	Modèles	Maximum de log-vraisemblance	Estimation des paramètres						
			$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	\hat{C}	\hat{P}	\hat{P}_r	\hat{T}	\hat{E}
Log linéaire	NHPP	-71.96	0.0029	1.0002	/	/	/	/	/
	PIM	-61.83	0.0018	1.0011	/	/	1.84	0.055	-0.0107
	GPIM	-58.39	6.54E-4	1.0058	0.54	0.599	2.39	-0.1189	-0.0108

Ces résultats montrent que :

- Selon la valeur du paramètre β , le système suit un comportement d'usure pour tous les modèles considérés ;
- Le GPIM donne la meilleure qualité d'ajustement avec la plus grande valeur du maximum de log-vraisemblance (-58.39).
- La valeur positive de la programmation indique un effet défavorable de cette covariable et reflète la mauvaise gestion des actions de maintenance ;
- La covariable représentant la température a donné une valeur négative en assurant que les conditions climatiques dans lequel travaille le système sont favorable et ne dégradent pas la performance du système ;
- De même, la covariable représentant le temps entre les défaillances confirme, avec sa valeur négative, que le système ne présente pas un comportement de rodage après l'exécution des interventions.
- Les valeurs des facteurs d'échelle multiplicatifs C et P du GPIM sont inférieurs à 1 et reflètent un effet favorable des actions de maintenance préventive et corrective.

Afin de confirmer le GPIM avec les covariables considérées comme meilleur modèle d'ajustement, nous faisons recours au test du rapport de vraisemblance pouvant se calculer dans notre cas comme suit :

$LR = -2 \times (-61.83 + 58.39) = 6.88$, la valeur du rapport de vraisemblance reflète, selon la distribution de khi-deux $\chi^2(2)$, un niveau de signification (p) de 0.033 qui est inférieur à 0.05.

L'évolution de la fonction d'intensité de défaillance pour les processus considérés avec la loi log linéaire est présentée dans les figures suivantes.

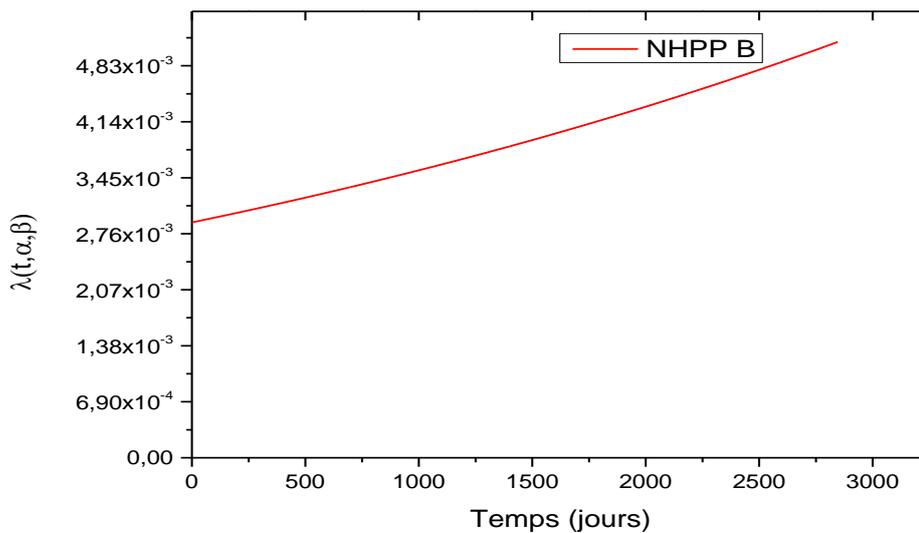


Figure IV.8 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.

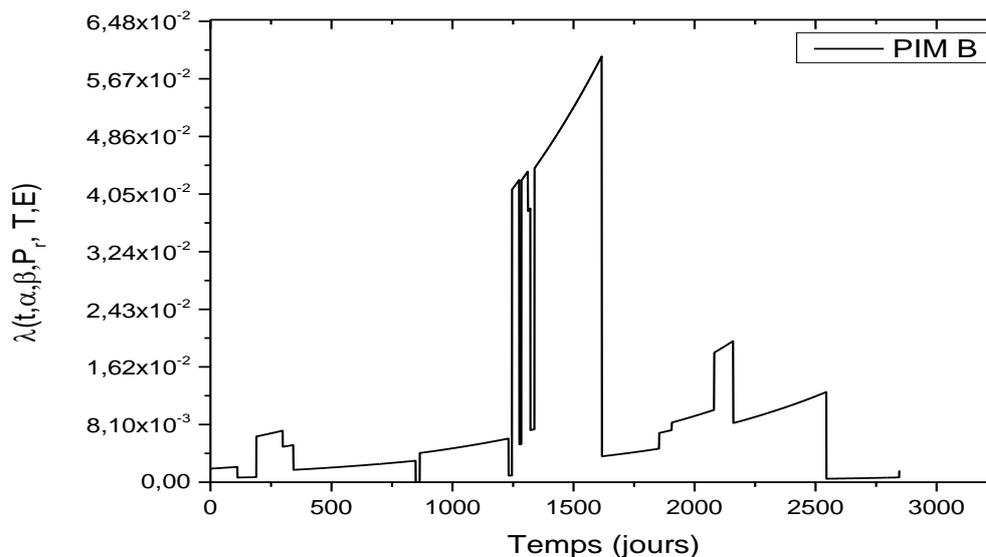


Figure IV.9 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.

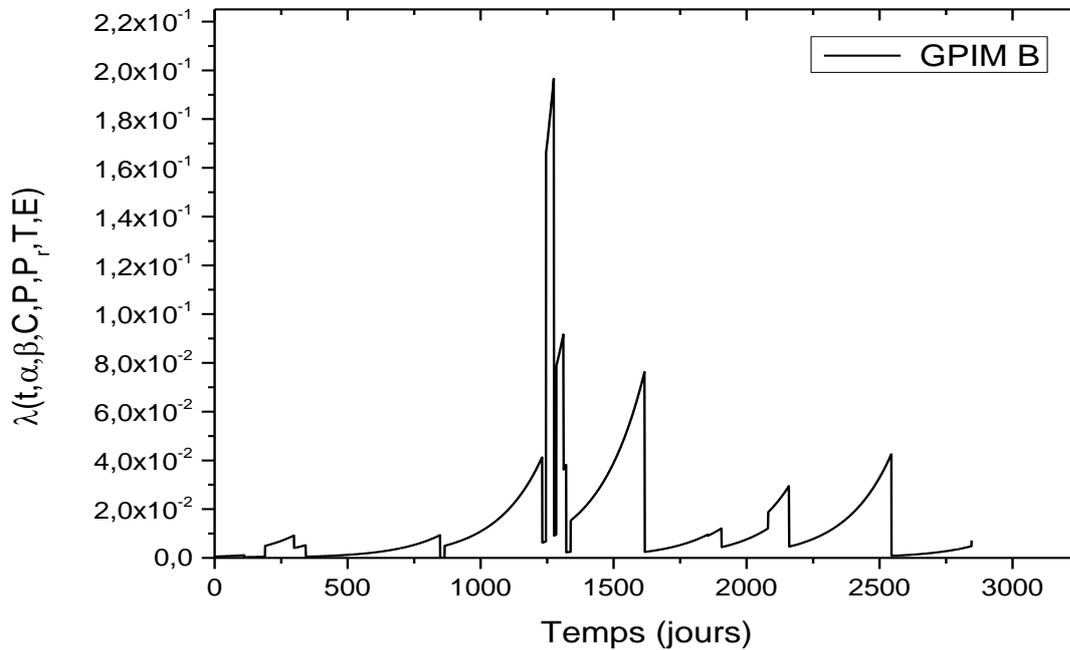


Figure IV.10 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.

On remarque que toutes les courbes de la fonction d'intensité de défaillance de tous les processus (NHPP, PIM et GPIM) reflètent un comportement d'usure. Ceci se conforme à la valeur du paramètre de forme β qui est supérieur à 1. De plus, les valeurs de l'intensité de la défaillance pour le NHPP ne tiennent pas en compte l'effet des covariables et des actions de maintenance. C'est pour cela que les valeurs de l'intensité de la défaillance du NHPP sont grandes par rapport à d'autres modèles.

Pour le PIM et le GPIM, le changement dans la valeur de l'intensité de défaillance après chaque action de maintenance montre l'effet favorable ou défavorable des covariables et des actions de maintenance.

IV.5.2. Modélisation de la fiabilité du train A

Une modélisation de la fiabilité pour un autre turbocompresseur, ayant les mêmes caractéristiques par rapport au premier, a été effectuée en suivant la même démarche. L'historique considéré du turbocompresseur A est présenté sur le tableau suivant.

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

Tableau IV.7 Historique des pannes turbocompresseur MS 5002A avec ses covariables.

N°	Date de défaillance	Description de la défaillance	TBF (jours)	Cumule de TBF (jours)	TTR (jours)	Covariables			Type de la maintenance
						Codage de la température	Codage de la programmation	Le temps entre les défaillances	
1	06/02/2004	Investigation sur le déclenchement	5.89	5.89	1	0	1	6	MC
2	03/04/2004	Inspection (CI+) & travaux sur gear box	56,67	62.56	108	0	0	57	MC
3	07/09/2004	Étanchéité des fuites de gaz	49.89	112.45	1	1	1	50	MP
4	18/01/2005	Défaut sur MKV	0.53	112.98	1	0	1	1	MC
5	17/03/2005	Arrêt volontaire pour travaux	57,79	170.77	5	0	0	58	MC
6	27/05/2005	Intervention sur bleed valves du compresseur axial	67,46	238.23	2	1	1	67	MP
7	30/06/2005	TAHH6024 TEMPERATURE RETOUR D'HUILE	33,09	271.32	2	1	1	33	MC
8	11/07/2005	HAUTE TEMPERATURE RETOUR HUILE GEAR BOX	10,4	281.72	1	1	1	10	MC

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

9	11/12/2005	PDHH 6555 HAUTE TEMPERATURE RETOUR HUILE GEAR BOX	152,83	434.55	1	0	1	153	MC
10	29/01/2006	Intervention sur déclenchement	48,46	483.01	4	0	1	48	MC
11	01/09/2006	Inspection (CI) et changement des filtres d'air	212,19	695.2	10	1	0	212	MC
12	11/09/2006	Déclenchement par underspeed arbre LP	0,94	696.14	2	1	1	1	MP
13	17/09/2006	Déclenchement général par très basse pression air instrument	5,64	701.78	2	1	1	6	MC
14	01/11/2006	Travaux sur la chaîne de filtration d'air	44,07	745.85	10	1	0	44	MC
15	11/11/2006	Perturbation sys fuel gas et problème moteur de lancement	0,26	746.11	116	0	1	0.3	MP
16	09/03/2007	Low Speed	2,4	748.51	2	0	1	2	MC
17	11/03/2007	Arrêt volontaire	0,46	748.97	24	0	0	0.5	MC
18	02/05/2007	Détection feu	28,72	777.69	1	1	1	29	MP
19	10/05/2007	Défaut transmetteur 2ème étage	7,28	784.97	2	1	1	7	MC

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

20	06/07/2007	Excessive combustion trouble	56,74	841.71	1	1	1	57	MC
21	08/10/2007	Coupure de courant	93,54	935.25	1	1	1	94	MC
22	18/11/2007	Underspeed	40,72	975.97	1	0	1	41	MC
23	03/12/2007	Bleed valve	14,65	990.62	2	0	1	15	MC
24	15/10/2008	Arrêt volontaire	315,67	1306.29	14	1	0	316	MC
25	19/12/2008	Révision générale de la turbine (MI)	52,42	1358.71	168	0	0	52	MP
26	04/06/2009	Arrêt volontaire	0,46	1359.17	3	1	0	0.5	MP
27	12/06/2009	Défaut PLC	6,47	1365.64	1	1	1	6	MP
28	19/08/2009	Arrêt volontaire	67,83	1433.47	22	1	0	68	MC
29	26/10/2009	Déclenchement	47,42	1480.89	1	0	1	47	MP
30	01/11/2009	Arrêt volontaire	5,88	1486.77	1	0	0	6	MC
31	03/11/2009	Arrêt volontaire	1,54	1488.31	2	1	0	2	MP
32	20/11/2009	Déclenchement	16,71	1505.02	3	0	1	17	MP
33	27/12/2009	Déclenchement	35,45	1540.47	2	0	1	35	MC

L'estimation des paramètres des modèles NHPP, PIM et GPIM par l'utilisation du langage de programmation MATLAB, en s'appuyant sur l'approche du maximum de vraisemblance, nous a donné les résultats suivants :

Tableau IV.8 Estimation des paramètres des modèles.

loi de probabilité	Modèles	Maximum de log-vraisemblance	Estimation des paramètres						
			$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	\hat{C}	\hat{P}	\hat{P}_r	\hat{T}	\hat{E}
Log linéaire	NHPP	-119.6	0.0174	0.999	/	/	/	/	/
	PIM	-93.91	0.0288	0.999	/	/	1.9883	-0.0865	-0.0356
	GPIM	-90.86	0.012	1.0067	0.78	0.5834	2.7742	-0.0285	-0.0314

Nous remarquons que le GPIM a donné le meilleur modèle d'ajustement avec une grande valeur du maximum de vraisemblance (-90.86) et avec un rapport de vraisemblance $LR = -2 \times (-93.91 + 90.86) = 6.1$ donnant un niveau de signification $p = 0.047 < 0.05$. En effet, les valeurs des paramètres pour ce modèle ont donné la même signification que la première modélisation. Ceci peut s'interpréter par le fait que les deux turbocompresseur travaillent dans les mêmes conditions et représentent le même modèle de turbocompresseur (les mêmes caractéristiques techniques).

L'évolution de la fonction d'intensité de défaillance du turbocompresseur A pour les modèles considérés est représentée dans les figures suivantes.

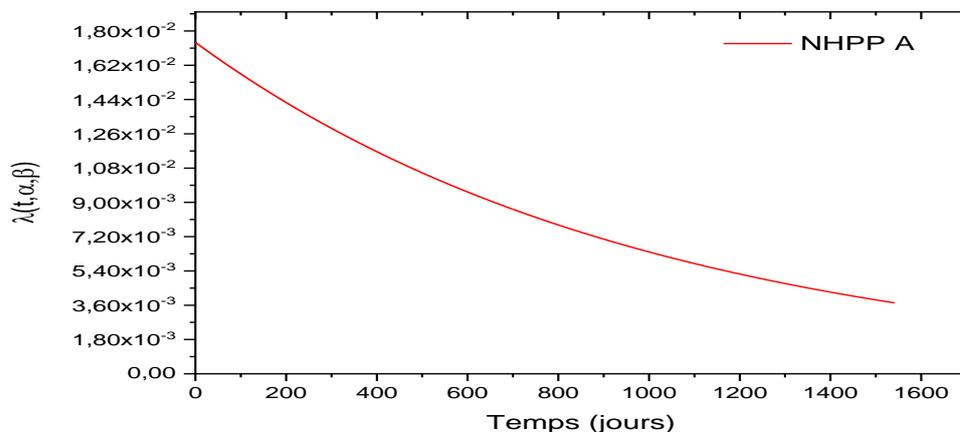


Figure IV.11 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.

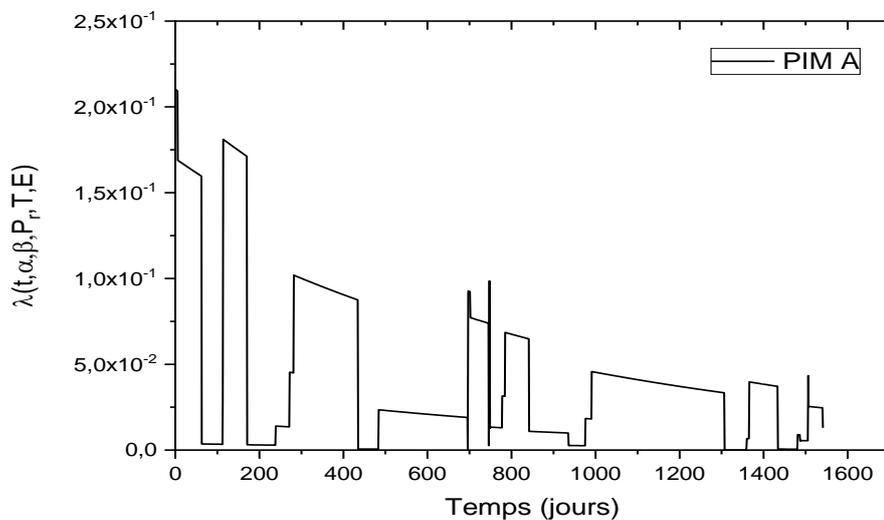


Figure IV.12 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.

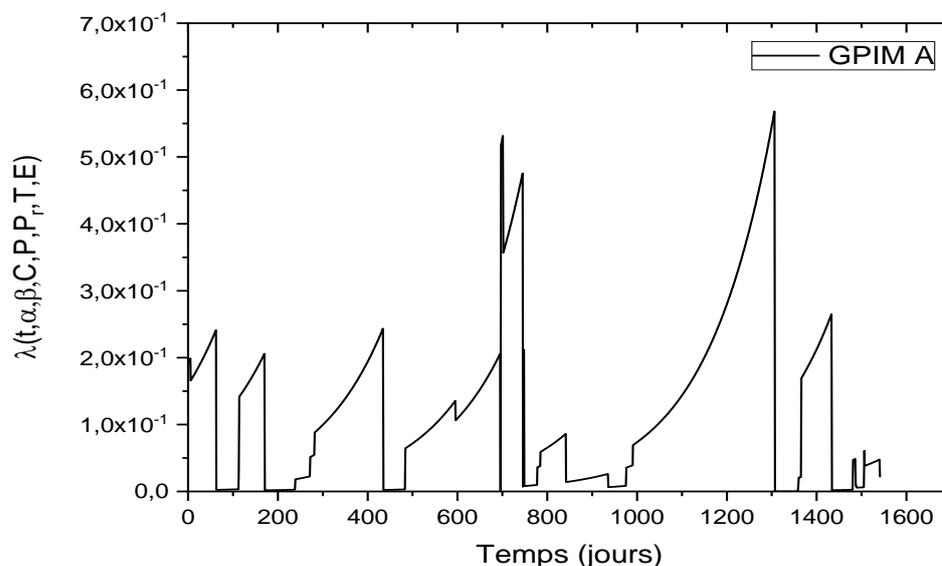


Figure IV.13 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.

Les allures de la fonction d'intensité de défaillance se comportent différemment entre le GPIM et les autres processus car la valeur du paramètre de forme β est inférieure à 1 pour le NHPP et le PIM. Cependant, on considère les valeurs du GPIM ayant donné le meilleur modèle d'ajustement avec une valeur de β supérieure à 1.

IV.5.3. Modélisation de la fiabilité du train D

La modélisation dans cette partie considère un autre type de turbocompresseur ayant des caractéristiques différentes par rapport aux deux autres premiers. Ce turbocompresseur présente une capacité de compression la plus élevée et permet de satisfaire les objectifs de la production pétrolière de l'entreprise.

La même démarche de modélisation suivie précédemment a été considérée pour l'historique suivant.

Tableau IV.9 Historique des pannes du turbocompresseur D avec ses covariables.

N°	Date de défaillance	Description de la défaillance	TBF (jours)	Cumule de TBF (jours)	TTR (jours)	Covariables			Type de la maintenance
						Codage de la température	Codage de la programmation	Le temps entre les défaillances	
1	06-02-2004	Déclenchement	36.98	36.98	1	0	1	37	MC
2	25-03-2004	Déclenchement Train inj D par excessive combustion trouble	47.44	84.42	2	1	1	47	MC
3	17-06-2004	Arrêt volontaire pour travaux sur nozzle	83.27	167.69	4	0	0	83	MC
4	29-09-2004	ARRÊT VOLONTAIRE SUITE FISSURE SUR LIGNE GAZ	101.06	268.75	3	0	0	101	MC

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

		D'ETANCHEITE 3e ETAGE							
5	06-10-2004	Arrêt pour CI+ et changement du gearbox	5.14	273.89	62	1	0	5	MP
6	08-12-2004	S/D delta P buffer Gas	2.07	275.96	10	0	1	2	MC
7	24-12-2004	SD	7.49	283.45	1	0	1	7	MC
8	03-01-2005	Arrêt toujours à cause de la garniture mécanique	9.23	292.68	36	0	1	9	MC
9	31-08-2005	SD	204.83	497.51	6	1	1	205	MC
10	24-09-2005	Arrêt volontaire HP Train D pour travaux	19.25	516.76	34	1	0	19	MP
11	16-12-2005	Inspection du Gear Box	50.28	567.04	2	0	0	50	MP
12	24-04-2006	S/D TRAIN D PAR DETECTION FEU COMPARTIMENT TURBINE	127.87	694.91	5	0	1	128	MC
13	01-07-2006	Arrêt volontaire Train D pour travaux	64.32	759.23	2	1	0	64	MP
14	17-09-2006	Déclenchement général par	77.06	836.29	2	1	1	77	MC

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

		très basse pression air instrument							
15	25-10-2006	Déclenchement du train Inj. D par alarme VAHH 6508DY vibration radial palier porteur comp. 3. etage	37.52	873.81	1	1	1	38	MC
16	26-12-2006	Déclenchement train inj D par PDAH 6577D	61.9	935.71	1	0	1	62	MC
17	27-12-2006	Déclenchement du train D par très haute pression différentielle PDAH6577D du filtre buffer gas 3. Etage.	0.94	936.65	1	0	1	1	MC
18	31-01-2007	S/D Train D détection gaz	9.01	970.97	3	0	1	34	MC
19	15-02-2007	Arrêt volontaire Train D pour inspection Gear Box	27.38	984.29	571	0	0	13	MP
20	09-09-2008	SD PAR T° PALIER BUTEE COMP BCL404	9.51	986.78	2	1	1	2	MC
21	12-09-2008	SD	16.09	988.94	1	1	1	2	MC
22	19-10-2008	PLANT SD	278.38	1025.23	7	1	0	36	MP

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

23	20-12-2008	DECLENCHEMENT PAR FULL VENT TRIP	237.12	1081.54	1	0	1	56	MC
24	15-01-2009	Arrêt volontaire SHUTDOWN	51.61	1106.96	34	0	0	25	MP
25	02-03-2009	S/D haute T° huile de lubrification	175.43	1119.87	4	0	1	13	MC
26	21-05-2009	ARRET VOLONTAIRE	78.8	1197.31	2	1	0	77	MP
27	02-06-2009	ARRET VOLONTAIRE	385.1	1208.13	38	1	0	11	MP
28	22-07-2009	ARRET VOLONTAIRE	301.22	1220.42	6	1	0	12	MP

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

L'estimation des paramètres nous a donné les valeurs présentées dans le tableau suivant.

Tableau IV.10 Estimation des paramètres des modèles.

Loi de probabilité	Modèles	Maximum de log-vraisemblance	Estimation des paramètres						
			$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	\hat{C}	\hat{P}	\hat{P}_r	\hat{T}	\hat{E}
Log linéaire	NHPP	-85.28	0.0112	1.0003	/	/	/	/	/
	PIM	-74.01	0.0169	0.9999	/	/	1.8744	-0.0089	-0.0237
	GPIM	-70.78	0.008	1.0032	1.3287	0.2769	1.4266	0.4063	-0.0254

Le GPIM donne toujours le meilleur modèle d'ajustement avec la valeur du maximum de vraisemblance -70.78 et avec le rapport de vraisemblance $LR = -2 \times (-74.01 + 70.78) = 6.46$ donnant le niveau de signification $p=0.039 < 0.05$.

Dans la modélisation du turbocompresseur D on remarque que le GPIM a donné les mêmes valeurs des paramètres à l'exception de deux paramètres :

- **La covariable représentant la température T :** Contrairement aux deux premières modélisations, sa valeur est supérieure à 0 et reflète un effet négatif de la température sur le bon fonctionnement du système. Ceci peut s'expliquer par la charge exercée sur ce compresseur qui constitue le système le plus important dans la station de compression sur la base duquel une quantité importante du brut est assurée.
- **Le facteur d'échelle multiplicatif C :** qui a pris une valeur supérieure à 1 en reflétant une mauvaise efficacité des actions de maintenance corrective. Ceci nous a motivé de faire une optimisation de la périodicité de la maintenance préventive dont le but de diminuer le nombre des actions de maintenance corrective ou bien assurer un équilibre entre les deux types des actions de maintenance (MP et MC).

L'évolution de la fonction d'intensité de défaillance des modèles considérés pour le turbocompresseur D est présentée dans les figures suivantes.

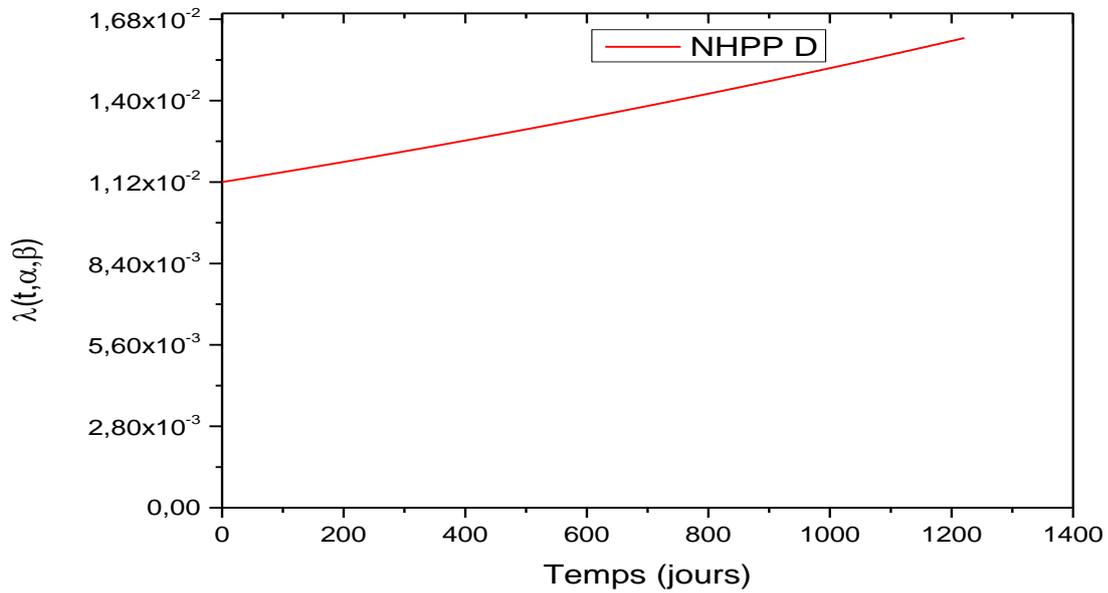


Figure IV.14 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du NHPP.

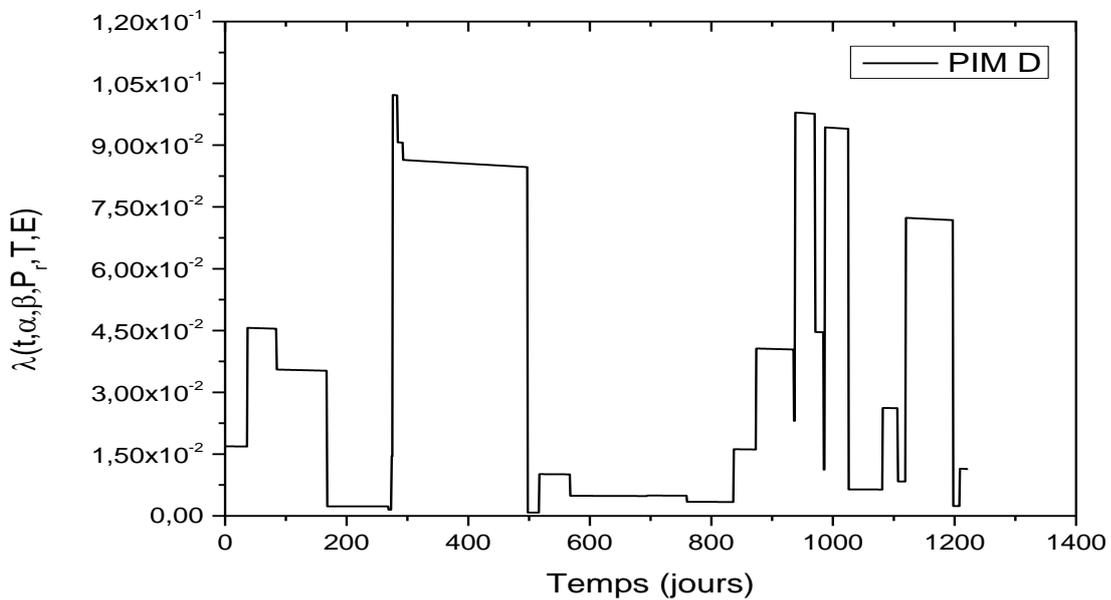


Figure IV.15 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du PIM.

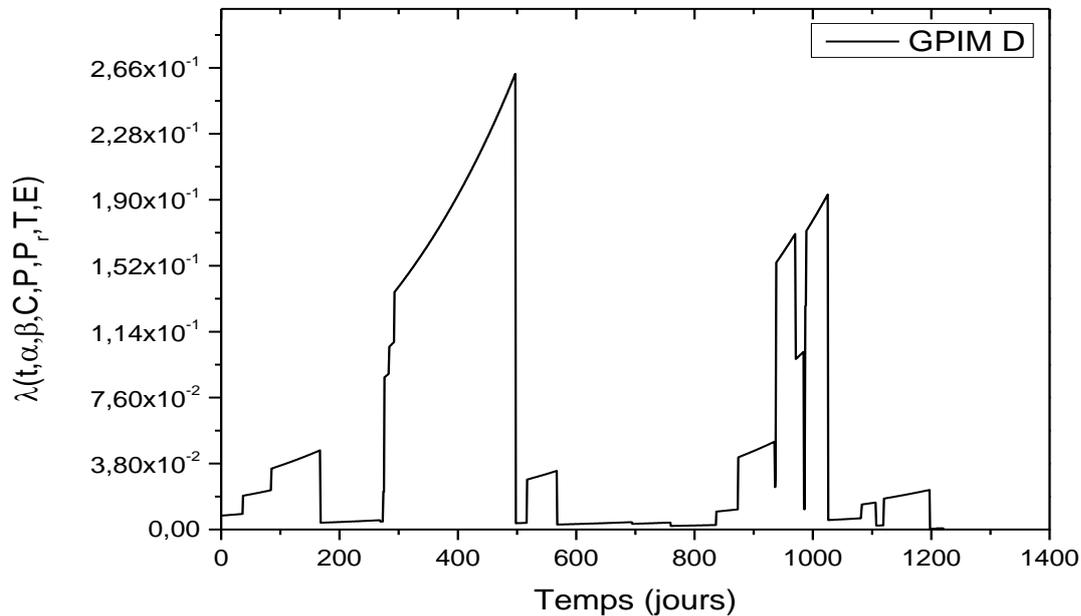


Figure IV.16 Evolution de la fonction d'intensité de défaillance du GPIM.

IV.6. Optimisation de la périodicité de la maintenance préventive systématique des turbocompresseurs B, A et D

Etant donné que les valeurs du paramètre d'échelle multiplicatif de la maintenance préventive "P" sont inférieures à 1 pour toutes les modélisations de la fiabilité des turbocompresseurs avec le GPIM, une approche d'optimisation de la périodicité de la maintenance préventive peut être engagée. Cette approche nécessite de préciser l'échelle de temps et le critère sur lesquels l'optimisation sera effectuée. Pour notre système, nous avons proposé une échelle de 10 ans proportionnellement à l'historique des pannes et un critère économique ayant une relation directe avec la fonction des turbocompresseurs consistant à assurer la quantité journalière suffisante du brut. L'unité de ce critère économique a été exprimée par le nombre de barils perdus par jours en mettant son équivalence en dinar algérien. Le tableau suivant donne les coûts associés à une action de maintenance préventive et corrective pouvant effectuée sur les turbocompresseurs.

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

Tableau IV.11 Coûts moyens d'une action de maintenance.

	Coûts moyen de l'action de maintenance (Barils/ (MC ou MP))		
	Turbocompresseur A	Turbocompresseur B	Turbocompresseur D
Pour une action de maintenance préventive	156750	190000	42750
Pour une action de maintenance corrective	33250	14250	19000

L'approche suivie dans notre travail fait appel à l'algorithme d'optimisation à une échelle fixe et à l'équation du coût qui ont été présentés dans le **chapitre III**. En se basant sur le langage de programmation MATLAB, les estimateurs du maximum de vraisemblance du GPIM, ayant représenté le meilleur modèle d'ajustement, doivent s'utiliser comme données d'entrée. La simulation de la périodicité de la MP a été considérée pour plusieurs fréquences de la MP dont chacune reflète le coût moyen des nombreuses répétitions. L'objectif de la simulation est de minimiser la fonction du coût en fonction du nombre des actions de maintenance préventive et correctives.

Les résultats des coûts moyens de la simulation pour les différents intervalles de temps considérés pour les trois turbocompresseurs sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau IV.12 Nombre moyen des barils perdus sur une échelle de 10 ans pour les différents intervalles de MP.

Intervalle de MP (jours)	Nombre moyen des barils perdus/10ans		
	Train A	Train B	Train D
100	6919865	7944243.81	1727018.74
200	4203252.01	4093065.29	947098.11
300	3192275.78	2800023.83	671810.14
350	2891566.99	2431130.24	588117.53
400	2661699.44	2163793.27	526148.13

Chapitre IV : Application à un turbocompresseur des installations pétrolières

450	2477648.69	1954845.06	475001.83
500	2333486.96	1794615.56	434338.15
600	2100852.7	1565865.44	371481.11
700	1916894.6	1419869.95	326988.92
800	1787270.39	1302768.12	293985.48
900	1683951	1242115	267245.17
1000	1613476.71	1146748.51	246316.87
1100	1551290.55	1076487.06	228441.98
1200	1496002.15	1097166.72	214287.26
1300	1442030.77	1069372.3	202236.51

L'équivalence de ces résultats en dinar algérien est présentée dans le tableau suivant.

Tableau IV.13 Coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans selon les intervalles de MP pour les trois Train A, B et D.

Intervalle de MP (jours)	Coûts moyen en DA/10ans		
	Train A	Train B	Train D
100	1.25E10	1.43E10	3.11E9
200	7.57E9	7.37E9	1.7E9
300	5.75E9	5.04E9	1.21E9
350	5.2E9	4.38E9	1.06E9
400	4.79E9	3.89E9	9.47E8
450	4.46E9	3.52E9	8.55E8
500	4.2E9	3.23E9	7.82E8
600	3.78E9	2.82E9	6.69E8
700	3.45E9	2.56E9	5.89E8
800	3.22E9	2.34E9	5.29E8
900	3.03E9	2.24E9	4.81E8
1000	2.9E9	2.06E9	4.43E8
1100	2.79E9	1.94E9	4.11E8
1200	2.69E9	1.97E9	3.86E8
1300	2.6E9	1.92E9	3.64E8

On remarque que les meilleures fréquences de la maintenance préventive peuvent être situées entre 900 et 1200 jours à partir desquels les coûts moyens commencent à être constants. Cependant, une prolongation dans la période de la MP au-delà de 1200 jours sera inutile parce que nous risquons de mettre le système en état critique sans avoir des revenus considérables.

De plus, les résultats des coûts moyens pour les turbocompresseurs A et B présentent la même tendance des coûts en prenant toujours un chiffre de même puissance (ordre). Ceci peut être interprété par la dépendance de cette optimisation des résultats de la modélisation de la fiabilité dans laquelle on a trouvé un effet similaires des covariables sur le comportement des deux turbocompresseurs A et B. Les courbes des coûts moyens en dinar algérien sur une échelle de 10 ans pour les turbocompresseurs A et B sont présentées ci-dessous.

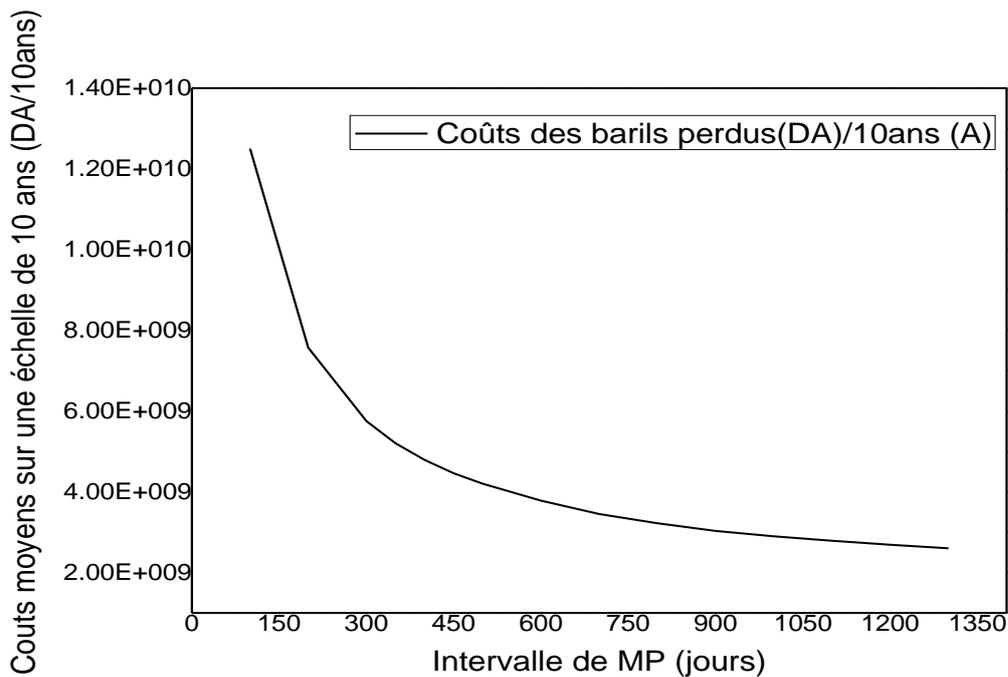


Figure IV.17 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train A.

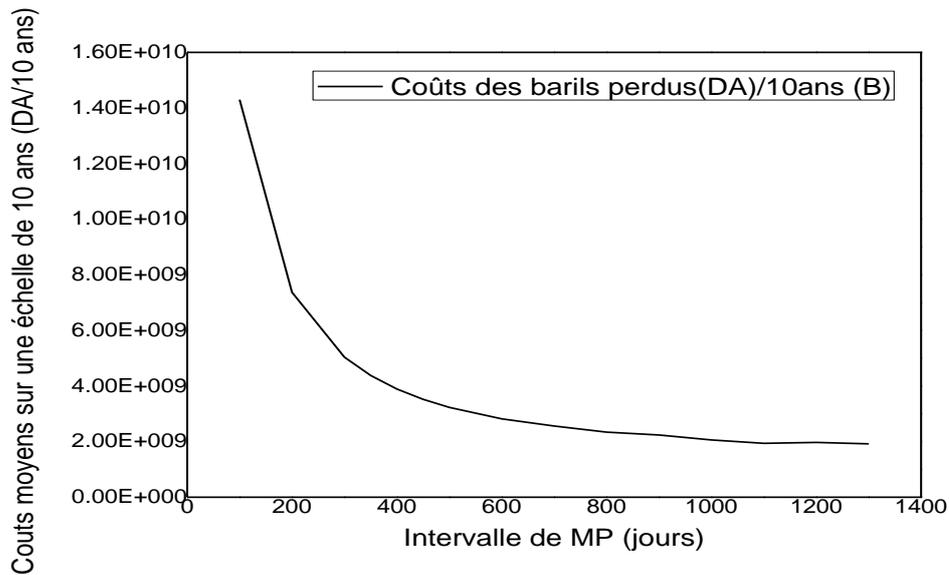


Figure IV.18 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train B.

Cependant, le coût moyen des différents intervalles de MP considérés pour le turbocompresseur D sont différents des turbocompresseurs A et B. Ceci se réfère toujours aux résultats du GPIM où l'effet des différentes covariables sur le turbocompresseur D est différent par rapport aux autres. La courbe des coûts moyens pour le turbocompresseur D est montrée dans la figure suivante.

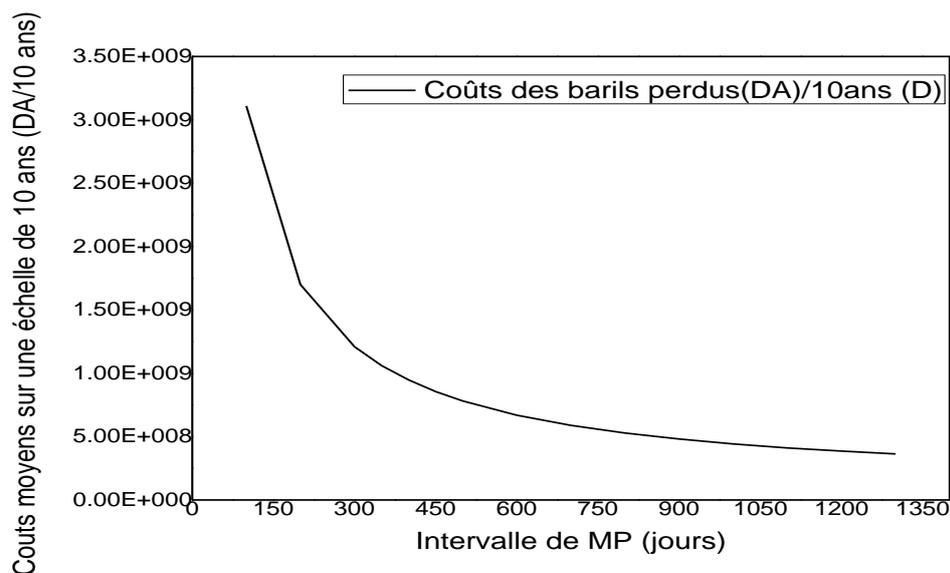


Figure IV.19 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour le Train D.

La différence entre la tendance des coûts des différents turbocompresseurs est montrée sur la figure suivante :

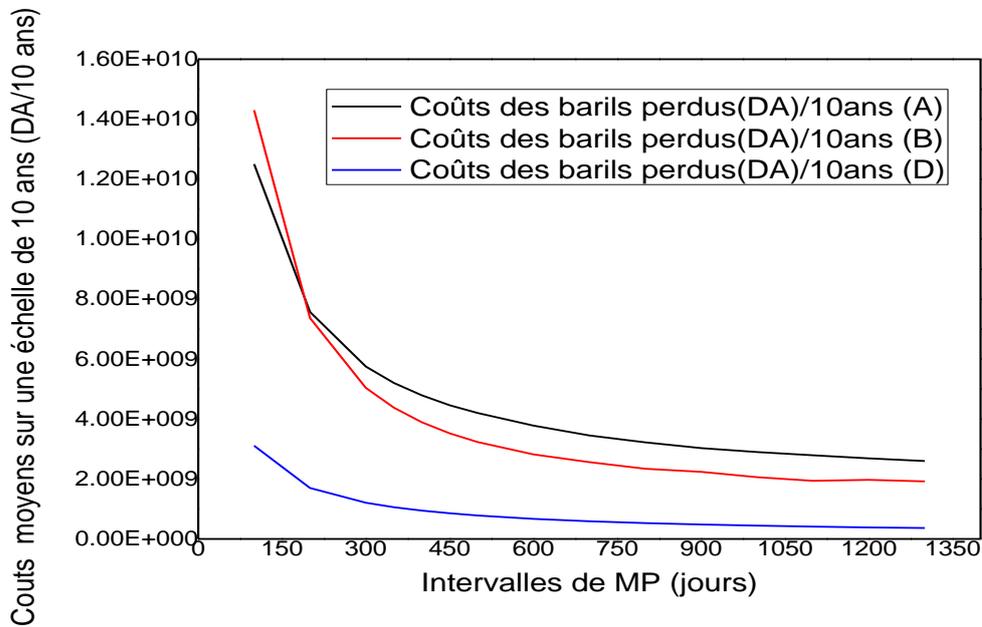


Figure IV.20 Variation des coûts des barils perdus (DA) sur une échelle de 10 ans pour les trois turbocompresseurs A, B et D.

Nous pouvons conclure que la périodicité pour les trois turbocompresseurs s'influe par l'effet des covariables et des actions de maintenance. En effet, nous pouvons proposer une fréquence de 1000 jours pour le turbocompresseur de type A et B. Cependant, pour le turbocompresseur D, la courbe des coûts commence à être plate à partir de la fréquence de 900 jours pouvant être proposée comme une meilleure périodicité. Ceci permet de se décaler de la périodicité des autres turbocompresseurs (A et B) tout en gardant la disponibilité de l'installation de production. Le suivi des périodicités proposées par notre approche peut conduire à un gain considérable dans la production pétrolière de l'entreprise. Le tableau ci-dessous montre la différence entre les coûts moyen réels de l'entreprise et ceux trouvés par notre approche d'optimisation.

Tableau IV.14 Différence entre les coûts moyens réels et simulés

		Intervalle de MP Simulé (jours)		
		Turbocompresseur A	Turbocompresseur B	Turbocompresseur D
Valeurs Simulée	Intervalle de PM (jours)	1000	1000	900
	Coûts générés (DA/ jour)	805555.56	572222.22	133611.11
Valeurs réelles (de l'entreprise)	Intervalle de PM (jours)	140.04	355.71	122.04
	Coûts réels (DA/jour)	3339452.05	1140657.53	5207671.23

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'appliquer l'approche d'optimisation de la périodicité de la maintenance préventive (MP) sur trois turbocompresseurs. Une modélisation de la fiabilité de ces derniers par le GPIM, ayant représenté la meilleure qualité d'ajustement, nous a permis de mettre en évidence l'effet des actions de maintenance préventive et corrective ainsi que l'influence de certains covariables sur le bon fonctionnement du système. Les résultats de cette modélisation ont été exploités pour une optimisation de la périodicité de la maintenance préventive. En programmant sur MATLAB, la simulation par un algorithme pour plusieurs fréquences de MP permet de proposer une périodicité de 1000 jours pour les turbocompresseurs A et B et une périodicité de 900 jours pour le turbocompresseur D.

Les courbes des coûts moyens à partir de ces périodicités deviennent plates. Cependant, la différence entre les fréquences a été expliquée par le fait que les deux types de compresseurs ont présenté une performance différente lors de la modélisation de leur fiabilité.

L'optimisation considérée dans cette thèse permet à l'entreprise d'apporter un gain et garantir un équilibre entre les actions de maintenance préventive et corrective.

Conclusion générale

Ce travail s'intéresse à l'optimisation de la périodicité de la maintenance préventive en se basant, comme un outil d'aide à la décision, sur les modèles d'intensité proportionnelle (PIM et GPIM) fondés sur le processus non homogène de Poisson (NHPP). Ces modèles ont été considérés pour un historique des pannes des trois turbocompresseurs dont l'objectif est de mettre en évidence l'effet des actions de maintenance (préventive et corrective) et de certaines covariables sur leur bon fonctionnement. L'approche du maximum de vraisemblance a montré que le GPIM représente la meilleure qualité d'ajustement avec la loi log linéaire et pour les covariables représentant : la température, la programmation des actions de maintenance et le temps entre les défaillances. Cette approche d'estimation des valeurs des paramètres a montré une différence dans l'influence des covariables entre les différents turbocompresseurs. Cependant, la valeur du facteur d'échelle multiplicatif $\hat{\rho}$, représentant l'effet des actions de la maintenance préventive, est inférieure à 1. Ceci implique que la maintenance préventive est une voie d'amélioration de la performance future des turbocompresseurs.

L'optimisation de la maintenance préventive ayant pour objectif de trouver la balance optimale entre la maintenance préventive et corrective a été considérée pour une échelle de temps fixe de 10 ans proportionnellement à l'historique des pannes des turbocompresseurs et à leur durée de vie moyenne. L'algorithme de simulation pour ce type d'échelle a l'avantage de considérer toute la durée de vie du système en optimisant son équation économique fonction du nombre des actions de maintenance préventive et corrective. Les meilleures périodicités pour les deux premiers turbocompresseurs (A et B) ont montré une similarité dans les coûts moyens des actions de maintenance contrairement au troisième turbocompresseur (D). Le suivi des périodicités proposées pour les turbocompresseurs A, B et D peut apporter respectivement un gain de 2 533 896,49, 568 435,31 et 5 074 060,12 DA/jour.

L'approche d'optimisation de la maintenance préventive basée sur les modèles d'intensité proportionnelle et de réparation imparfaite offre un outil simple et praticable qui permet de répondre aux exigences des industries. Cependant, pour des facteurs d'influence dépendants du temps, la modélisation de comportement du système fait appel aux modèles très compliqués pouvant rendre le recours à ce type d'optimisation un mauvais choix.

Bibliographie

- [1] R. Lesobre, “Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels”. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2015.
- [2] R. E. Barlow and F. Proschan, *mathematical theory of reliability*. John Wiley and Sons, 1965.
- [3] A. Ran and S. I. Rosenlund, “age replacement with discounting for a continuous maintenance cost model,” *Technometrics*, vol. 18, no. 04, pp. 459–465, 1976.
- [4] A. Villemeur, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Eyrolles, Paris, 1988.
- [5] J. C. Laprie, “Guide de la sûreté de fonctionnement,” Toulouse: Cépaduès, 1996.
- [6] J. Fournier, *Fiabilité du logiciel*. Hermes, Paris, 1993.
- [7] A. G. Mihalache, “Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué,”. Thèse de Doctorat, Université d'Angers , 2007.
- [8] AFNOR, “Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité. X NF, 60- 500,” 1988.
- [9] S. Wang, M. Tomovic, and H. Liu, “Comprehensive Reliability Design of Aircraft Hydraulic System,” *Elsevier*, 2016.
- [10] J. C. Francastel, “Externalisation de la maintenance : Stratégies, méthodes et contrats,” Dunod, Paris, 2003.
- [11] J. C. Francastel, “Ingénierie de la maintenance : de la conception à l’exploitation d’un bien,” DUNOD, 2003.
- [12] A. Bouzouada, “Etude et application des techniques de l'intelligence artificielle d'optimisation pour la maintenance des réseaux électriques dans le cadre de la MBF(Maintenance basée sur la fiabilité) ,”. Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2021.
- [13] J. Berthon, “Nouvelle approche de la fiabilité opérationnelle,”. Thèse de Doctorat,” Université de Bordeaux 1,France. Birnbaum, 2008.
- [14] W. Nelson, “Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis,” New York: Ed. Wiley. Newby, 1990.

- [15] H. Ascher and H. Feingold, *Repairable Systems Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes*. Dekker, New York, 1984.
- [16] H. Lala, A. Bellaouar, R. Zellagui, and S. Bacha, “systems using the Proportional Intensity Model (PIM),” *Int. J. Performability Eng*, vol. 18, no. 1, p. p7.56-62, 2022.
- [17] D. R. Cox, , *Renewal Theory, Methuen and Company*. London, 1962.
- [18] D. R. Cox and P. A. W. Lewis, *The Statistical Analysis of Series of Events*, 1st Editio. London, 1966.
- [19] D. R. Cox and V. Isham, *Point Processes*, 1st Editio. 1980.
- [20] M.H. Taylor and S. Karlin, *An Introduction to Stochastic Modelling*, 1st Editio. 1994.
- [21] S. Bacha, “Vers une contribution de la sûreté de fonctionnement des équipements pétroliers en Algérie,”. Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2021.
- [22] O. Tebbi, “Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés,”. Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2005.
- [23] R. Lesobre, K. Bouvard, C.Bérengruer, V. Cocquempot et A. Barros, “Politique de maintenance dynamique pour un système multi-composant intégrant les informations de surveillance Dynamic maintenance policy for a multi-component system integrating the monitoring information,” in *19e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement - 21-23 octobre*, 2014, pp. 1–10.
- [24] A. M. Razali, A. A. Salih, A. A. Mahdi, A. Zaharim, K. Ibrahim and K. Sopian, “On Simulation Study of Mixture of Two Weibull Distributions,” in *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSSE '08)*, ISSN: . 181., 2008, pp. 1790–2769.
- [25] A. Maqsood and M. Aslam, “A comparative study to estimate the parameters of mixed-Weibull distribution,” *Pak.j.stat.oper.res.*, Vol.IV, No.1 ,pp1-8, 2008, doi:10.1234/pjsor.v4i1.55.
- [26] D. Ling, H-Z. Huang, and Y.Liu, “A method for parameter estimation of Mixed Weibull distribution,” *Annual Symposium on Reliability and Maintainability (RAMS)*, Fort Worth, TX , ISSN: 0149-144X, 2009, doi: 10.1109/RAMS.2009.4914663.
- [27] G. Y. Kui, G. De Liang, and X. Y. Gang, “A Reliability Data Analysis Method Using Mixture Weibull Distribution Model,” in *Edited by Grace Chang, Periodical:Applied Mechanics and Materials*, 2011, pp. 1449–1453.

- [28] W. Wang, D.B. Kececioglu, “Parameter Estimation For Mixed- Weibull Distribution,” *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1998 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity*, Anaheim, CA, USA, ISSN: 0149-144X, 1998, doi: 10.1109/RAMS.1998.653782.
- [29] E. Carlucci and L. Tognarelli, “Mixed Weibull distribution as best representation of forced outage distribution to be implemented in blocksim,” *Proceedings of the ASME 2014 Power Conference*, Baltimore, Maryland, USA , 2014.
- [30] S. Bacha, D. Djeghloud, A. Bellaouar, and M. Benidir, “Modeling of the Mixed Weibull Law In An Industrial Context : Application On The Ms5002 Gas Turbine.,” 2018, [Online]. Available: <https://www.tuhh.de/iue/iwwg/infos-materials/conference-proceedings/crete-2018.html>;
- [31] B. Florent, L. Brice, C. Dominique, and L. Patrick, “Combinaison d’une loi de Weibull et d’un modèle de Cox pour la modélisation des taux de défaillance en fonction du temps et des facteurs d’influence,” in *Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance*,” 3^{ème} Congrès PENTOM, 2007, pp. pp3-8.
- [32] J.-C. Auge, *Utilisation d’un modèle à hasard proportionnel pour estimer la fiabilité de composants mécaniques. Mécanique*. l’école centrale de lyon, 1998.
- [33] T. H. Scheike, *Maximum likelihood estimation for Cox’s regression model under nested case-control sampling*. Biostatistics, 2004.
- [34] J. Phillips and I. Ansell, “Practical aspects of modelling of repairable systems data using proportional hazards models,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 58, p. PP 165-171, 1997.
- [35] M. Nikulin and H.-D. I. Wu, *The Cox Model and Its Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [36] M. E. Villar, “Apport des méthodes récentes de modélisation de survie dans le contexte spécifique des patients dialysés,”. Thèse de Doctorat, Université Lyon I de Claude Bernard , France , 2006.
- [37] D. R. Cox, “Regression Models and Life-Tables,” *J. R. Stat. Soc.*, vol. 34, no. 2, pp. 187–220, 1972.
- [38] P. Lyonnet, “Modèles de Cox et réseaux de neurones pour l’évaluation de la fiabilité mécanique,” in *8e Colloque national en calcul des structures, CSMA*, 2007, p. pp 2-3.
- [39] J. T. Duane, “Learning Curve Approach to Reliability Monitoring,” *IEEE Trans. Aerosp.*, vol. 2, no. 2, pp. 563–566, 1964.

- [40] L. Crow, “On tracking reliability growth,” in *Proceedings of the twentieth conference on the design of experiments, ARO Report 75-2*, 1975, pp. 741–754.
- [41] S. E. Rigdon, “Properties of the Duane Plot for Repairable Systems,” *Qual. Reliab. Eng. Int. John Wiley Sons*, vol. 18, no. 1, pp. 1–4, 2002.
- [42] M. Nourelfath, M. C. Fitouhi, and M. Machani, “An integrated model for production and preventive maintenance planning in multi-state systems,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 59, no. 3, p. pp.496-506, 2010.
- [43] M.L. Gámiz , A. J. López-Montoya, M. D. Martinez-Miranda and R. Raya-Miranda, “Data Visualization for Reliability Analysis of Repairable Systems,” *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 35, pp. 99–115,2019.
- [44] S. Gasmi, “Estimating Parameters of a Log-linear Intensity for a Repairable System,” *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 6, pp. 4325–4336, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2012.09.050.
- [45] S. Bacha, A. Bellaouar, J.P. Dron, and H. Lala, “Optimization of PM Intervals of an Oil Pump using a Generalized Proportional Intensity Model GPIM,” *Int. J. Performability Eng.*, vol. 17, no. 7, pp. 569–578, 2021.
- [46] J. W. A. Thompson, “Point Process Models with Applications to Safety and Reliability,” 1988.
- [47] D. F. Percy, K. A. H. Kobbacy, and H. E. Ascher, “Using proportional-intensities models to schedule preventive-maintenance intervals,” *IMA J. Manag. Math.*, vol. 9, no. 3, pp. 289–302, 1998, doi: 10.1093/imaman/9.3.289.
- [48] D.F. Percy and B.M. Alkali, “Generalized proportional intensities models for repairable systems,” *IMA J. Manag. Math.*, vol. 17, no. 2, pp. 171–185, 2006, doi: 10.1093/imaman/dpi034.
- [49] S. F. and H. P. W. Bishop, Y. M. M., Fienberg, “Discrete Multivariate Analysis,” 1975.
- [50] P. Armitage, “The chi-square test for heterogeneity of proportions after adjustment for stratificatio,” *n. J. R. Stat. Soc.*, vol. 28, pp. 150-163., 1966.
- [51] T. R. Holford, *The Analysis of Rates and of Survivorship Using Log-Linear Models*, vol. 36, no. 2. 1980.
- [52] Infracert, “Linear Infrastructure Efficiency Improvement by Automated Learning and Optimised Predictive Maintenance Techniques,” 2014.
- [53] L. A. Rodríguez-Picón and V. H. Flores-Ochoa, “Estimation of a log-linear model for

- the reliability assessment of products under two stress variables,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 8, no. 1340, pp. 1026–1040, 2017, doi: 10.1007/s13198-016-0564-6.
- [54] L. Lee, “Testing Adequacy of the Weibull and Log Linear Rate Models for a Poisson Process,” *TECHNOMETR*, vol. 22, no. 2, pp. 195–199, 1980.
- [55] M. Krit, “Goodness-of-fit tests in reliability: Weibull distribution and imperfect maintenance models.,” *Sciences et Technologies de l’Information*, 2014.
- [56] Z. Yu, “Log-linear process modeling for repairable systems with time trends and its applications in reliability assessment of numerically controlled machine tools,” in *in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2012, pp. 55–65, doi: 10.1177/1748006X12460633.
- [57] D. F. Percy and B. M. Alkali, “Scheduling preventive maintenance for oil pumps using generalized proportional intensities models,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 14, no. 6, p. pp.547-563, 2007.
- [58] S. Bacha, A. Bellaouar, and J. P. Dron, “Predictive Variable Influence on Operating Safety of an Oil Pump using a Generalized Proportional Intensity Model,” *Int. J. Performability Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 200–207, 2021.
- [59] D. Lugtigheid, D. Banjevic, and A. Jardine, “Modeling repairable systems reliability with explanatory variables and repair and maintenance actions,” *IMA J. Manag. Math.*, vol. 15, pp. 89–110, 2004.
- [60] G. Y. Yi and A. F. Lawless, “corrected likelihood method for the proportional hazards model with covariates subject to measurement error,” *J. Stat. Plan. Inference*, vol. 137, pp. 1816 – 1828, 2007.
- [61] K. Veronica, L. A. Orawo, and A. S. Islam, “Likelihood Based Estimation of the Parameters of a Log-Linear Non homogeneous Poisson Process,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 3, no. 9, pp. 200–204, 2014.
- [62] J. N. R. H. Byrd, J. C. Gilbert, “A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming,” *Math. Program.*, vol. 89, pp. 149–185, 2000.
- [63] D.G. Luenberger, and Y. Ye, *Linear and Nonlinear Programming*, 3rd Editio. Springer, 2008.
- [64] M. Brown and F. Proschan, “Imperfect Repair,” *J. Appl. Probab.*, pp. 851–859, 1983.
- [65] S. Bacha, A. Bellaouar, and J.P. Dron, “Assessment of the effectiveness of corrective maintenance of an oil pump using the proportional intensity model (PIM),” *Int. J. Qual.*

- Reliab. Manag.*, vol. 38, no. 10, 2021.
- [66] L. Doyen and O. Gaudoin, “Classes of Imperfect Repair Models Based on Reduction of Failure Intensity or Virtual Age,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 84, pp. 45–56, 2004.
- [67] A. Syamsundar and V.N.A. Naikan, “Imperfect Repair Proportional Intensity Models for Maintained Systems,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 60, no. 4, pp. 782–787, 2011.
- [68] M. Kijima, “Some Results for Repairable Systems with General Repair,” *J. Appl. Probab.*, vol. 26, no. 1, pp. 89–102, 1989.
- [69] N. Jack, “Analysing event data from a repairable machine subject to imperfect preventive maintenance,” *Qual. Reliab. Engng Int*, vol. 13, pp. 183–186, 1997.
- [70] L. Doyen, O. Gaudoin, and A. Syamsundar, “On geometric reduction of age or intensity models for imperfect maintenance,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 168, pp. 40–52, 2017, doi: 10.1016/j.res.2017.03.015.
- [71] D. Percy and B. Alkali, “Generalized Proportional Intensities Models for Repairable Systems,” vol. 17, pp. 171–185, 2005.
- [72] D. R. Cox, *The statistical analysis of dependencies in point process*. New York: Lewis, Eds, 1972.
- [73] J.F. Lawless, *Statistical models and methods for lifetime data*, 2nd Editio. Wiley Online library, 2002, doi:10.1002/9781118033005.
- [74] AFNOR, “Terminologie de la maintenance. NF-EN-13306-X-60-319.” 2001.
- [75] A. Kelly, “Maintenance and the industrial organization. Plant Maintenance Management Set,” 2006.
- [76] D. Halimi, “Contribution à l’amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l’industrie des hydrocarbures,” Thèse de Doctorat, Université M’hamed Bougara-Boumerdes, 2014.
- [77] E.H. Aghezzaf and M.A. Ait-Kadi, “An integrated production and preventive maintenance planning model,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 18, no. (1,2), pp. 679–685, 2007.
- [78] E. Deloux, B. Castanier, and C. Bérenguer, “Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé,” in *7ème Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement*, 2007, p. pages 142–149.
- [79] C.G. Vassiliadis, J. Arvela, E.N. Pistikopoulos, and L.G. Papageorgiou, “Planning and maintenance optimization for multipurpose plants,” in *Computer Aided Chemical*

- Engineering*, vol. 8, p. Pages 1105-1110, 2000.
- [80] Z. Rochdi, B. Driss, and T. Mohamed, “Industrial systems maintenance modelling using Petri nets,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 65, no. 2, pp. 119–124, 1999.
- [81] R. Dekker, “Applications of maintenance optimization models : a review and analysis,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 51, pp. 229–240, 1996.
- [82] T.P.K. Nguyen, “ Politiques de maintenance et d’investissement sous évolution technologique incertaine,”. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN), France, 2012.
- [83] B. Castanier, “Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle,”. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France, 2002.
- [84] M. Rausand and A. Høyland, “System Reliability Theory: Models, Statistical methods, and Applications,.” Hoboken: Wiley., 2004.
- [85] S. Beleulmi and A. Bellaouar, *Cours De Fiabilité Maintenabilité Disponibilité*. 2014.
- [86] J. Moubray, *Reliability Centered Maintenance, RCM*, Edition. 2000.
- [87] J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance*, Troisième. 2012.
- [88] A. Despujols, “Les applications de l’OMF. Note interne EDF HT-28-01-006 A,” 2001.
- [89] A. Mohammed, “Optimisation de la maintenance préventive des système de production incorporant la dépendance par les meta-heuristique, ” thèse de Doctorat, Université de Djilali sidi bel abbes , 2015.
- [90] A. Despujols, “Approche fonctionnelle de la maintenance. Techniques de l’ingénieur, dossier MT9020, 2004.,” 2004.
- [91] J.L. Oteguia, P.G. Fazzinia, A.A. Marquez, and P.L. Barciac, “Failure analysis of packing plate in a hyper compressor at a petrochemical plant,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 5, p. Pages 531-542, 2008.
- [92] A. Talbi, “Évaluation des stratégies de maintenance,” 2020, no. April 2012, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/341447332%0AÉvaluation>.
- [93] E. Houry, “Modélisation de la durée de vie résiduelle et maintenance prédictive: application à des véhicules industriels, ”. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France, 2012.
- [94] A. H. C. Tsang, “Condition-based maintenance: tools and decision making,” *J. Qual.*

- Maint. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 3–17, 1995.
- [95] R. Ahmad and S. Kamaruddin, “A review of condition-based maintenance decision-making,” *Eur. J. Ind. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 519–541, 2012, doi: 10.1504/EJIE.2012.048854.
- [96] A. G. Starr, “A structured approach to the selection of condition based maintenance,” in *in Proceedings of the 5th International Conference on Factory 2000*, 1997, pp. 2–4.
- [97] H. Pham and H. Wang, *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer, 2006.
- [98] L. Pintelon and A. Parodi-Herz, “Maintenance: An Evolutionary Perspective,” in *Complex System Maintenance Handbook*, K. A. H. Kobbacy and D. N. P. Murthy, Eds. Springer Series in Reliability Engineering, 2008, pp. 21–48.
- [99] G. Zwingelstein, *diagnostique des défaillances, traitées nouvelles technologies série diagnostic et maintenance*,. 1995.
- [100] J. Héng, “Pratique de la Maintenance Préventive. Dunod,” 2002.
- [101] G. E. Monahan, “A survey of partially observable markov decision processes: Theory, models and algorithms. *Management Science*,” pp. 1–16, 1982.
- [102] B. Heidergott, “Optimisation of a single-component maintenance system: A smoothed perturbation analysis approach,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 119, pp. 181–190, 1999.
- [103] A. Despujols, “Methodes d’optimisation des strategies de maintenance. Techniques de l’ingénieur, dossier MT9050,” 2005.
- [104] J. Llaurens, “Mise en place d’un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique,”. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, France, 2011.
- [105] D. F. Percy, “Preventive Maintenance Models for Complex Systems,” *Complex Syst. Maint. Handbook*, Springer S, pp. 180–206., 2006.
- [106] A. H. Christer, “A simple condition monitoring model for a direct monitoring process,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 82, no. 2, pp. 258–269, 1995, doi: 10.1016/0377-2217(94)00262-B.
- [107] K. A. H. Kobbacy and H. E. Ascher, “Modelling preventive maintenance for deteriorating repairable systems,” *IMA J. Manag. Math.*, vol. 6, no. 1, pp. 85–99, 1995, doi: 10.1093/imaman/6.1.85.
- [108] P. Scarf, “On the application of mathematical models in maintenance,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 99, no. 3, pp. 493–506, 1997, doi: 10.1016/s0377-2217(96)00316-5.

- [109] M. Kaki et El hadj.A. Belahcene, “Etude des vannes de gaz de turbine à gaz MS5002C,” Mémoire de Master, Université kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2016.

Annexes

1. Fonctionnement général des installations

La société **SONARCO** exploite le gisement de Rhourde El Baguel, soit 49 puits producteurs d'huile à partir desquels le pétrole brut est produit. De cette huile sont également extraits de l'eau et du gaz : environ 700 millions pieds cube de gaz sont réinjectés chaque jour pour maintenir la pression du gisement.

L'huile issue des puits est rassemblée à l'aide de 3 manifolds (Nord, Plant et Sud), possédant chacun 3 systèmes d'exploitation :

- Système Haute Pression (HP),
- Système Moyenne Pression (MP),
- Système Basse Pression (BP).

Afin de stabiliser l'huile et de récupérer le gaz, 2 centres d'exploitation ont été mis en place : le centre CPF (Central Production Facilities) et le centre TCF (Turbo Compression Facilities).

Le découpage de chaque centre est le suivant :

1.1. Centre CPF

Ce centre assure les opérations de traitement et d'optimisation du pétrole et du gaz, ainsi que la production d'air instrument, d'air service, d'azote et d'électricité, et enfin le traitement des eaux.

- Unité de traitement : elle regroupe les opérations de séparation pétrole/gaz/eau, ainsi que le stockage et l'expédition du brut. Elle est conçue pour traiter les 3 effluents arrivant du champ (HP, MP, BP).

- Unité d'optimisation : elle permet de récupérer le condensat dans le gaz associé, stabiliser le pétrole brut en ajustant sa tension de vapeur et de produire un gaz sec.

- Centrale électrique : elle est composée de 2 turboalternateurs 10 MW fonctionnant en redondance active et d'un 3ème turbogénérateurs pour alimenter les bases de vie et les centres de production.

- Unité de production d'air : assure à l'aide de 3 compresseurs à vis l'alimentation en air service et en air instrument des centres de production ainsi que l'unité de production d'azote.

- Unité de production d'azote : assure la génération d'azote pour les centres CPF et TCF qui est utilisé comme Blanket gas dans quelques capacités et aussi pour l'inertage des différentes capacités durant les travaux de maintenance.

1.2. Centre TCF

Ce centre a pour fonction la déshydratation et la réinjection dans les puits du gaz issu du centre CPF et du gaz sec importé de ZINA.

- Train MP : le turbocompresseur MP comprime le gaz MP provenant du centre CPF : ce gaz est ensuite déshydraté et envoyé vers les trains HP.

- Unité de déshydratation glycol : composée de 4 trains, elle assure la déshydratation du gaz issu du train MP et du gaz provenant des séparateurs HP du centre CPF.

- Trains HP : 4 turbocompresseurs entraînés par des turbines à gaz reçoivent le gaz HP en provenance du centre CPF, le gaz en provenance de ZINA et le gaz HP en sortie des 4 trains de déshydratation glycol.

La figure suivante est un schéma simplifié de l'unité d'injection de gaz de TCF.

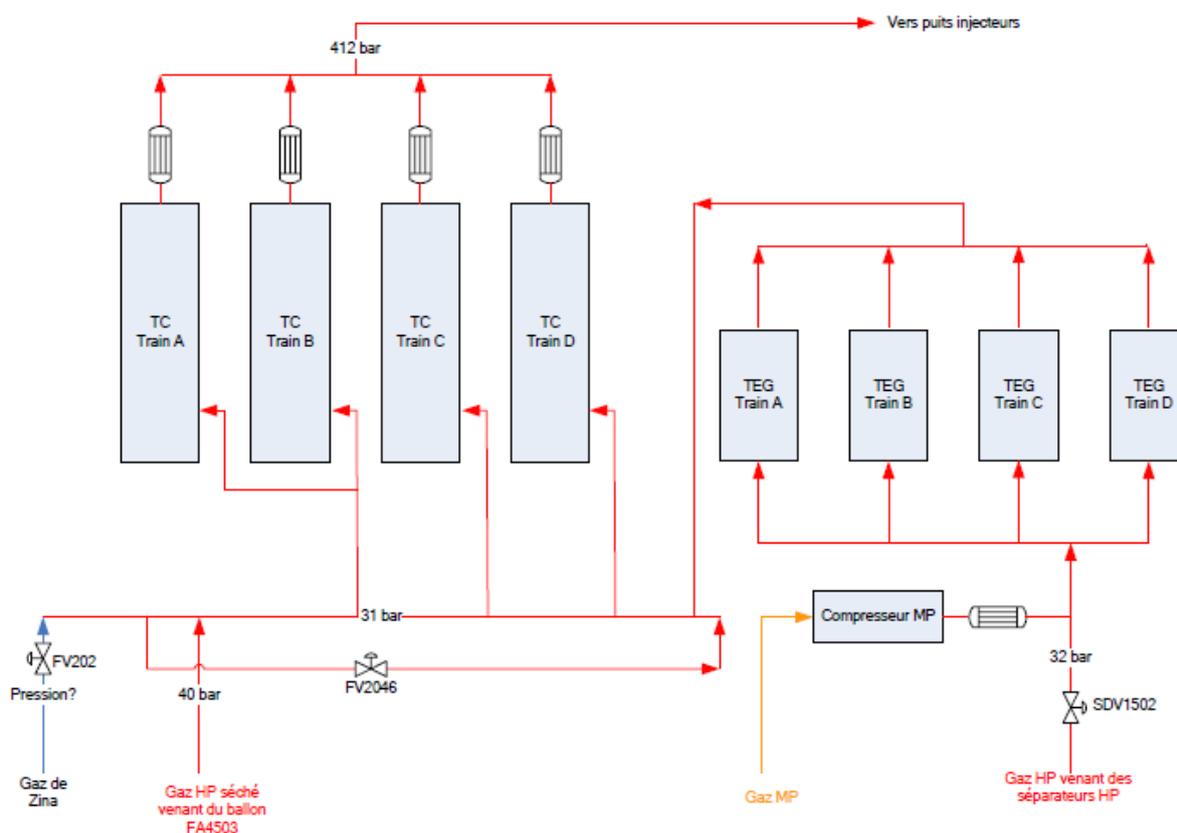


Figure 1. Schéma simplifié de l'unité d'injection de gaz de TCF.

1.3. Etape de compression HP

L'étape de compression HP est réalisée par quatre turbocompresseurs A, B, C, D entraînés par des turbines à gaz. Le train D est le train le plus puissant. La figure suivante est un schéma simplifié d'une vue générale des trains de compression A, B, C et D.

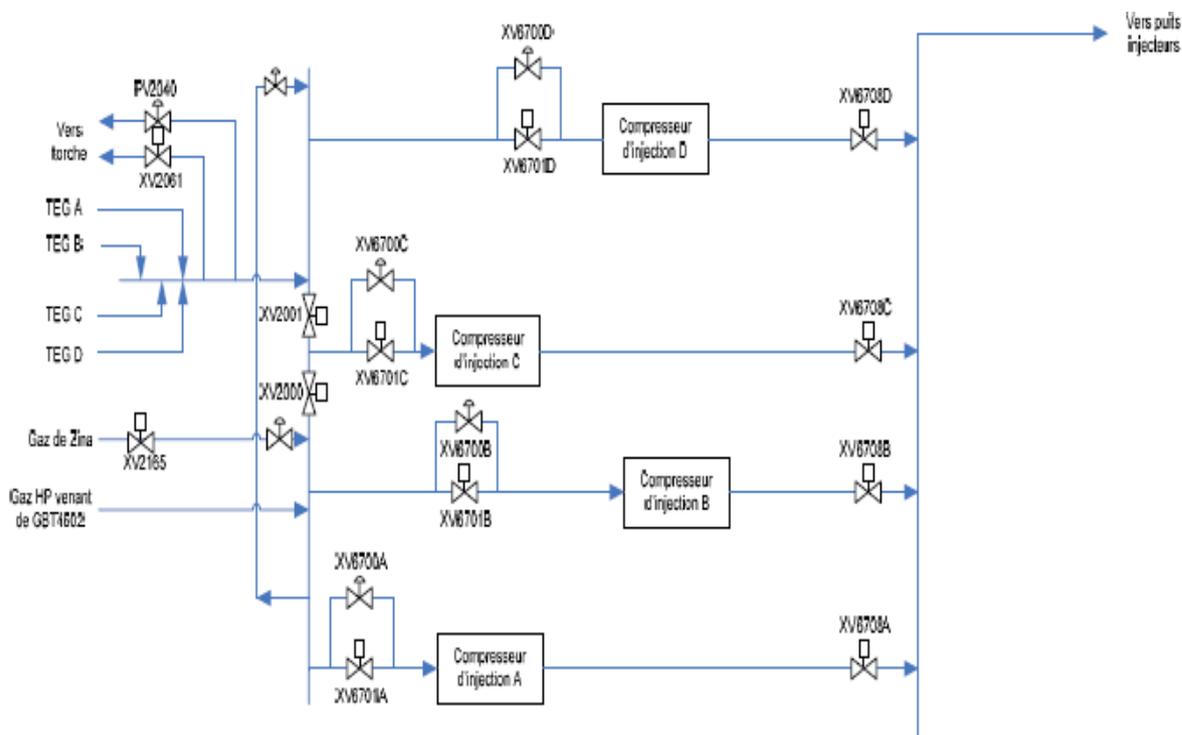


Figure 2. Schéma simplifié des trains de compression TCF.

المخلص

تركز هذه الرسالة على تحسين وتيرة الصيانة الوقائية للأنظمة المعقدة القابلة للإصلاح. يتطلب هذا التحسين إنشاء نموذج موثوقية متسق قادر على وصف سلوك النظام تمامًا ومراعاة تأثير المتغيرات المشتركة المختلفة على تشغيل النظام.

سمح لنا التطبيق على تاريخ ثلاثة شواحن توربينية، تعمل في إنتاج النفط، بالنظر في تأثير درجة الحرارة، وبرمجة إجراءات الصيانة والوقت بين الأعطال كمتغيرات مشتركة للنظام بواسطة نموذج الشدة النسبية المعمم (GPIM) والذي يمكن أن يدمج أيضًا في وظيفة الشدة تأثير إجراءات الصيانة الوقائية والتصحيحية. نتائج GPIM التي تم العثور عليها من خلال نهج الاحتمالية القصوى تجعل من الممكن البدء في تحسين وتيرة الصيانة الوقائية باستخدام خوارزمية محاكاة على نطاق زمني ثابت. يتطلب حساب متوسط التكلفة بواسطة هذه الخوارزمية عددًا كبيرًا من عمليات المحاكاة ($n < 1000$)، مما يعني استخدام برنامج مثل لغة البرمجة MATLAB. يجب أن تعكس الدورية المقترحة الحد الأدنى من التكاليف الممكنة مع ضمان التوازن الأمثل بين إجراءات الصيانة الوقائية والتصحيحية.

الكلمات المفتاحية:

تحسين وتيرة الصيانة الوقائية؛ أنظمة معقدة قابلة للإصلاح؛ شاحن توربيني؛ نموذج الكثافة النسبية المعمم (GPIM)؛ نهج الاحتمالية القصوى؛ المتغيرات؛ MATLAB.

Résumé

Cette thèse s'intéresse à l'optimisation de la fréquence de la maintenance préventive (MP) des systèmes complexes réparables. Cette optimisation nécessite d'établir un modèle de fiabilité consistant capable de décrire parfaitement le comportement du système et tenir compte de l'influence des différentes covariables sur le fonctionnement du système. Une application sur un historique de trois turbocompresseurs, travaillant dans une industrie pétrolière, nous a permis de considérer la température, la programmation des actions de maintenance et le temps entre les défaillances comme des covariables du système. Ces dernières peuvent être décrites par le modèle d'intensité proportionnelle généralisée (GPIM) pouvant aussi incorporer dans sa fonction d'intensité l'effet des actions de maintenance préventive et corrective. Les résultats du GPIM trouvés par l'approche du maximum de vraisemblance permettent d'entamer l'optimisation de la fréquence de la maintenance préventive en utilisant un algorithme de simulation à une échelle de temps fixe. Le calcul du coût moyen par cet algorithme nécessite un nombre de simulations important ($n > 1000$), ce qui implique l'utilisation des logiciels tels que le langage de programmation MATLAB. La périodicité proposée doit refléter le minimum possible des coûts tout en assurant l'équilibre optimal entre les actions de maintenance préventive et corrective.

Mots Clés : *optimisation de la fréquence de la maintenance préventive ; systèmes complexes réparables ; turbocompresseur ; modèle d'intensité proportionnelle généralisée (GPIM) ; approche de maximum de vraisemblance ; covariables ; MATLAB.*

Abstract

This thesis focuses on optimizing the frequency of preventive maintenance (PM) of complex repairable systems. This optimization requires establishing a consistent reliability model capable of perfectly describing the system's behavior and taking into account the influence of the different covariates on the system's operation. An application on a history of three turbochargers, working in an oil industry, allowed us to consider the temperature, the programming of maintenance actions and the time between failures as covariates of the system. The latter can be described by the Generalized Proportional Intensity Model (GPIM) which can also incorporate in its' intensity function on the effect of preventive and corrective maintenance actions. The results of the GPIM model found by the maximum likelihood approach make it possible to begin the frequency's optimization of preventive maintenance using a simulation algorithm on a fixed time scale. The calculation of the average cost by this algorithm requires a large number of simulations ($n > 1000$), which implies the use of software such as the MATLAB programming language. The proposed periodicity must reflect the minimum possible costs while ensuring the optimal balance between preventive and corrective maintenance actions.

Keywords: *optimization of the frequency of preventive maintenance; repairable complex systems; turbocompressor ; generalized proportional intensity model (GPIM); maximum likelihood approach; covariates; MATLAB.*