

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master II

Filière : Electromécanique

Option

Maintenance industrielle

Thème

**POLITIQUE D'INSPECTION NON PERIODIQUE D'UN SYSTEME
SE DEGRADANT**

Réalisé par :

- **BOUHAFS Lina**
- **ADJABI Louiza**

Soutenu le 28 /09/2020 Devant le Jury composé de :

Président Mr. AIT MOUKHTAR.L

Examineur Mr. MEBARKI

Rapporteur

Mr. LAGGOUN.R

Co-rapporteur

Mr. CHERFAOUI.B

Promotion 2020

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné santé et intelligence, guidé à mener à bien ces années d'études et réaliser ce présent travail, objet d'un dur labeur et beaucoup de sacrifices.

Nous voudrions également remercier l'encadreur Mr : **LAGGOUNE .R** et le Co-encadreur Mr. **CHERFAOUL.B** qui nous ont dirigé, aidé et conseillé pendant toute la durée de réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos plus vives gratitudeux aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font, en acceptant la charge de juger ce travail.

Nous sommes reconnaissants envers nos enseignants auxquels nous devons notre formation en maintenance industrielle.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre famille, nos amis pour nous avoir aidés, encouragés et soutenus tout le long de nos études.

Merci beaucoup

Dédicaces

Je dédie cet humble travail :

A mon cher père et ma chère mère dont la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements n'ont cessé durant toute ma scolarité, facteurs ayant contribué à ma réussite, Que dieu les protège.

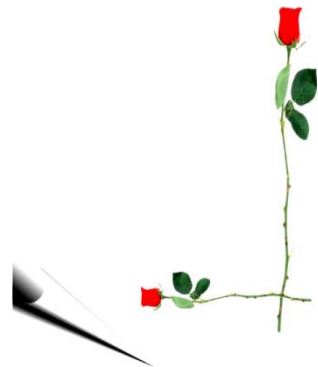
A Ma chère sœur et mes chers frères, qui m'avait toujours encouragé durant ces années d'études.

A mon cher fiancé, qui a été toujours près de moi à me soutenir et me donner de l'espoir.

A ma chère binôme, Louiza pour son bon humour

A tous mes proches et amis que j'ai connu.

BOUHAFS Lina



Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et encourager durant ces années d'études pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chers frère, Adel et Fayçal

A ma chère sœur et belles-sœurs, Aya, Hanane et Ahlem

Qui me donnent de l'amour et soutien moral en me conseillant précieusement durant mon parcours.

A ma chère binôme, Lina

Pour sa sympathie

A tous mes amies, Wissem, Khadija, Amina et Meriem.

Qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A mon cher, Walid

Qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Il m'a chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A tous ceux que j'aime.

ADJABI Louisa.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction.....	1
Généralité sur la maintenance	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 De l'entretien à la maintenance.....	4
I.3 Différence entre l'entretien et la maintenance	5
I.3.1 Entretien	5
I.4 Structure d'une organisation de maintenance	6
I.5 Différents types de maintenance	7
I.5.1 Maintenance préventive.....	8
I.5.1.1 Maintenance préventive systématique	8
I.5.1.2 Maintenance préventive conditionnelle	8
I.5.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle	9
I.5.2 Maintenance corrective	9
I.5.2.1 Maintenance corrective palliative	9
I.6 Quelques notions de la SDF.....	9
I.6.1 La fiabilité (Reliability).....	9
I.6.2 La disponibilité (Availability)	10
I.6.3 La Maintenabilité (Maintainability)	11
I.6.4 La sécurité (Safety).....	11
I.7 Documents nécessaires à prévoir	11
I.7.1 Dossier technique	12
I.8 Enjeux et Objectif de la fonction de maintenance	12
I.9 Optimisation de la maintenance.....	13
I.10 Conclusion	13
Types et modèles de dégradation	15
II.1 Introduction	16

II.2 Quelques concepts utiles.....	16
II.2.1 Panne (breakdown).....	16
II.2.2 Dégradation (Degradation).....	16
II.2.3 Stresse (Stress)	16
II.2.4 Défaillance (failure)	16
II.2.4.1 Mécanismes de défaillance	17
II.2.4.2 Classification des défaillances	18
II.2.5 Processus stochastique	19
II.3 Modèles de dégradation	19
II.3.1 Modèles à dégradation continue.....	21
II.3.2 Modèles à dégradation discrète	22
II.4 Modèles mathématiques	23
II.4.1 Processus stochastique pour les dégradations continue	23
II.4.1.1 Processus de Lévy.....	23
II.5 Conclusion	28
Politique d’inspection non périodique	29
III.1 Introduction	30
III.2 Politique d’inspection.....	30
III.2.1 Classification selon la périodicité	31
III.2.1.1 Politique d’inspection périodique.....	31
III.2.1.2 Politique d’inspection non périodique.....	31
III.2.2 Classification selon la qualité d’information obtenue	32
III.2.2.1 Inspection parfaite	32
III.2.2.2 Inspection imparfaite	32
III.3 Modèle de maximisation de disponibilité par l’optimisation des inspections non périodique.....	33
III.3.1 Notations	33
III.3.2 Les hypothèses	35
III.3.3 Les modèles mathématiques	35
III.3.4 Procédure numérique	39
III.3.5 Exemple numérique et résultats	39
III.4 Conclusion.....	44

Conclusion générale	45
Bibliographie.....	47

Table des figures

Figure I.1 : Schéma d'une structure organisation de maintenance.....	6
Figure I. 2 : Différents types de maintenance.....	7
Figure I.3 : Disponibilité intrinsèque et opérationnelle.....	10
Figure I.4 : La nécessité de contrôler l'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective.....	13
FigureII.1 : la relation entre l'état de marche et de panne d'un système.....	17
Figure II.2 : différents modèles de dégradation d'un système	20
Figure II.3 : Schématisation d'un modèle à dégradation continue.....	21
Figure II.4 : Schématisation d'un modèle a dégradation discret.....	22
Figure III.1 – Planification de la maintenance préventive	34
FigureIII.2 : variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_p	40
Figure III.3 : variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_c	41
Figure III.4- variation de A_{s1} et A_{s2} et en fonction de T_i	42

Liste des tableaux

Table III.1- variation de As_1 et As_2 en fonction de Tp	40
Table III.2- variation de As_1 et As_2 en fonction de Tc	41
Table III.3- variation de As_1 et As_2 en fonction de Ti	42
Table III.5- variation de As_1 et As_2 en fonction de θ	43

Introduction générale

Aujourd'hui, l'industrie s'est engagée dans une voie novatrice à cause de développement économique qu'a connu la dernière décennie, il a engendré une concurrence intense entre les secteurs industriels. Cette concurrence a incité les entreprises à chercher la qualité de produit ou de service et la réduction des coûts. Bien que la conception de système évolue de jour en jour, des ajustements précis sont parfois nécessaires, pour éviter les défaillances et les pannes. Ces défaillances peuvent, ainsi, engendrer d'énormes pertes de production, pertes financières, pertes de temps, accidents, blessures, décès, insatisfaction de la clientèle, etc.

Alors, le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien pour la qualité de produit. « *Quand la maintenance tousse c'est toute l'entreprise qui s'enrhume !* » [20].

La fiabilité et la disponibilité sont des éléments important dans l'étude actuelle des systèmes complexes et font l'objet de plusieurs recherches académique et industriel. Dans ce cas, plusieurs outils et méthodes scientifiques ont été développés pour le suivi de l'état des systèmes durant leurs durées de vie et évaluer les dangers potentiels associés aux systèmes fonctionnels.

Afin de contrôler la dégradation du système, des opérations d'inspection sont réalisées. La planification et l'optimisation d'inspection est l'objectif de ce document qui permettent d'anticiper le niveau excessif de dégradation du système.

Ce travail se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art de la maintenance.

Dans le deuxième chapitre, une étude bibliographie est effectuée afin de donner les différents modèles de dégradation et les outils mathématiques utilisés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes politiques d'inspection existant ainsi des exemples numériques sont proposés dans le but de réduire la dégradation d'un système qui suit le processus Gamma, pour cela on doit déterminer les dates optimales d'inspection non périodique qui sont obtenues par la maximisation de la disponibilité stationnaire du système. Une étude de sensibilité est réalisée. Les résultats obtenues permettent de montrer l'impact de la variation des durées des actions de maintenance et d'inspection sur la dégradation du système.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale où nous donnerons l'essentiel des résultats.

Chapitre **I**

Généralité sur la maintenance

I.1 Introduction

Entre les années 1960 et 1980, la maintenance industrielle était uniquement perçue comme une activité d'arrière-plan, dont l'utilité était considérée comme toute relative et à laquelle on ne faisait appel que lorsque que la machine était tombée en panne. Ses fonctions étaient très limitées et assez axées sur l'électricité, la mécanique ou encore le graissage. Les notions de prévision ou de prévention n'avaient pas encore fait leur apparition, si bien que la maintenance souffrait d'une image plutôt archaïque. On se contentait par exemple d'intervenir sur les graissages ou encore les rondes de surveillance, et les stratégies alors employées se basaient uniquement sur le dépannage et les opérations de correctif d'envergure.

La notion formalisée de "maintenance" est relativement récente. Elle est apparue avec l'automatisation des systèmes de production, les enjeux économiques et industriels croissants, les réglementations strictes pour la protection de l'individu et de l'environnement.

La fonction de maintenance ne peut se réduire à la seule activité d'entretenir un parc de machine mais a vocation à intervenir dans tout le cycle de l'exploitation du système (choix et conception du matériel, mise en service, détermination des plans de maintenance, organisation et logistique des activités de maintenance, suivi de l'évolution du système, etc.).

Dans ce chapitre nous allons nous focaliser sur les notions fondamentales de maintenance, les différents types de maintenance et l'objectif de maintenance vus qu'elle occupe une place importante dans les industries.

I.2 De l'entretien à la maintenance

Cette différence de vocabulaire n'est pas une question de mode, mais marque une évolution de concept. Le terme maintenance est apparu dans les années 1950 aux ETAS-UNIS [13]. Aujourd'hui, l'entretien a laissé la place à la maintenance. Ce changement ne réside pas uniquement dans un changement de dénomination, mais aussi dans un bouleversement complet de la manière de faire et de concevoir ce qui s'appelait entretien et que l'on appelle aujourd'hui maintenance.

Il y a quelques dizaines d'années, les ateliers de production ne disposaient d'aucune structure de maintenance. L'entretien des machines ou des unités de production se faisait par des personnes, spécialisées ou non, sans logistique établie et structure définie [4].

La production intensive, la complexité des systèmes et surtout la rentabilité, ont laissées les industriels à créer un domaine et une structure dans l'entreprise appelée : service maintenance. Ce service structuré comporte différents corps de métiers comme des électriciens, des mécaniciens, des électroniciens, des automaticiens. Ces spécialistes interviennent chacun dans leur domaine respectif, mais en respectant une coordination dans les tâches à effectuer.

I.3 Différence entre l'entretien et la maintenance

I.3.1 Entretien

Ce terme désigne les opérations ou les interventions à effectuer sur un matériel de production afin de le conserver en parfait état de produire. Les opérations correspondantes, souvent ordonnées par le constructeur, peuvent prendre la forme [4] :

- De vidange (huile de lubrification) ;
- De graissage (paliers de guidage) ;
- De changement de courroies.

I.3.2 Maintenance

Définition : « la maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». [2]

Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité.

Le management de la maintenance concerne toutes les activités des instances de direction qui, d'une part, déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et, d'autre part, les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise (y compris dans les aspects économiques).

La maintenance permet d'organiser, prévoir, planifier et gérer les opérations d'entretien. La maintenance permet donc de conserver un bien dans son état maximal de production. Aux activités techniques effectuées par des spécialistes viennent se greffer d'autres responsabilités comme [4] :

- L'organisation d'une structure de maintenance préventive ;
- Le suivi des coûts ;
- L'analyse des pannes ainsi que le compte rendu des interventions de maintenance ;
- Le suivi informatique du vieillissement du matériel ;
- L'établissement d'un fichier historique du suivi de maintenance par le secteur et par la machine ;
- La gestion des stocks de pièces détachées ;
- Les activités de conseil (AMDEC...).

I.4 Structure d'une organisation de maintenance

Le service maintenance comporte une structure parfaitement organisée qui permet d'optimiser au maximum la production et donc d'en réduire les coûts.

L'organigramme qui suit représente une structure d'une organisation type d'un service de maintenance.

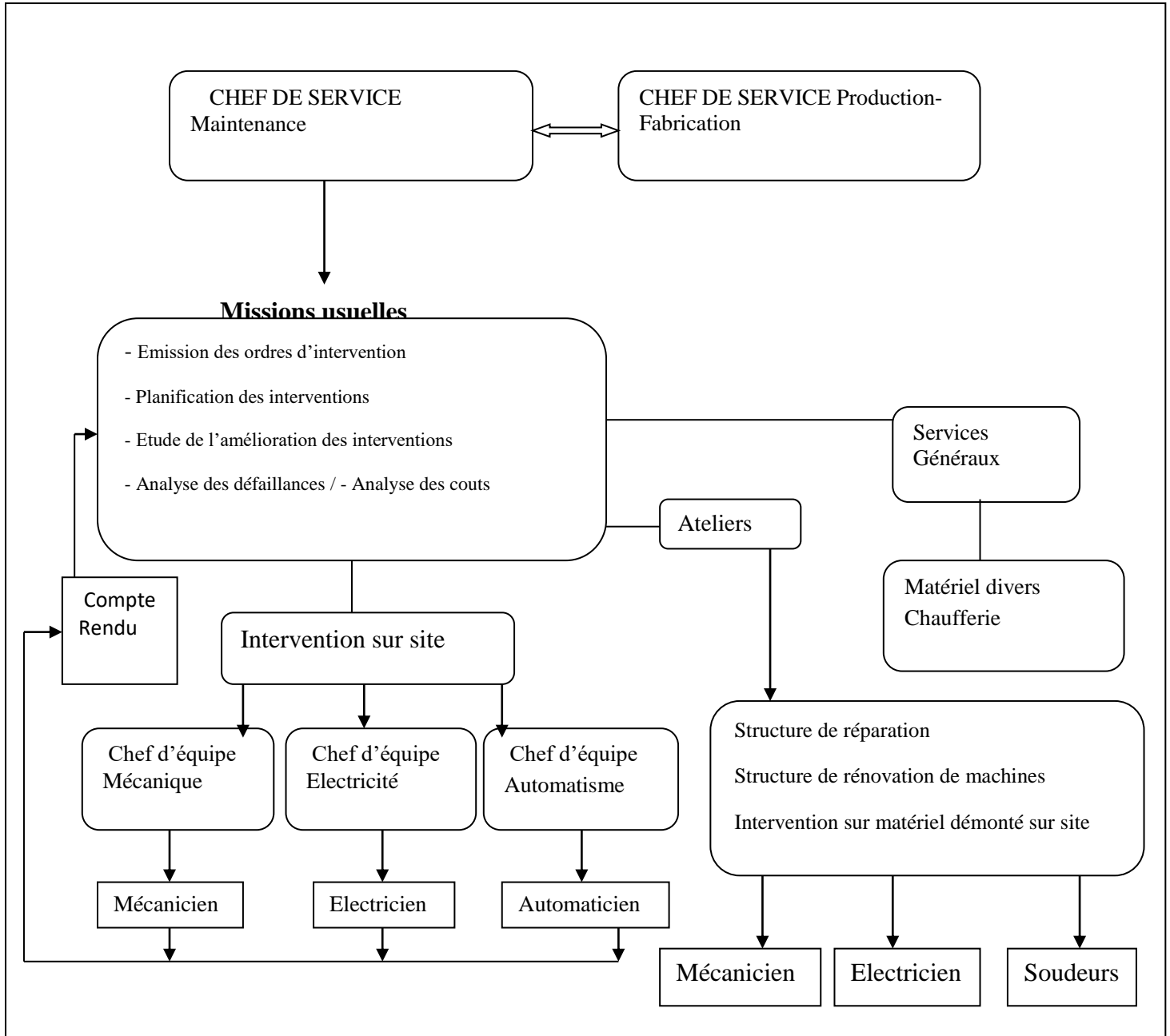


Figure I.1 : Schéma d'une structure organisation de maintenance [4].

I.5 Différents types de maintenance

On distingue deux types de maintenance, La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance (totale ou partielle) du système alors que la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement.

Ces deux grandes catégories divergent à plusieurs méthodes dépendantes de l'utilisation et du type de matériel. La figure (I. 2) qui suit résume les différents types de maintenance.

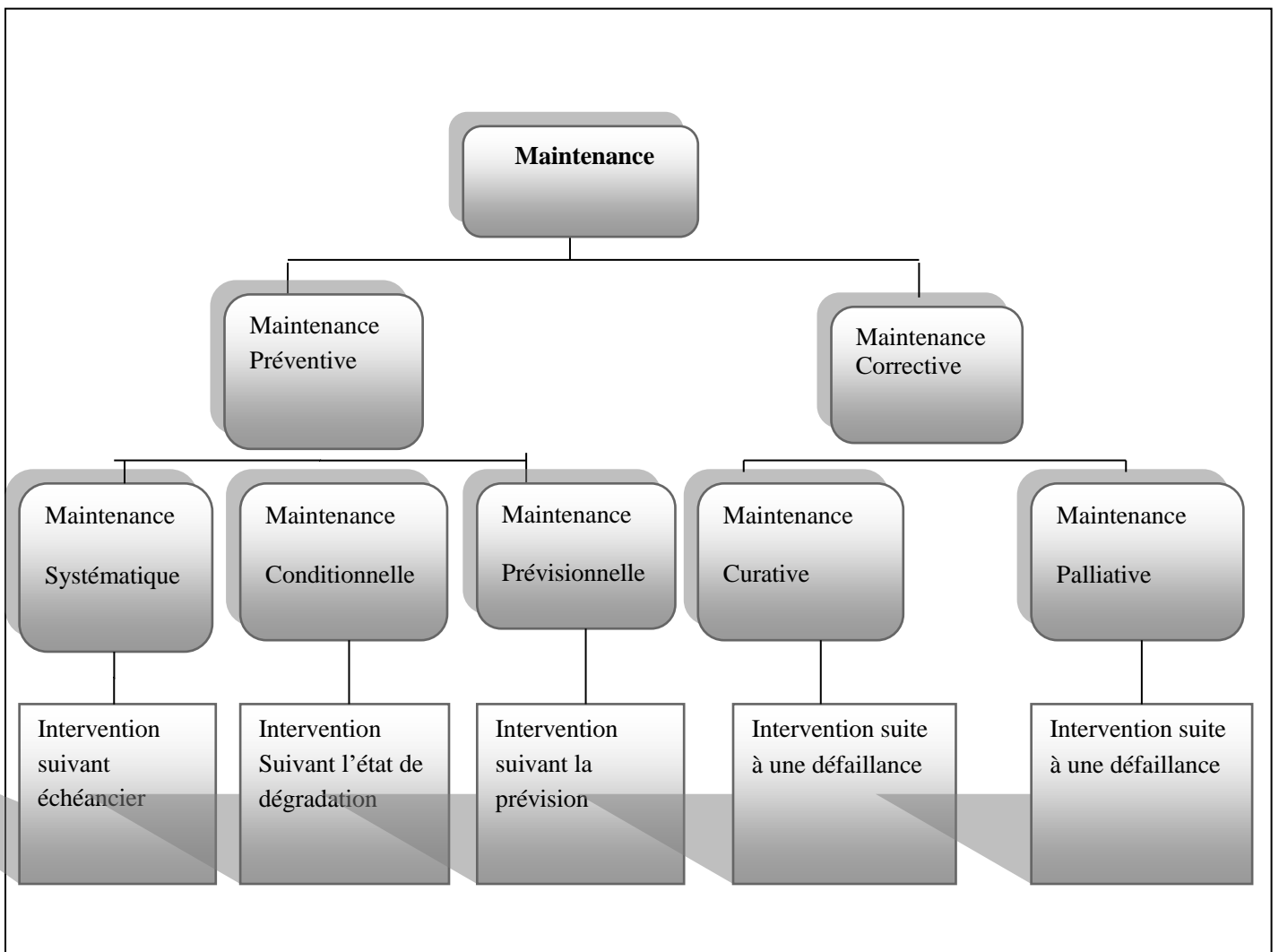


Figure I. 2 : Différents types de maintenance

I.5.1 Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Autrement dit, la maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilité de dysfonctionnement des systèmes de production [4].

La maintenance préventive est une «*maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la d' dégradation du fonctionnement d'un bien* » [2]. Elle peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle

I.5.1.1 Maintenance préventive systématique [15]

Lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de maintenance systématique. L'opération de maintenance est exécutée conformément à un échéancier, un calendrier déterminé a priori. L'optimisation d'une maintenance préventive systématique consiste à déterminer au mieux la périodicité des opérations de maintenance sur la base du temps, du nombre de cycles de fonctionnement, du nombre de pièces produites, etc.

➤ Visites systématique

Les visites sont effectuées selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unité d'usage. A chaque visite, on détermine l'état de l'organe qui sera exprimé soit par une valeur de mesure, soit par appréciation visuelle.

Par principe, la maintenance préventive systématique est effectuée en fonction de conditions qui reflètent l'état d'évolution d'une défaillance. L'intervention peut être programme juste à temps avant l'apparition de la panne.

➤ Remplacement systématique

Selon un échéancier défini, on remplace systématiquement un composant, un organe ou un sous-ensemble complet (il s'agit d'un échange standard).

➤ Ronde ou visite en marche

La visite systématique effectué pendant le fonctionnement permet d'optimiser l'arrêt machine. Pour ce type de maintenance, on suit l'effet de la dégradation ou de l'usure pour éviter le démontage indésirable.

I.5.1.2 Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen [4].

La maintenance conditionnelle permet d'assurer le suivi continu du matériel en service, et la décision d'intervention est prise lorsqu'il y a une évidence expérimentale de défaut imminent ou d'un seuil de dégradation [15] La planification des interventions repose sur l'existence et la détermination de seuils critiques pour ces paramètres de dégradation. On parle alors de seuils de décision

I.5.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de dégradation du bien, permettant, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc de planifier une intervention avant défaillance totale ou partielle. Elle est encore appelée maintenance prédictive, mais ce terme n'est pas normalisé. La maintenance préventive prévisionnelle peut s'appliquer à tous les matériels. Son efficacité est grandement accrue par l'utilisation de l'outil informatique [4].

Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection

I.5.2 Maintenance corrective

Maintenance corrective est utilisée après la défaillance (totale ou partielle) d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, en réalisant l'ensemble des activités afin de remettre un bien dans état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

I.5.2.1 Maintenance corrective palliative

La maintenance corrective palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Ces activités sont du type dépannage [4].

I.5.2.2 Maintenance corrective curative

La maintenance corrective curative regroupe les activités correctives ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Ces activités sont du type réparation [4].

I.6 Quelques notions de la SDF

I.6.1 La fiabilité (Reliability)

C'est «l'Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné ». [2] La fiabilité a pour but de satisfaire les besoins d'utilisateurs dans des conditions données pendant une durée donnée, puisque La maîtrise de la fiabilité d'un système représente un enjeu économique important pour toute entreprise.

Elle est caractérisée 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.

$$R(t) = P[\text{Enon defaillante sur } [0, t]] \quad (\text{I.1})$$

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

$F(t)$ est la fonction de répartition de la durée de vie de système.

On utilise diagramme de fiabilité (DF), appelé aussi diagramme de succès afin de représenter l'architecture du système qui permet d'analyser et de calculer la fiabilité des systèmes.

I.6.2 La disponibilité (Availability)

C'est «l'Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée ». [2]

L'objectif du service de maintenance est d'assurer la disponibilité optimale au moindre cout. La disponibilité $A(t)$ exprime la probabilité pour que le système accomplisse sa fonction à un instant t sous des conditions données.

$$A(t) = P [\text{que l'équipement non défailant à l'instant } t] \quad (\text{I.3})$$

On distingue deux types de disponibilité : disponibilité intrinsèque, disponibilité opérationnelle. Comme le montre l'organigramme suivant :

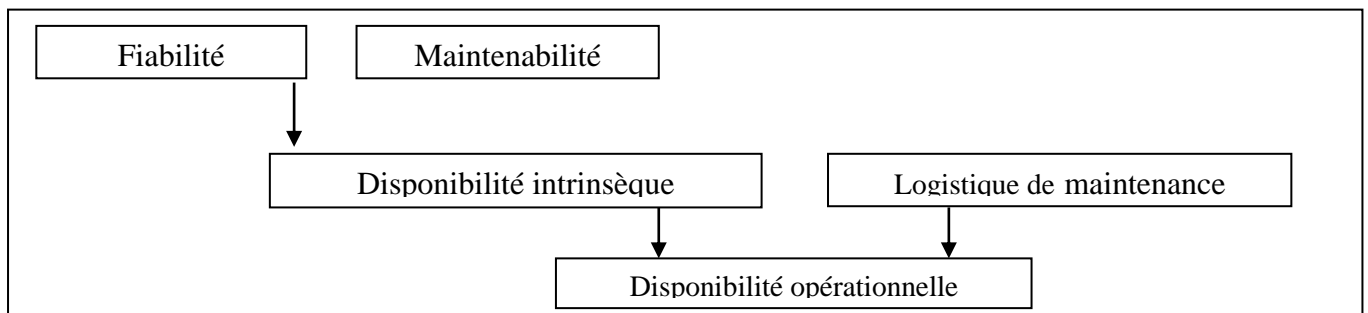


Figure I.3 : Disponibilité intrinsèque et opérationnelle [12].

La disponibilité intrinsèque est définie par la quantité :

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (\text{I.4})$$

La disponibilité opérationnelle est définie par la quantité

$$A_{op} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR + MTL} \quad (\text{I.5})$$

Avec ;

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement

MTTR : Moyenne des Temps Techniques de Réparation

MTL : Moyenne des Temps Logistiques

I.6.3 La Maintenabilité (Maintainability)

C'est «l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits ». [2]

Nous noterons $M(t)$ la fonction de maintenabilité définie comme suite :

$$M(t) = P [\text{que le dispositif soit réparé avant } t] \quad (\text{I.6})$$

La maintenabilité est l'un des facteurs d'influence sur l'amélioration de disponibilité, donc la productivité d'un équipement.

I.6.4 La sécurité (Safety)

C'est «l'Aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques ». [2]

La sécurité $S(t)$ est la probabilité que l'entité E n'apparaît pas dans des conditions données.

$$S(t) = P[E \text{ évite des événements critique ou catastrophique}] \quad (\text{I.7})$$

Les services maintenance ont la charge de l'application de la réglementation relative aux équipements qu'ils doivent maintenir, dans l'optique de la sécurité des intervenants.

I.7 Documents nécessaires à prévoir

Une intervention de maintenance sur un système ne peut se faire sans référence à des documents précis et à jour. Chaque machine ou système possède différents dossiers qui permettent de connaître les différentes structures de l'ensemble. Les interventions de maintenance sont obligatoires pour la conservation du système dans état optimal de production. De plus, ces interventions doivent se faire au moindre cout, sans gêner la production. Pour tenir cet objectif, il est indispensable de pouvoir consulter à tout moment le passé, au niveau technique, du bien de production.

I.7.1 Dossier technique

Il regroupe les aspects techniques propres à un type de machine, à savoir :

- Les schémas électriques
- Les plans et schémas mécanique
- Les données et paramètres de fonctionnement
- Les caractéristiques fonctionnelles.

- **Dossier relatifs à son cycle de fonctionnement**
 - Les différents GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) ;
 - Le GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts).

- **Dossier relatifs à la partie mécanique**
 - Les spécifications de réglage
 - Les interventions de maintenance particulières
 - Les modifications intervenues après mise en service
 - Les spécifications particulières, au niveau sécurité, concernant certaines interventions présentant des risques.
- **Fichier historique**

Il contient les traces écrites ou informatisées du passé propres au système. C'est à ce niveau que l'on peut parler d'évolution de maintenance par rapport à un entretien.

I.8 Enjeux et Objectif de la fonction de maintenance

La maintenance représente un enjeu économique essentiel pour les systèmes industriel, à la fois en raison des budgets qui lui sont alloués et des temps d'arrêts qu'elle peut engendrer. Selon le type d'industrie, les coûts de maintenance vont de 15% dans l'industrie alimentaire à 60% dans l'industrie lourde, selon le coût de fabrication du produit Ces coûts représentent les conséquences directes ou indirectes des temps d'arrêt des machines provoqués par des interventions de maintenance. Les coûts directs de maintenance comprennent les pièces de rechange, la main d'œuvre de réparation ou de remplacement et l'amortissement des outillages. Les coûts indirects comprennent les coûts de perte de production et les coûts logistiques associés aux actions maintenance. Le besoin d'une gestion optimale des stratégies

de maintenance est donc devenu une nécessité pour les industriels dans le but d'affronter la concurrence actuelle entre les entreprises.

L'objectif principal du service maintenance est d'améliorer la disponibilité de l'outil de production à un coût globale minimale.

I.9 Optimisation de la maintenance

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. Il faut alors déterminer les instants de maintenance et les actions à effectuer de manière à optimiser un critère de décision fixé. Ce critère de décision peut aussi bien reposer sur le coût, par exemple un coût moyen de maintenance à long terme ou le coût d'opération par unité de temps, que sur la disponibilité du système ou encore la sécurité [10]. La figure I.4 suivante représente les effets des interventions de maintenance sur les coûts liés à maintenance corrective et maintenance préventive. L'augmentation du nombre d'interventions sur le système permet de réduire les pannes mais pénalise le fonctionnement du système et peut entraîner une augmentation du cout globale d'exploitation du système.

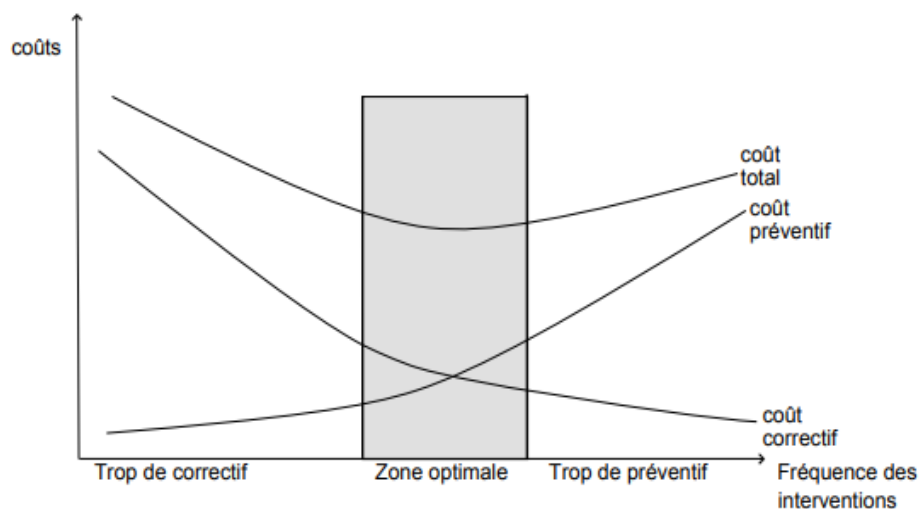


Figure I.4 : La nécessité de contrôler l'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective [10].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons souligné quelques notions générales sur la maintenance, la nécessité de bien organiser les tâches de maintenance puisqu'une bonne gestion de maintenance est un point important pour la sécurité, la gestion de l'entreprise et la sûreté des installations.

Nous avons cité les effets de maintenance sur le coût global de système dans le but d'optimiser la maintenance en obtenant un équilibre entre la maintenance préventive et la maintenance corrective.

Chapitre **II**

Types et modèles de dégradation

II.1 Introduction

Le processus de dégradation pouvant être de nature différentes, mène à une défaillance qui interrompu le processus normal de système de production si aucune action n'est exécutée, cela entraîne des pertes de production et une diminution des profits. Dans le but d'améliorer la fiabilité et la rentabilité des systèmes industrielles, il est indispensable de prédire ces défaillances. Cette prédiction s'appuie sur les outils pour analyser la dégradation des systèmes, une modélisation du processus de dégradation est donc nécessaire.

Dans un premier temps, nous présentons les concepts utiles. Ces derniers sont exploités dans ce qui suit.

Dans un second temps, nous présentons les différents modèles de dégradation et leurs formules mathématiques pour mieux comprendre les causes de panne des systèmes et savoir modéliser la dégradation.

II.2 Quelques concepts utiles

II.2.1 Panne (breakdown)

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise.

II.2.2 Dégradation (Degradation)

Évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation.

II.2.3 Stresse (Stress)

On appelle stress l'ensemble des conditions et facteurs extérieurs variables, généralement imprévus, susceptibles d'affecter le bon fonctionnement d'un système.

II.2.4 Défaillance (failure)

La défaillance est définie comme la « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état ». [2]

La défaillance est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou panne.

Les performances d'un système diminuent à cause des dégradations jusqu'à la défaillance. Cette défaillance peut être due à sa conception, sa fabrication, son installation, voire même sa maintenance.

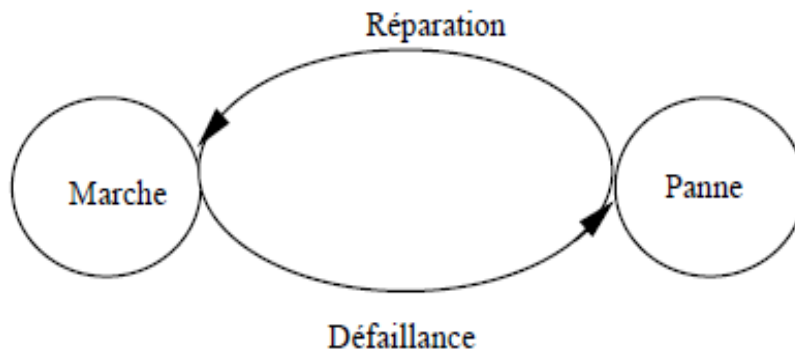


Figure II.1 : la relation entre l'état de marche et de panne d'un système.

II.2.4.1 Mécanismes de défaillance

On suppose que le système se dégrade continuellement, cette dégradation peut résulter par exemple d'une fatigue, l'usure progressive des pièces mécanique, l'érosion progressive des matériaux.

On suppose que le niveau de dégradation du système est mesurable. Par ailleurs, on suppose que le système est soumis à un stress qui peut être externe au système (température, humidité, etc.) ou une conséquence directe de son mode de fonctionnement (vibrations internes, température interne, etc.) On peut expliquer le mécanisme de défaillance de ce système par deux processus différents :

1. le premier processus résulte de l'accumulation de dégradation qui atteint un niveau excessif (supérieure à un certain seuil), et cause l'arrêt complet du système ou un niveau de performance inacceptable.
2. le deuxième processus est de type choc, l'occurrence entraîne la perte immédiate de la fonction principale du système.

On suppose qu'on a deux quantités mesurables le niveau de dégradation $X(t)$, et l'évolution de la variable d'environnement (stresse) $Y(t)$ Ils vont nous permettre de connaître l'état des systèmes complet ou partiel. $Z(t)$ est le niveau de fonctionnement du système [10] :

$$z(t) = \begin{cases} 1 & \text{si le système fonctionne} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

II.2.4.2 Classification des défaillances

Deloux [10] a classifié les défaillances selon la cause d'une part, et selon l'impact sur les performances du système d'autre part.

➤ Classification des défaillances par cause

1- Défaillances aléatoires : sont des défaillances physiques pour lesquelles les performances de système diminuent. Dans des défaillances aléatoires, on distingue :

- Les défaillances liées à la dégradation du système : ces défaillances sont liées au vieillissement du système.
- Les défaillances liées au stress : ces défaillances sont liées à des stress excessifs sur le système qui peuvent être d'origine des causes extérieures ou des erreurs humaines durant la maintenance.

2- Défaillances systématiques : les défaillances systématiques ne sont pas physiques. Les performances du système diminuent alors que ce dernier ne se dégrade pas physiquement. Ces défaillances peuvent être liées à la conception du système, à sa fabrication, ou aux interactions avec le milieu extérieur. Ces défaillances peuvent être éliminées uniquement par une modification de la conception, du processus de fabrication, ou par des procédures d'opération.

➤ Classification des défaillances en fonction de leur impact sur les performances du système

1- Défaillances intermittentes : résultent d'une perte de certaines fonctions du système pour une durée courte. Le système retrouve ses performances d'opération juste après la défaillance.

2- Défaillances étendus : résultent d'une perte de certaines fonctions du système qui perdure dans le temps jusqu'à ce que le système soit restauré (réparé ou remplacé).

Les défaillances étendues peuvent être : Complete (perte totale de fonction principale) ou partielle (perte de certaines fonctions). Ces derniers peuvent être elle-même divisées en deux types :

- Défaillances soudaines : ces défaillances ne peuvent pas être prédites par des tests.
- Défaillances graduelles : ces défaillances sont prédites par des tests ou des inspections.

Finalement, on a des défaillances catastrophiques appartiennent aux défaillances soudaines complètes. Des défaillances dégradées appartiennent aux défaillances graduelles partielles.

II.2.5 Processus stochastique

Les processus stochastiques sont des concepts utiles pour la modélisation des phénomènes évoluant d'une manière aléatoire (non déterministe) avec le temps où la prédiction de future est impossible pour des raisons différentes : soit le système est soumis à une ou plusieurs forces inconnues, ou bien tout simplement, les forces agissent d'une façon aléatoire.

Soit X une variable aléatoire qui associé à tout résultat ζ d'une expérience le nombre $X(\zeta)$. Un processus stochastique $X(t)$ est une loi mathématique attribuée à chaque fois ζ une fonction $x(t, \zeta)$. Autrement dit un processus stochastique est une famille de fonctions dépendants des paramètres $t \in T$ et ζ . T est dit l'ensemble des paramètres, et toutes les valeurs prise par la fonction $X(\zeta)$ forment l'ensemble des états noté E .

Si : $T = R^+$, $X(t)$ est dit processus continu dans le temps (à paramètre continu), alors les éléments de E forment un ensemble continu, on dit que le processus est un processus d'états continu.

Si : $T = N^+$, $X(t)$ est dit processus discret dans le temps (à paramètre discret), alors les éléments de E forment un ensemble discret, on dit que le processus est un processus d'états discret.

II.3 Modèles de dégradation

Les modèles de dégradation nous permettent d'identifier l'état dans lequel peut se retrouver le système de production qui n'est pas limité au état de marche et de panne. La défaillance se produit lorsque le niveau de dégradation atteint un certain seuil.

En littérature, deux mécanismes primaires sont présents, l'un consiste à utiliser une distribution existante des durées de vie du système, l'autre il s'agit de contrôler le phénomène physique (corrosion, érosion, etc.) qui provoque la défaillance [9].

On distingue trois modèles de dégradation selon Booher [6] :

- Modèles de chocs : qui sont efficaces pour la modélisation d'une dégradation résultante des différentes sollicitations appliquées sur le système d'une manière discret dans le temps ;
- Modèles d'usures : sont utiliser pour la modélisation d'une dégradation d'une manière continue dans le temps ;
- Modèles hybrides : considère l'effet combiné d'usure et de choc sur les durées de vie des systèmes.

Selon Deloux [10] deux grandes familles de classification des modèles de dégradation, à savoir :

- Les modèles à dégradation continue.
- Les modèles à dégradation discrète

Dans ce chapitre, nous nous intéressons surtout à deux familles de processus : les processus de Markov et les processus de Lévy.

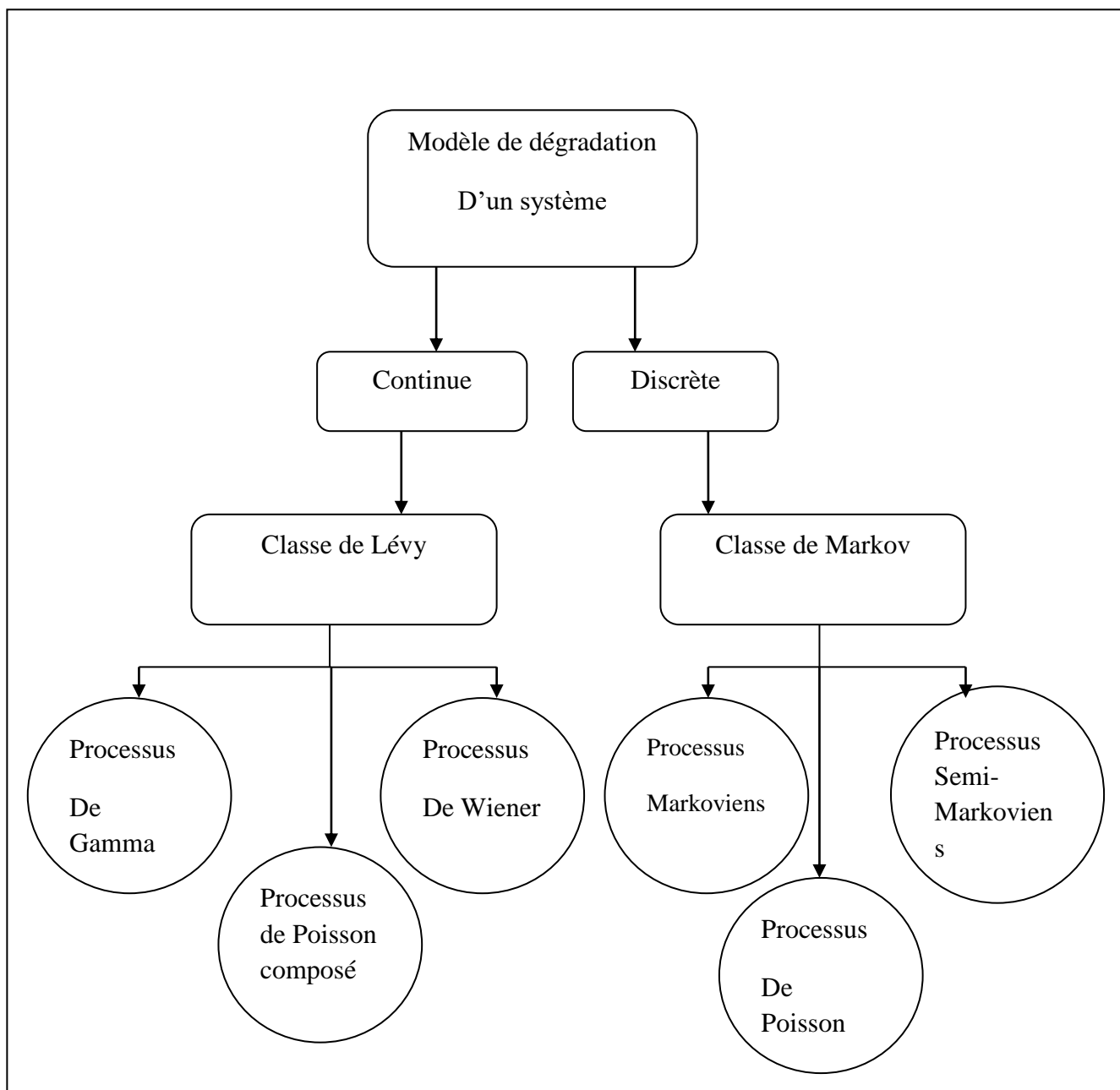


Figure II.2 : différents modèles de dégradation d'un système.

II.3.1 Modèles à dégradation continue

L'évolution de dégradation est croissante dans le temps (grandeur positive à trajectoire croissante). Dans les modèles à dégradation continue, on suppose qu'on connaît les lois des incréments de dégradation entre deux instants consécutifs qui nous permettent de prédire le niveau de dégradation du système à tout instant.

Plusieurs processus stochastiques et outils mathématiques sont utilisés afin de modéliser la dégradation continue, ces processus appartiennent à la classe de Lévy dont les accroissements sont stationnaires et indépendants, à savoir : le processus Gamma, le processus de Poisson composé et le processus de Wiener appelé aussi le mouvement Brownien.

On représente la schématisation de modèle à dégradation continue dans la figure suivante :

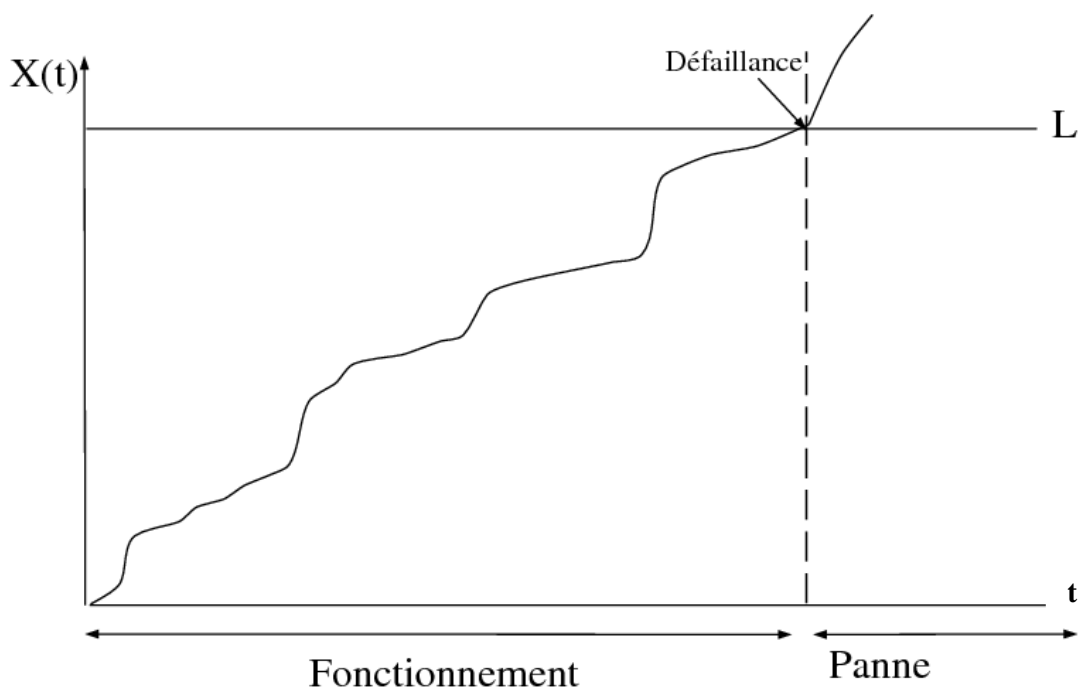


Figure II.3 : Schématisation d'un modèle à dégradation continue.

Avec, L est le seuil d'alarme (dépassement).

II.3.2 Modèles à dégradation discrète :

Les phénomènes comme le mouvement d'une particule, l'apparition d'une panne ou l'usure d'un composant mécanique sont donc des variables aléatoires qui peuvent occuper n'importe quelle position temporelle. Cependant, une discrétisation temporelle simplifierait plus les calculs à condition que la description du modèle soit correcte et que le passage du temps discret au temps continu ne modifie pas les résultats essentiels du problème. Il suffit alors de prendre une limite de pas de temps de discrétisation adéquate au problème. Dans les modèles à dégradation discrète l'ensemble possible des états du système est fini. Chaque état désigne un niveau de dégradation du système [3].

On suppose que l'ensemble possible des états du système est fini ou dénombrable, chaque état représentant un niveau de dégradation du système. Les modèles de dégradations discrète permettent de modéliser les dégradations de type chocs ce que veut dire que l'état de dégradation de systèmes passe d'un état a un autre par un incrément de type saute, l'une des propriétés principales de ce modèle est que l'état de système reste le même entre deux seuil de dégradation et l'incrément s'ajoute jusqu'à la défaillance totale de système.

On peut illustrer ce modèle dans le schéma qui suit :

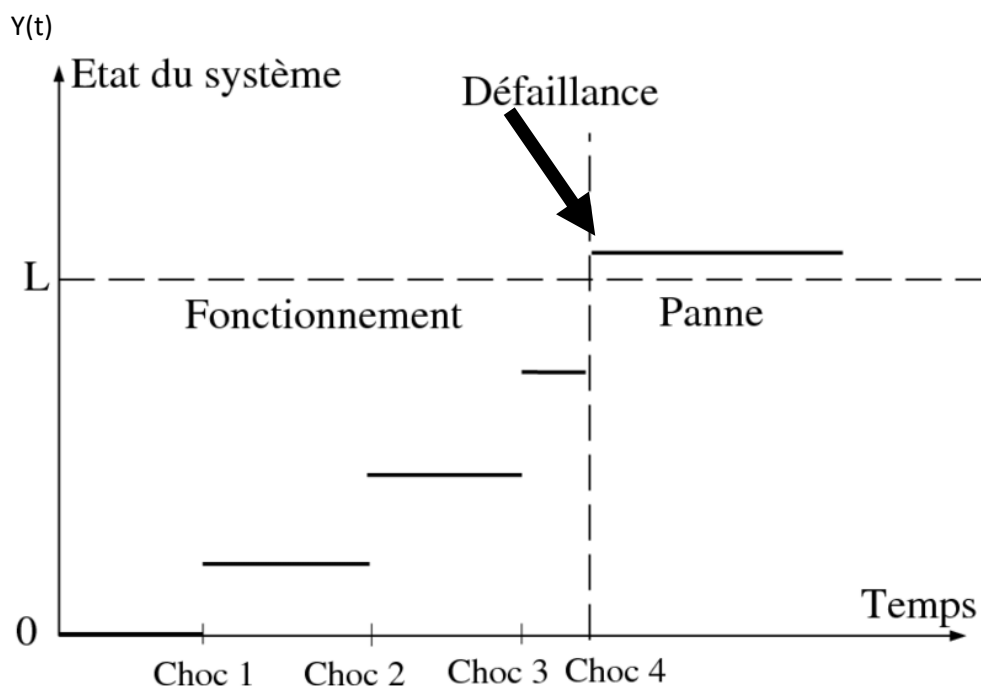


Figure II.4 : Schématisation d'un modèle a dégradation discret.

Avec, L est le seuil d'alarme (dépassement).

II.4 Modèles mathématiques

II.4.1 Processus stochastique pour les dégradations continue

II.4.1.1 Processus de Lévy

Soit $(L(t))_{t \in \mathbb{R}^+}$ un processus stochastique à temps continu avec $L(0) = 0$, ce processus est dit de Lévy, s'il est :

- A accroissements indépendants :** les incréments calculés sur des intervalles de temps sans chevauchements sont des variables aléatoires indépendantes. Pour tout $n \in \mathbb{N}$ et pour tout $0 \leq t_0 \leq \dots \leq t_n \leq +\infty$, les variables aléatoires $L(t_{j+1}) - L(t_j)$ pour $0 \leq j \leq n-1$ sont indépendantes.
- A accroissements stationnaires :** la loi de chaque incrément ne dépend que de l'intervalle de temps écoulé. Pour tout $t_i, t_j > 0$, la variable aléatoire $L(t_i + t_j) - L(t_i)$ suit la même loi que de $L(t_j) - L(0)$.
- Continu en probabilité :** $L(t)$ est stochastiquement continu, pour $\varepsilon > 0, \Delta t > 0, t \geq 0$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P[|L(t + \Delta t) - L(t)| > \varepsilon] = 0 \quad (\text{II.2})$$

1- Le processus Gamma

Abdel Hameed [1] est le premier à implanter le processus Gamma comme un modèle approprié pour la modélisation des phénomènes de détériorations aléatoires, ce processus est fréquemment utilisé dans la littérature pour modéliser les mécanismes de vieillissement qui sont par nature lents, continus, progressifs et non résolue

Le processus Gamma est un processus de saut où le nombre est infini. Ce processus de Lévy est considéré comme un fort candidat pour la modélisation des phénomènes de dégradation, lorsque cette dernière est considérée comme une forme d'accumulation continue de dommage et monotone au fil du temps [13].

Définition [1] : le processus $(Y_t)_{t \geq 0}$ est un processus Gamma homogène et stationnaires si :

- $Y_0 = 0$;
- pour tous $n \geq 1$ et tout $0 \leq t_1 \leq t_2 < \dots < t_n$, les accroissements $Y_{t_1}, Y_{t_2} - Y_{t_1}, \dots, Y_{t_n} - Y_{t_{n-1}}$ sont indépendants
- pour tout $\Delta t > 0, t > 0$, la loi de l'accroissement $Y_{t+\Delta t} - Y_t$ est une loi Gamma $G(\alpha \Delta t, \beta)$ où $\alpha, \beta > 0$.

Dans le cas d'un processus Gamma non homogène, α est une fonction donnée monotone et croissante.

Le processus Gamma doit son nom à la loi Gamma dont densité de probabilité s'écrit de la forme suivante :

$$f_{\alpha t, \beta}(y) = \frac{\beta^\alpha y^{\alpha t - 1} e^{-\beta y}}{\Gamma(\alpha t)} \quad (\text{II.3})$$

Où,

β : Paramètre d'échelle

α : Paramètre de forme

$\Gamma(z)$ est la fonction Gamma d'Euler définie par :

$$\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} y^{z-1} e^{-y} dy \quad (\text{II.4})$$

$\lambda(t)$ est le taux de défaillance définie par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha t - 1} e^{-\beta t}}{\int_t^{+\infty} \Gamma(\alpha t) f_{\alpha t, \beta}(y) dy} \quad (\text{II.5})$$

Les données disponibles pour la modélisation des dégradations avec le processus Gamma sont généralement les données de mesure de l'état d'un composant et les dates d'inspection. Cependant, l'obtention des bonnes données n'est pas garantie parce qu'en réalité les inspections sont effectuées de façon plus ou moins régulière et les défauts ne sont pas toujours correctement identifiés.

Le processus Gamma est utilisé dans un large domaine d'application, puisqu'il utilise des calculs mathématiques nécessaires simples et explicites dans le but d'optimiser la prise de décision de maintenance sachant que la planification de la maintenance préventive basée sur le temps ou l'état du système et l'évaluation de la fiabilité des équipements en temps réelle. On peut aussi l'utiliser dans le calcul de la durée de vie résiduelle (RUL) des systèmes.

Van Noortwijk (2009) [23] a présenté dans son étude une liste détaillée sur des applications de processus Gamma pour la maintenance préventive des systèmes suivant différentes politiques de maintenance.

2- Processus de poisson composé

Le processus de poisson composé est un processus continu à droite, limité à gauche et à accroissements indépendants et stationnaire. Il correspond, alors, à un processus constant par morceaux qui saute aux instants de sauts d'un processus de Poisson standard, et dont les

tailles de sauts sont des variables indépendantes et identiquement distribuées d'une loi donnée [3]. Ce processus $Y(t)$ On l'utilise lorsqu'on considère que la variation causée par les chocs sur l'état du système sont aléatoires et que le niveau d'évolution global du processus à l'instant t correspond à la somme des incréments cumulé jusqu'à cet instant.

Définition [2,13] : le processus $Y(t)$, $t \geq 0$ est un processus de poisson composé d'intensité λ et de distribution de sauts v_z .

$$Y(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Z_k = \sum_{k=1}^{+\infty} Z_k 1_{T_K} \quad (\text{II.6})$$

$N(t)$ est la fonction de comptage (la fonction aléatoire) définit sur l'espace des entiers naturels pour tout $t \geq 0$ par :

$$N(t) = \sum_{K \geq 1} 1_{\{T_K \leq t\}} \quad (\text{II.7})$$

3- Le processus de Wiener (Mouvement Brownien)

Parmi les modèles sans mémoire, un modèle a été proposé en 1990 pour le mouvement des prix des actions à temps continu. Ce processus évolue en temps continu et à trajectoires continues, il possède aussi des accroissements indépendants [13]. Ce processus est une description des mouvements aléatoires d'une particule immergée dans un fluide et qu'elle est soumise à des chocs (collisions) avec les molécules du fluide environnant (mouvement brownien). Le processus de Wiener est gaussien dont la densité de probabilité obtenue par la méthode de marche aléatoire est gaussienne donnée par la relation [5] :

$$W(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t-t_0)}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4D(t-t_0)}} \quad (\text{II.8})$$

X_0 : l'espérance, il exprime le fait que la particule virevolte autour du point de départ.

D : est une constante très petite ($D \ll 1$).

La variance est $\sigma^2 = \frac{D(t-t_0)}{2}$. (III.9)

Où,

σ : Coefficient de diffusion

Le processus de Wiener est souvent utilisé en mathématique appliquée, en physique et en économie pour l'analyse des données de dégradation ainsi que les données financières, puisqu'il permet d'effectuer et de simplifier certains calculs.

Park and Padgett [18] ont utilisé ce processus pour définir un modèle de base qui décrit l'évolution des dommages cumulatifs des matériaux. Yu wang et al [24] utilisent le modèle

pour étudier l'usure de la tête magnétique des disques durs. Doksum et al [11] ont supposé que la dégradation dans la matière d'isolation des câbles électriques suit un processus de Wiener et que les taux de défaillance peuvent être analysés en utilisant la distribution IG.

II.4.2 Processus stochastique pour les dégradations discrètes

1. Processus de poisson :

Le processus de poisson est largement utilisé dans la modélisation des phénomènes aléatoires pour décrire les instants d'occurrences d'un événement récurrent c'est un cas particulier des processus ponctuels.

C'est un processus de comptage par ce que on doit décrire le nombre d'occurrence d'un événement récurrent répétitif pendant un intervalle de temps donnée. Soit $\{N_t, t > 0\}$ est un processus de comptage. N_t représente le nombre d'événements qui se sont produits dans l'intervalle de temps $[0, t]$.

Définition [3,10] : Soit : $(T_n)_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires tels que : $(T_{N+1} - T_N)_{n \geq N}$ sont indépendantes et identiquement distribuées selon une loi exponentielle de paramètre $\lambda > 0$. Les variables représentent les temps d'occurrences tel que : $(T_0 = 0)$ Un processus de Poisson $(N_t)_{t \geq 0}$ de paramètre λt est un processus de comptage associé à T_n tel que [21] :

$$(N_t)_{t \geq 0} = \sum_{n \geq 1} 1_{\{T_n \leq t\}} \quad (\text{II.10})$$

$$P(N_t = n)_{n \in \mathbb{N}} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (\text{II.11})$$

En particulier on a :

$$E[N_t] = \lambda t \quad (\text{II.12})$$

Le processus de poissons est utilisé dans de nombreuse application surtout pour la modélisation de phénomène de dégradation par chocs par exemple [5] :

- La modélisation de la génération des défauts.
- L'évolution de fissure de fatigue

- La profondeur de corrosion sur des métaux.
- Le processus de poisson lorsqu'il est employé en association avec d'autres processus à temps continu peut apporter des avantages dans la modélisation des événements rares et extrêmes.

2. Processus markovien

Une chaîne markovienne est généralement définie par un processus markovien à temps discret et l'espace d'état fini ou dénombrable. Elle est plus utilisée pour le traitement probabiliste des systèmes dynamiques. Elle a valeur dans un espace fini E cette propriété suppose que l'estimation de l'état du futur dépend seulement du présent indépendamment du passé. Le processus markovien est utilisé pour la présentation de la dynamique d'un phénomène aléatoire permutant sur un nombre fini d'états possible.

Définition [3,10] : Une chaîne de Markov à temps discret est un processus stochastique $(X_n)_{n \geq 1}$ à temps discret, à espace d'états E fini ou infini et vérifiant la propriété de Markov :

$$p[X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0] = p[X_{n+1} = j | X_n = i] \quad (\text{II.13})$$

Tel que : $(x_k)_{0 \leq k \leq n-1}, i, j \in E \quad (\text{II.14})$

Une chaîne de Markov à temps discret est dite homogène si, pour tout couple d'états (i, j) et pour tout instant n on a :

$$P[X_{n+1} = j | X_n = i] = P[X_{n+k} = j | X_{n+k-1} = i], k \geq 0 \quad (\text{II.15})$$

Par conséquent :

$$P[X_{n+1} = j | X_n = i] = P[X_1 = j | X_0 = i] = P_{i,j}, \forall (i, j) \in E^2 \quad (\text{II.16})$$

$P_{i,j}$: La probabilité de transition initiale de i à j

Pour un système à $|\varepsilon|$ états, la matrice de transition $P = (P_{i,j})$ sera de taille $|\varepsilon| \times |\varepsilon|$. Les lignes et colonnes de la matrice sont indexés par les éléments de ε .

3. Processus semi markovien

La structure de ce processus est identique à celle de processus Markov de saut. La seule différence entre ces deux processus vient du fait que la durée entre deux sauts pour un processus de Markov de sauts suit une loi exponentielle alors que pour un processus semi-markovien elle peut suivre n'importe quelle distribution.

Définition [3]

$q \in M_E$ Est une matrice de transition semi-markovienne si :

$$1) \text{ Si } q_{i,j}(k) \geq 0, \forall i, j \in \mathcal{E}, \forall k \in \mathbb{N} \quad (\text{II.17})$$

$$2) \text{ Si } q_{i,j}(0) = 0 \forall i, j \in \mathcal{E} \quad (\text{II.18})$$

$$3) \text{ Si } \sum_{k \in \mathbb{N}} \sum_{j \in \mathcal{E}} q_{ij}(k) = 1 \forall i \in \mathcal{E} \quad (\text{II.19})$$

Si (J_n, S_n) est une chaîne de renouvellement markovien homogène, J_n est une chaîne de Markov de matrice de transition

$$(P_{ij}) = \sum_{k \in \mathbb{N}} q_{ij}(k). \quad (\text{II.20})$$

II.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons parlé sur la dégradation en général et ses différents outils mathématiques afin de modéliser l'effet de la dégradation sur les systèmes de production et leur vieillissement au fil de temps, à savoir :

- Modèle à dégradation continue.
- Modèle à dégradation discrète.

Cela permet de déterminer et de modéliser les sources de dégradation qui sont importants pour caractériser le système, en prenant en compte les impacts de leur détérioration sur sa performance.

Chapitre **III**

Politique d'inspection non périodique

III.1 Introduction

L'un des principaux objectifs de la gestion des installations industrielles est de faire en sorte que l'équipement réponde aux exigences de l'entreprise, cela se fait en maximisant les profits et minimiser les pertes. Pour cela il faut adopter une stratégie de maintenance qui s'oriente vers la réduction des coûts des actions de maintenance et amélioration de la disponibilité de système de production à maintenir.

Dans les installations industrielles il est très souvent possible d'obtenir les informations directes sur l'état des équipements à tout moment si une inspection approprié est effectué. En général, les inspections consistent soit à évaluer si le matériel fonctionne ou s'il est en état de défaillance (*inspection directe*) ou à mesurer les paramètres de contrôle prédéterminés et ensuite comparer les valeurs mesurées à des seuils prédéfinis (*inspection indirecte*).

Les politiques d'inspection permettent de faire des analyses importantes sur l'état des systèmes en vue des interventions de maintenance appropriées allant des interventions de maintenance préventive à des remplacements.

Nous présentons dans ce qui suit les différents types d'inspection existant et quelques travaux effectués sur ces derniers.

On a aussi mené une étude sur la dégradation d'un système qui est modélisée par le processus Gamma dans le but de réduire la dégradation d'un système de production en maximisant la disponibilité stationnaire de ce système.

Alors deux modèles mathématiques de disponibilité sont proposées dont la variation des actions de maintenance et d'inspection nous permettent de trouver les solutions optimales à l'aide d'une procédure numérique en se basant sur MATLAB.

III.2 Politique d'inspection

La dégradation d'un système et/ou son état de fonctionnement peut être obtenue par inspection. Selon la norme NF EN133306 [2] une inspection est :” *un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance* ”.

De nombreux travaux ont été développés pour la modélisation des stratégies d'inspection, CHOUIKHI [9] a proposé des politiques d'inspection basé sur les critères d'optimisation (coût ou disponibilité), dans l'objectif de minimiser le coût total moyen par unité de temps ou de maximiser la disponibilité stationnaire du système, par l'obtention des dates optimales d'inspection. Selon THI P.K.N. [19] deux grandes familles peuvent être considérés. A savoir les stratégies d'inspection périodique et les stratégies d'inspection non périodique.

Dans ce qui suit nous présentons deux types de classification des politiques d'inspection. A savoir la classification selon la périodicité (intervalle entre deux inspection) d'effectuer une action d'inspection. Et selon la qualité d'information obtenue suite à une action d'inspection.

III.2.1 Classification selon la périodicité

III.2.1.1 Politique d'inspection périodique

Les inspections périodiques sont adaptées particulièrement aux systèmes complexes (les avions, les navires, les centrales nucléaires, les raffineries de pétrole, etc.) qui ne peuvent être inspectés à n'importe quel moment.

Le système est inspecté périodiquement (l'intervalle entre deux inspections consécutives est constant). Une maintenance préventive est effectuée lorsque le niveau de dégradation atteint un seuil P . Si le niveau de dégradation dépasse un seuil L un remplacement parfait (maintenance corrective) est effectuée. Les paramètres de décision dans ce cadre correspondent à l'intervalle d'inspection et le seuil de maintenance préventive P . Ensuite on a confrontés à un problème d'optimisation bidimensionnelle. Nous avons remarqué la surveillance continue peut être considéré comme un cas particulier de la politique d'inspection régulière (périodique) unidimensionnelle. Dans ce cas, l'inspection est effectuée à chaque unité de temps et le problème se réduit à ne trouvé que le seuil de maintenance préventive.

En 2002 Jia et Christer [16] ont donné une extension de la politique d'inspection périodique à deux pas. Date de la première inspection de maintenance est T_1 , est la période d'inspection ultérieure est T . cette dernière politique anticipe la dégradation de la politique d'inspection (elle prend en considération le niveau de dégradation).

III.2.1.2 Politique d'inspection non périodique

Dans l'inspection non périodique, la durée entre deux inspections consécutives est variable. Lorsque la dégradation est monotone, l'adaptation de l'intervalle d'inspection devient plus intéressant qui dépend du niveau de dégradation observé. Ceci permet de limiter le nombre d'inspection avec un faible degré de détérioration et ajuster autant que possible un remplacement préventif possible à proximité. Dans cet esprit, une politique d'inspection non programmée a été proposée, T_N est exécuté à chaque instant défini ci-dessous :

$$T_N = T_{n+1} + I(D(T_n)) \quad \text{(III.1)}$$

$I(D(T_n))$: La fonction inter-inspections est décroissante en fonction du niveau de dégradation du système observé à l'instant T_N .

En 2003, CASTANIER et al [7] ont établi une politique d'inspection non périodique en considérant la possibilité de réparation partiel et de remplacement. L'efficacité de la réparation, le coût et le temps d'entretien dépendent d'état de système observé. En 2005, CASTANIER et al [8] ont développé une politique pour un système à deux composants en série que se dégradent continuellement et son inspecté irrégulièrement (non périodiquement). Ces composants peuvent être remplacés de manière préventive ou corrective. Chaque inspection ou remplacement entraîne un coût d'installation et un coût unitaire spécifique au composant. Le modèle d'optimisation peut combiner les actions sur les deux composants pour réduire le coût d'installation qui ne soit facturées qu'une seule fois.

III.2.2 Classification selon la qualité d'information obtenue

Une autre classification peut être citée, à savoir la classification selon la qualité de l'information obtenue suite à une inspection.

III.2.2.1 Inspection parfaite

Une inspection parfaite donne des résultats avec une fiabilité maximale. Autrement dit, la probabilité de fausse alerte (détection d'un défaut qui n'existe pas ou non détection d'un défaut existant) est nulle, une inspection parfaite donne l'état réel du système. Les modèles proposés ci-dessus pour les deux politiques d'inspections périodiques et non périodiques sont basées sur l'hypothèse que l'inspection est parfaite.

III.2.2.2 Inspection imparfaite

Pour les systèmes complexes (des systèmes multi composants par exemple) leur dégradation ne peut pas être observée directement. La certitude des informations obtenue grâce à l'inspection n'est plus assurée. On parle aussi de l'inspection imparfaite, lorsque le rôle de l'opérateur est important (précision et disposition du matériel, lecture visuelle, etc.), les conditions de travail affectent directement la qualité de la mesure. Nous pouvons citer, par exemple, des facteurs extérieurs comme la présence de brouillard, de températures extrêmes, de position de travail difficiles ou facteurs internes comme l'état de la fatigue et le degré de la concertation [21]. NEWBY et BARKER [17] ont considéré un modèle d'inspection imparfaite dans lequel le niveau de dégradation observé Y_t est soumis à une erreur ε_t (supposé gaussienne) :

$$Y_t = X_t + \varepsilon_t \quad \text{(III.2)}$$

X_t : État de détérioration du système.

La décision de maintenance préventive et corrective est basée sur le modèle d'optimisation du coût moyen et du coût du cycle de vie.

Un modèle de MARKOV caché a été proposé par Ghasmi et al en 2008 [14], afin de modéliser le processus de dégradation du système. En utilisant la programmation dynamique,

la moyenne des coûts d'exploitation à long terme est calculée afin d'optimiser l'intervalle d'inspection et le seuil de remplacement préventif.

III.3 Modèle de maximisation de disponibilité par l'optimisation des inspections non périodique

L'inspection permet de contrôler le processus de dégradation du système de production et de recueillir les données essentielles d'étude de fiabilité. En analysant ces données, des informations sur le niveau de dégradation du système peuvent être obtenues qui permet de réduire la dégradation du système à travers des actions de maintenance préventive.

III.3.1 Notations

Les notations utilisées dans ce chapitre sont :

T_c : durée moyenne de maintenance corrective.

T_i : durée moyenne d'inspection.

T_p : durée moyenne de maintenance préventive.

H : délai pour effectuer la maintenance préventive, à partir de la date d'inspection à laquelle le dépassement du seuil d'alarme est détecté.

T : temps aléatoire écoulé jusqu'au dépassement du seuil de dégradation du système

τ : réalisation de T sur l'axe du temps, à partir du début du cycle.

f : densité de probabilité de T .

X : temps aléatoire écoulé à partir de l'instant τ jusqu'à la panne (durée de vie du système après le dépassement du seuil).

x : réalisation de X , à partir de l'instant τ

g, G : densité de probabilité et fonction de répartition de X , respectivement.

N : nombre aléatoire d'inspections au cours d'un cycle.

Θ : vecteur des dates d'inspection θ_j , ($j = 1, 2, 3, \dots$).

T_d : temps aléatoire de dégradation excessive du système.

T_t : temps aléatoire du cycle (un cycle se termine soit par une maintenance corrective, soit par une maintenance préventive).

P_c : probabilité que le cycle se termine par une maintenance corrective.

P_p : probabilité que le cycle se termine par une maintenance préventive.

U_c : temps aléatoire de bon fonctionnement du système au cours d'un cycle.

D_c : temps aléatoire d'arrêt du système au cours d'un cycle.

A_{s1} : disponibilité stationnaire du système.

A_{s2} : disponibilité stationnaire du système supposé être indisponible après le dépassement du seuil d'alarme.

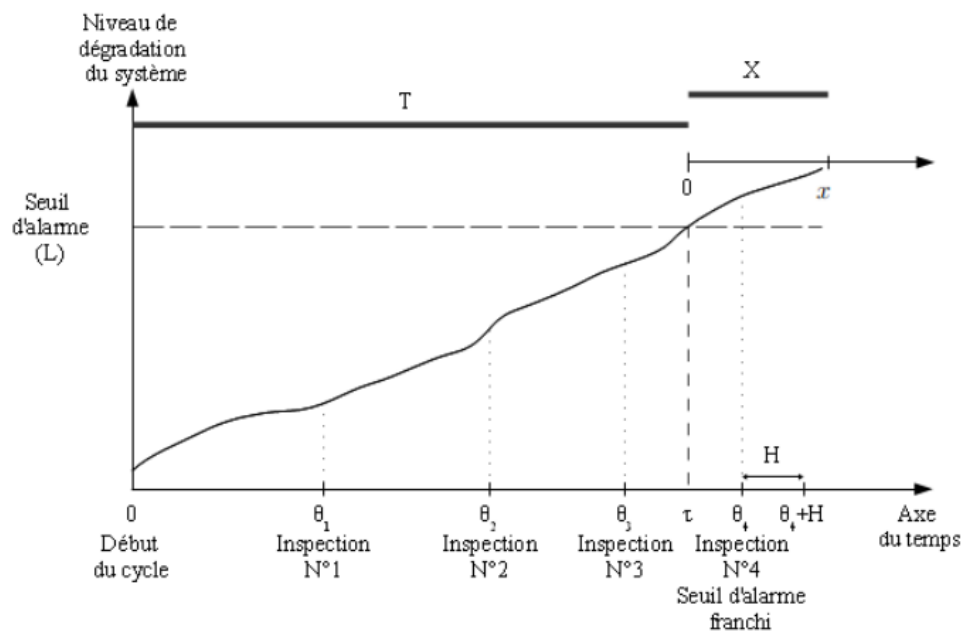


Figure III.1 – Planification de la maintenance préventive [9].

III.3.2 Les hypothèses

Les hypothèses de base sont les suivantes :

- Le système est soumis à une dégradation continue croissante, suit la loi Gamma.
- Le niveau de dégradation d'un système est connu seulement par inspection.
- Après chaque inspection deux types d'action sont possibles : ne rien faire, ou effectuer une maintenance préventive ou corrective.
- Les pannes de système sont supposées être auto-déclarées (la panne est détectée à l'occurrence).
- L'action de la maintenance préventive est basée sur le niveau de dégradation quand ce dernier dépasse un seuil L .
- L'action de la maintenance corrective est basée sur la détection de panne.
- Les deux actions de maintenance, préventive et corrective, sont supposées être parfaites.
- L'action d'inspection non périodique est supposée être parfaite.
- Les valeurs T_c, T_i, T_p et H aussi f et g sont supposées être connues.

III.3.3 Les modèles mathématiques

L'objectif est de déterminer les dates optimales d'inspection qui maximisent la disponibilité stationnaire du système.

Deux modèles de disponibilité sont présentés :

- A_{s1} est la disponibilité stationnaire du système de production qu'il est supposée disponible.
- A_{s2} est la disponibilité stationnaire du système de production qu'il est supposée indisponible après le dépassement de seuil de dégradation.

1-Premier modèle : Disponibilité stationnaire du système A_{s1}

La disponibilité stationnaire du système peut être exprimée comme suit :

$$A_{s1} = \frac{E(U_c)}{E(T_t)} \quad \text{(III.3)}$$

Où

$$E(T_t) = E(U_c) + E(U_d) \quad \text{(III.4)}$$

Avec,

$E(U_c)$: Le temps moyen de bon fonctionnement.

$E(T_t)$: Le temps moyen du cycle.

$E(D_c)$: Le temps moyen d'arrêt.

Pour exprimer disponibilité stationnaire A_{s1} , quelques équations sont données comme suit :

$$E(U_c) = \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} \left(\tau + \int_0^{\theta_j + H - \tau} [1 - G(x)] dx \right) f(\tau) d\tau \quad (\text{III.5})$$

$$E(D_c) = T_c P_c + T_p P_p + T_i E(N) \quad (\text{III.6})$$

Avec,

$$P_c = \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} G(\theta_j + H - \tau) f(\tau) d\tau \quad (\text{III.7})$$

$$P_p = 1 - \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} G(\theta_j + H - \tau) f(\tau) d\tau \quad (\text{III.8})$$

$$E(N) = \sum_{j=1}^{\infty} j \left(\int_0^{\theta_{j+1}} G(\theta_j + 1 - \tau) f(\tau) d\tau - \int_0^{\theta_j} G(\theta_j - \tau) f(\tau) d\tau \right) \quad (\text{III.9})$$

Dans le but de déterminer le vecteur optimal des dates d'inspection, La disponibilité stationnaire du système A_{s1} est considérée comme une fonction objective

$$\max_{\Theta} A_{s1}(\Theta) \quad (\text{III.10})$$

La disponibilité stationnaire A_{s1} dépend :

- des durées des actions de maintenance (préventive et corrective) ;
- de durée d'action d'inspection ;
- du temps moyen de bon fonctionnement du système.

L'expression mathématique de cette disponibilité est donnée par [8] :

$$A_{s1} = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} (\tau + \int_0^{\theta_j + H - \tau} [1 - G(x)] dx) f(\tau) d\tau}{\left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} (\tau + \int_0^{\theta_j + H - \tau} [1 - G(x)] dx) f(\tau) d\tau \\ + (T_c - T_p) \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} G(\theta_j + H - \tau) f(\tau) d\tau + T_p \\ + T_i \sum_{j=1}^{\infty} j \left(\int_0^{\theta_j + 1} G(\theta_j + 1 - \tau) f(\tau) d\tau - \int_0^{\theta_j} G(\theta_j - \tau) f(\tau) d\tau \right) \end{array} \right)} \quad (\text{III.11})$$

2- Deuxième modèle : Disponibilité stationnaire du système A_{s2}

On considère la disponibilité stationnaire A_{s2} quand le système est supposé être indisponible au cours du temps T_d de dégradation excessive, autrement dit, le système est supposé être indisponible après le dépassement du seuil dégradation.

La disponibilité stationnaire du système peut être exprimée comme suit :

$$A_{s2} = \frac{E(U_c) - E(T_d)}{E(T_t)} \quad (\text{III.12})$$

Avec,

$E(T_d)$: Le temps moyen de dégradation excessive au cours d'un cycle.

Le numérateur de l'équation représente le temps moyen de bon fonctionnement du système avec un minimum de dégradation.

On remarque que la disponibilité stationnaire A_{s2} dépend d' A_{s1} :

$$A_{s2} = A_{s1} - \frac{E(T_d)}{E(T_t)} \quad (\text{III.13})$$

La maximisation de A_{s2} permet de maximiser A_{s1} et de minimiser le ratio $\frac{E(T_d)}{E(T_t)}$

Cela veut dire, la minimisation de la dégradation du système.

Pour exprimer disponibilité stationnaire A_{s2} , quelques équations sont données comme suit :

$$E(T_d) = \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} \left(\int_0^{\theta_j + H - \tau} [1 - G(x)] dx \right) f(\tau) d\tau \quad (\text{III.14})$$

Et,

$$E(U_c) - E(T_d) = \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} \tau f(\tau) d\tau \quad (\text{III.15})$$

Dans le but de déterminer le vecteur optimal des dates d'inspection, la disponibilité stationnaire du système A_{S2} est considérée comme une fonction objective :

$$\max_{\Theta} A_{S2}(\Theta) \quad (\text{III.16})$$

La disponibilité stationnaire A_{S2} dépend :

- des durées des actions de maintenance (préventive et corrective) ;
- de durée d'actions d'inspection ;
- du temps moyen de bon fonctionnement ;
- du temps moyen de dégradation excessive du système.

L'expression mathématique de cette disponibilité est Donnée par [8] :

$$A_{S2} = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} \tau f(\tau) d\tau}{\left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} \left(\tau + \int_0^{\theta_j + H - \tau} [1 - G(x)] dx \right) f(\tau) d\tau \\ + (T_c - T_p) \sum_{j=1}^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j} G(\theta_j + H - \tau) f(\tau) d\tau + T_p \\ + T_i \sum_{j=1}^{\infty} j \left(\int_0^{\theta_j + 1} G(\theta_j + 1 - \tau) f(\tau) d\tau - \int_0^{\theta_j} G(\theta_j - \tau) f(\tau) d\tau \right) \end{array} \right)} \quad (\text{III.17})$$

III.3.4 Procédure numérique

Les deux problèmes d'optimisations données par les équations (III.10) et (III.16) sont résolus en utilisant une procédure numérique basée sur les étapes suivantes, dans le but de trouver les dates optimales d'inspection :

- première étape : c'est l'étape d'initialisation, où les données d'entrées sont fournies.
- deuxième étape : fixer la dimension de vecteur d'inspection ($N = 6$) en variant le pas d'intervalle Δt .
- troisième étape : noter le vecteur de solution.

III.3.5 Exemple numérique et résultats

Le but de notre étude est d'étudier l'influence des durées des actions de maintenance sur la disponibilité stationnaire du système donnée par les deux équations (III.11) et (III.17), pour cela un programme Matlab a été implémenté. La dégradation est modélisée par le processus Gamma dont les densités de probabilité f et g s'écrivent de la forme suivante :

$$f_{\alpha t, \beta}(T) = \frac{\beta^{\alpha} T^{\alpha-1} e^{-\beta T}}{\Gamma(\alpha t)} \quad \text{(III.18)}$$

Où, le paramètre d'échelle $\beta_f = 50$ et le paramètre de forme $\alpha_f = 3.5$.

$$g_{\alpha t, \beta}(X) = \frac{\beta^{\alpha} X^{\alpha-1} e^{-\beta X}}{\Gamma(\alpha t)} \quad \text{(III.19)}$$

Où, Le paramètre d'échelle $\beta_g = 40$ et le paramètre de forme $\alpha_g = 5.5$.

Expérience 1 : impact T_p , T_c , T_i sur $A_{S1}(\Theta)$, $A_{S2}(\Theta)$

1-impact T_p sur $A_{S1}(\Theta)$, $A_{S2}(\Theta)$

Dans cette partie nous étudions l'influence de la durée des actions de maintenance préventive T_p sur la disponibilité stationnaire $A_{S1}(\theta_1)$, $A_{S2}(\theta_1)$. Pour cela nous variant le T_p comme indiqué dans la Table III.1 et nous fixons les autres paramètres comme suit :

$$\theta_1 = [1073 \ 1199 \ 1288 \ 1379 \ 1417 \ 1714], T_i = 2, T_c = 20, H = 0$$

Table III.1- variation de A_{S1} et A_{S2} en fonction de T_p

T_p	A_{S1}	A_{S2}
2	0.8177	0.7102
5	0.7856	0.6858
7	0.7655	0.6704
10	0.7372	0.6487
14	0.7027	0.6218
20	0.6565	0.5853

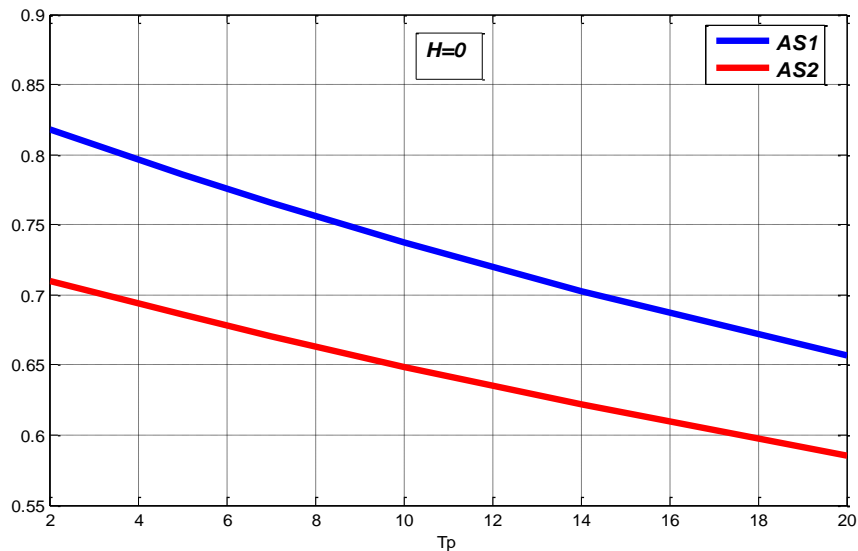


Figure III.2. variation de A_{S1} et A_{S2} en fonction de T_p .

La figure (III.2) et la table (III.1) montre que les valeurs optimales des disponibilités stationnaires A_{s1} et A_{s2} diminuent suite à l'augmentation de la durée de la maintenance préventive T_p . Cela signifie que la durée de la maintenance préventive a un impact négatif sur la disponibilité A_{s1}, A_{s2} . On distingue aussi, que les valeurs optimales des disponibilités A_{s1}, A_{s2} , sont respectivement 0.8177, 0.7102 qui correspondent à $T_p = 2$.

2-impact T_c sur $A_{s1}(\Theta), A_{s2}(\Theta)$

Dans cette partie nous étudions l'influence de la durée des actions de maintenance corrective T_c sur la disponibilité stationnaire $A_{s1}(\Theta), A_{s2}(\Theta)$. Pour cela nous variant le T_c comme indiqué dans la Table III.2 et nous fixons les autres paramètres comme suit :

$$\theta_1 = [1073 \ 1199 \ 1288 \ 1379 \ 1417 \ 1714], T_i = 2, T_p = 6, H = 0$$

Table III.2- variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_c

T_c	A_{s1}	A_{s2}
10	0.8213	0.7129
14	0.8023	0.6985
20	0.7754	0.6780
25	0.7543	0.6619
28	0.7422	0.6525
30	0.7344	0.6465

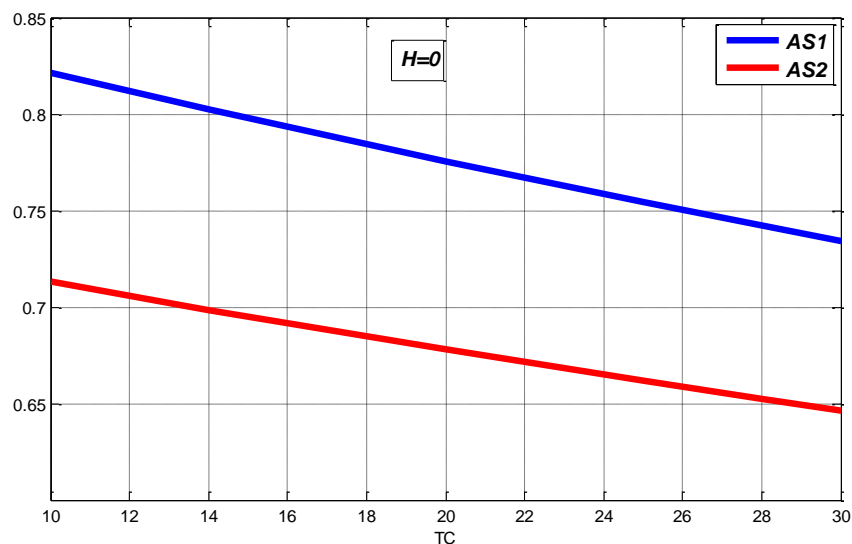


Figure III.3 : variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_c .

La figure (III.3) et la tableau (III.2) montre que les valeurs optimales des disponibilités stationnaires A_{s1} et A_{s2} diminuent suite à l'augmentation de la durée de la maintenance corrective T_c . Cela signifie que la durée de la maintenance corrective a un impact négatif sur la disponibilité A_{s1} , A_{s2} . On distingue aussi, que les valeurs optimales des disponibilités A_{s1} , A_{s2} sont respectivement 0.8213, 0.7129 qui correspondent à $T_c = 10$.

3-impact T_i sur $A_{s1}(\Theta)$, $A_{s2}(\Theta)$

Dans cette partie nous étudions l'influence de la durée d'inspection T_i sur la disponibilité stationnaire $A_{s1}(\Theta)$, $A_{s2}(\Theta)$. Pour cela nous variant le T_i comme indiqué dans la Table III.3 et nous fixons les autres paramètres comme suit :

$$\theta_1 = [1073 \ 1199 \ 1288 \ 1379 \ 1417 \ 1714], T_c = 20, T_p = 6, H = 0.$$

Table III.3- variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_i .

T_i	A_{s1}	A_{s2}
0.5	0.7964	0.7681
1	0.7893	0.7355
2.5	0.7686	0.6525
4	0.7490	0.5864
5	0.7365	0.5492
8	0.7013	0.4615

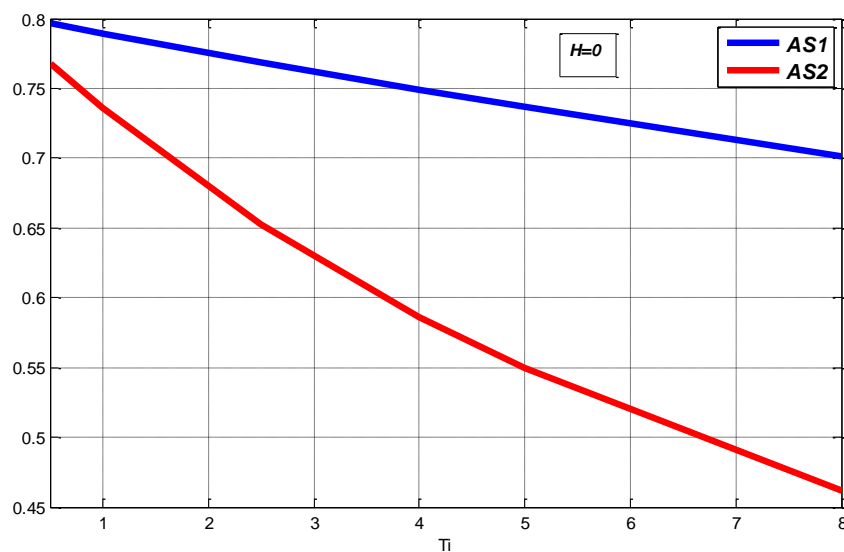


Figure III.4- variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de T_i .

La figure (III.4) et la table (III.3) montre que les valeurs optimales des disponibilités stationnaires A_{s1} et A_{s2} diminuent suite à l'augmentation de la durée d'inspection T_i . Cela signifie que la durée d'inspection a un impact négatif sur les disponibilités A_{s1} , A_{s2} . Nous constatons que A_{s2} est très sensible à la variation de T_i par rapport à A_{s1} vu qu'elle diminue d'une manière significative (apparente). On voit aussi, que les valeurs optimales des disponibilités, A_{s1}, A_{s2} sont respectivement 0.7964, 0.7681 qui correspondent à $T_i = 0.5$.

D'après l'expérience 1, on constate que la première disponibilité A_{s1} permet de réduire d'avantage la dégradation du système de production. Cela est dû à l'indisponibilité du système (A_{s2}) après le dépassement de seuil.

Expérience 2 : impact de Θ sur A_{s1} (Θ) et A_{s2} (Θ)

Dans cette partie nous étudions l'influence de l'intervalle d'inspection Θ_j sur la disponibilité stationnaire A_{s1}, A_{s2} pour cela nous variant le θ comme indiqué dans le Tableau III.12 et nous fixons les autres paramètres comme suit :

$$T_i = 2, T_p = 6, T_c = 2, H = 0.$$

Table III.5- variation de A_{s1} et A_{s2} en fonction de θ .

Θ_j	A_{s1}	A_{s2}	Δt
[1110 1222 1345 1475 1620 1820]	0.8295	0.7190	[112 123 130 145 200]
[1073 1199 1288 1379 1417 1714]	0.8177	0.7102	[126 89 91 38 297]
[1090 1200 1295 1375 1445 1465]	0.7912	0.6239	[110 95 80 70 20]
[1100 1200 1300 1400 1500 1600]	0.8083	0.6713	100

D'après la table (III.5), on observe que la variation du vecteur d'inspection non périodique Θ_j influe sur les valeurs de disponibilités $A_{s1}(\theta_j), A_{s2}(\theta_j)$. L'augmentation de Δt (le pas de vecteur d'inspection) donne les valeurs optimales de $A_{s1}(\theta_1), A_{s2}(\theta_1)$ qui sont respectivement 0.8295 et 0.7190. Tandis que l'inspection périodique Θ_4 donne des valeurs de disponibilité inférieures aux disponibilités $A_{s1}(\theta_1), A_{s2}(\theta_1)$.

On déduit que, pour ce système l'inspection non périodique où Δt accroît, donne les valeurs optimales de disponibilité, et assure plus de disponibilité de système.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé un modèle d'inspection pour un système de production soumis à une dégradation croissante monotone qui diminue ses performances. Cette dégradation est contrôlée par les inspections non périodiques. Une action de maintenance préventive est prévue, tandis que la maintenance corrective est planifiée à l'instant de la panne du système. Deux modèles mathématique de disponibilité stationnaires ont été proposés pour réduire l'impact de dégradation. Nous avons proposé deux expériences numériques, qui portent sur l'impact des durées des actions de maintenance (préventive et corrective) et d'inspection sur les deux types de disponibilité de système. Les résultats obtenus montrent plus précisément que le premier modèle de disponibilité peut réduire d'avantage la dégradation du système. Afin d'améliorer les performances du système par son optimisation stationnaire, on doit choisir une inspection non périodique avec Δt qui augmente.

Conclusion générale

L'objectif de notre mémoire était d'élaborer une procédure numérique permettant d'optimiser la disponibilité stationnaire d'un système de production de biens et de services sujets à une dégradation continue modéliser par le processus Gamma.

Deux modèles mathématiques d'optimisation de disponibilité stationnaire du système ont été présentés. Basant sur les hypothèses suivantes : La panne du système est supposée être auto-déclarée et sa dégradation est contrôlée par inspection non périodique (le niveau de dégradation du système n'est connu que par inspection). Les durées des actions de maintenance (préventive et corrective) et d'inspection sont non négligeables. Deux expériences numériques sont effectuées afin d'illustrer l'influence des durées d'actions de maintenance sur la disponibilité du système. Pour atteindre l'objectif de notre travail, nous avons implémenté un programme sous MATLAB qui nous a permis de calculer les différentes entités du modèle.

D'après les résultats obtenus on peut conclure que :

- L'augmentation des durées des actions de maintenance (préventive et corrective) et d'inspection induit la diminution de disponibilité du système. Nous avons déduit également que le premier modèle A_{s1} permet de réduire la dégradation du système de production.
- Dans la deuxième partie, nous constatons qu'un vecteur des dates d'inspection θ_j avec ΔT qui augmente avec le temps est préférable pour un tel système. Puisqu'il nous donne des disponibilités meilleures que lorsque l'intervalle d'inspection diminue

Le travail réalisé dans ce mémoire ouvre de nombreuses perspectives intéressantes. On peut citer :

- Appliquer le modèle présenté sur un système sujet à un autre type de dégradation, et voir sa pertinence.
- Reproduire le même modèle de disponibilité avec la politique d'inspection périodique.

- Faire une expérience où la durée $H \neq 0$, c'est-à-dire les actions de la maintenance préventive sont retardés dans le but de déterminer son influence sur la disponibilité stationnaire du système.
- Il est très intéressant d'élaborer le critère de minimisation de coût total par unité de temps, pour le système en question.

Bibliographie

- [1] Abdel-Hameed M., *A Gamma Wear process*, IEEE Transaction on Reliability, 2(24):152-153, 1975.
- [2] AFNOR NF EN 13306, *Terminologie de la maintenance*, Norme européenne, ISSN 0335-3931, juin 2001.
- [3] Ayadi. I, *Optimisation des politiques de maintenance préventive dans un cadre de modélisation par modèles graphiques probabilistes*, Thèse de doctorat, Informatique, Université de PARIS-EST, Institut français des sciences et technologie des Transports de l'Aménagement et des réseaux, août 2013,
- [4] Benali. L, *Maintenance industrielle*, 4860, OPU, septembre 2006.
- [5] Bendahmen.I, *Intégrale de chemins de Wiener et processus stochastique*, Magister en physique, Université Mentouri-constantine faculté des sciences exactes département de physique,
- [6] Booher.T.B, *optimal periodic inspection of stochastically degrading system*, Ph.D, thesis, Air Force Institute of Technology, 2006.
- [7] Castanier.B, Bérenguer.C, and A.Grall.A, *A sequential condition based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear*, Applied Stochastic Models Business and Industry 19, 327–347, 2003.
- [8] Castanier.B, Grall.A, and Berenguer.C, *A condition based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system*, Reliability Engineering System Safety 87, 109–120, 2005.
- [9] Chouikhi. H, *Optimisation des stratégies de maintenance verte pour les systèmes de production de biens et de services*, Thèse de doctorat, Automatique-traitement du signal et des images- Génie informatique, Ecole doctorale IAEM Lorraine, UFR Mathématique-Informatique- Mécanique Metz, décembre 2012.
- [10] Deloux.E, *Politique de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant*, thèse de doctorat, Automatique et

informatique appliquée, Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielle et des Mines de Nantes, octobre 2008.

[11] Doksum, K. A., Hoyland, A., and Hoyland, A., Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the Inverse Gaussian distribution. *Technometrics*, 34(1) :74, 1992

[12] François.M et Jean-Pierre.V, *Maintenance : méthode et organisation*, 3^e édition, 2000, 2003, 2010.

[13] Gamlouche. H, *Modélisation de la dégradation. Maintenance conditionnelle et pronostic : usage des processus de diffusion*, Thèse de doctorat, Optimisation et sureté des systèmes, Université de technologie Troyes, juin 2016.

[14] A. Ghasemi, S. Yacout, and M.S. Ouali, Optimal condition based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model, *International Journal of Production Research*, vol. 45, no. 4, pp. 989. R1112, 2007.

[15] Heng J. , *Pratique de la maintenance préventive (Mécanique, Pneumatique, Hydraulique, Electricité, Froid)*, Dunod, Paris. 2002.

[16] Jia.X and Christer. A. H, *A prototype cost model of functional check decisions in reliability-centred maintenance*, *Journal Operation Research Sociality* 53 2002.

[17] Newby.J.M and Barker.T.C, *A bivariate process model for maintenance and inspection planning*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 2006.

[18] Park, C. and Padgett, W., New cumulative damage models for failure using stochastic processes as initial damage. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(3) :530– 540, 2005.

[19] THI P.K.N , *Politique de maintenance et d'investissement sous évolution technologique incertaine*, Thèse doctorat, Automatique- Productique-Robotique, Ecole Centrale de Nantes, novembre 2012.

[20] Renaud C., *Management de la maintenance*, 3^e édition, août 2018.

[21] Shraoui. Y. *Optimisation des méthodes d'inspection des pipes*, Thèse doctorat, Génie mécanique, Université Badji Mokhtar annaba, 2014.

[22] Salami. A, *Inférence statistique pour un modèle de dégradation en présence des variables explicatives*, Thèse de doctorat, Mathématiques appliquées, Ecole Doctorale des Sciences Exactes et de leurs Applications, janvier 2011.

[23] Van Noortwijk, J., *A survey of the spplication of Gamma processes in maintenance. Reliability Engineering & System Safety*, 94 (1), 2-21, 2009.

[24] Y. Wang., Ye Z. and Tsui k., “Stochastic evaluation of magnetic head wears in hard diskdrives”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, 10. 5, PP. 1. 7, May 2014, Art no. 331507,doi : 10. 1109/TMAG. 2013.

Résumé

Actuellement la prévision des défaillances de certains systèmes industriels est devenue primordial pour l'amélioration de la fiabilité et de la rentabilité de ces derniers. Cette prévision s'appuie essentiellement sur l'étude d'évolution du niveau de la dégradation du système.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un système soumis à une dégradation croissante monotone qui suit un processus Gamma. Nous avons déterminé les dates optimales d'inspection non périodique qui sont obtenues par la maximisation de la disponibilité stationnaire du système. Une étude de sensibilité est réalisée. Les résultats obtenus permettent de montrer l'impact de la variation des durées des actions de maintenance et d'inspection sur la dégradation du système.

Mots clés : Processus Gamma, inspection, seuil de dégradation, disponibilité.

Abstract

Currently, predicting the failures of certain industrial systems has become essential for improving the reliability and profitability of these systems. This forecast is based primarily on the study of the evolution of the level of degradation of the system.

In this thesis, we are interested in the modeling of a system subjected to a monotonically increasing degradation which follows a Gamma process. We have determined the optimal non-periodic inspection dates that are achieved by maximizing the stationary availability of the system. A sensitivity study is carried out. The results obtained show the impact of varying the durations of maintenance and inspection actions on the degradation on the system.

Keywords: Gamma process, inspection, degradation threshold, availability.