

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



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département Génie Electrique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle/Electromécanique

Thème

Stratégie de maintenance imparfaite pour un système en dégradation

Préparé par

BRAKBI Yazid

IGUENATEN Ghilas

Encadré par

Mr CHERFAOUI Bachir

Mr LAGGOUNE Radouane

Soutenue le 15/10/2020 devant les jurys composer de :

Mr MOKRANI Ahmed

Mr AMRI Atmane

Président

Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nos remerciements vont tout d'abord à notre dieu pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour terminer ce modeste travail.

Nous voudrions adresser nos remerciements les plus profonds et les plus sincères tous d'abord à notre encadreur Monsieur « CHERFAOUI Bachir ».
Nous tenons à témoigner de la confiance qu'il nous a accordée dès le début du mémoire, et du soutien indéfectible qu'il nous a apporté durant tout son déroulement.

Ainsi que au responsable de la spécialité maintenance industrielle le professeur Monsieur « LAGGOUNE Radouane »

Nous tenons à remercier très sincèrement l'ensemble des membres du jury qui nous font le grand honneur d'accepter de juger notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département G. Electrique pour tout le savoir que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation.

Enfin, Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents, qui étaient toujours à
mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années
d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression
de ma profonde gratitude; pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de
moyens pour me voir réussir dans mes études.*

À mon frère et mes sœurs ainsi leur petite famille

À la mémoire de mes grands-parents

À mes cousins et cousines, à mes oncles et tantes

À mon binôme « Yazid »

Et sur tout et sans oublier, mes chers amis qui m'ont toujours soutenu.

À tous ceux qui m'aiment

IGUENATEN Ghilas

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A ceux qui ont fait de moi qui je suis, ceux envers qui j'ai une dette imprescriptible « mes chères parents ».

A mes chères sœurs et mes chers frères pour leur amour et leur incontestable appui.

A toute ma famille.

A ma petite princesse « Djidji ».

A tous mes chers amis pour tous les instants inoubliables que j'ai passés avec vous, je vous aime beaucoup.

Et à mon binôme « Ghilas ».

Je dédie ce travail à toutes les personnes chères à mon cœur.

Qu'elles trouvent ici l'expression de toute ma gratitude et mon amour.

BRAKBI Yazid

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Evolution de la maintenance 4
Figure I.2: Objectif de la maintenance..... 5
Figure I.3: les différents types de maintenance 6
Figure I.4: Intervention préventive 7
Figure I.5: Intervention préventive conditionnelle 7
Figure I.6: Intervention préventive systématique 8
Figure I.7: Schématisation de la maintenance prévisionnelle..... 8
Figure I.8: Intervention corrective 8
Figure I.9: Maintenance palliative 9
Figure I.10: Maintenance curative ou réparation 9

Chapitre II

Figure II.1 : Exemples de surfaces usées par différents mécanismes 13
Figure II.2 : Mécanisme de l'usure adhésive..... 14
Figure II.3 : Mécanisme de l'usure abrasive 14
Figure II.4 : Corrosion d'un engrenage 14
Figure II.5 : Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique aux mains..... 15
Figure II.6 : Les 3 mode de fissuration..... 15
Figure II.7 : exemple de trajectoire d'états d'un modèle à dégradation continue 16
Figure II.8 : Représentation d'un modèle à dégradation discrète..... 20

Chapitre III

Figure III.1 : Choix de la politique de maintenance 23
Figure III.2 : Détermination de la durée de vie optimale 24
Figure III.3 : Principe de la politique de maintenance selon l'âge 25
Figure III.4 : Principe de la politique de maintenance en bloc..... 26
Figure III.5 : Intensité dans le cas AGAN (As Good As New)..... 28
Figure III.6 : Intensité dans le cas ABAO 28
Figure III.7 : Intensité de la défaillance dans le cas de la maintenance imparfaite 29
Figure III.8 : Les principale approche de la maintenance imparfaite..... 30
Figure III.9 : Profile de l'âge virtuel en fonction du temps d'opération 31

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courbe de cout moyen Pour ($T=5, k=3$).....36

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en fonction de k.....37

Tableau IV.2 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en fonction C_f38

Tableau IV.3 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en fonction C_v39

Tableau IV.4 : La variation de coût moyen minimal et le « T » optimal en variant le rapport C_p / C_{fr}39

Tableau IV.5 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en variant p.....40

Liste des abréviations

AFNOR	Association française de normalisation
V1, V2, V3	Les visites préventive
TBF	Temps de bon fonctionnement
TA	Temps d'arrêt
$x(t)$	Niveau de dégradation d'une entité
L	Seuil de défaillance
δt	L'intervalle de temps
(Ω, \mathcal{F}, P)	Espace de probabilité
$B_t, W(t)$	Processus de Wiener standard
σ_d, μ_d	Paramètres de dérive et de volatilité
(Y_t)	Processus gamma
β	Paramètre d'échelle du processus Gamma
α	Paramètre de forme du processus Gamma
(X_n)	Chaîne de Markov
ε	Espace d'états
C_a	Coût d'achat
f	Coût de fonctionnement
M	Coût total de maintenance
VR	Valeur de revente éventuelle
CG	Le coût global
MP	maintenance préventive
MC	maintenance corrective
AGAN	As Good As New
λt	L'intensité de défaillance
ABAO	As Bad As Old
P	La probabilité d'être restauré à l'état parfait
$q = 1 - p.$	La probabilité complémentaire
V_{n-1}	L'âge virtuel
F(x)	La fonction de distribution associée aux durées de vie du système
W	Variable aléatoire du temps
w	La moyen de la variable aléatoire du temps
C_f	Coût fixe pour effectuer une réparation à la panne.
C_v	Coût variable par réparation imparfaite
C_p	Coût de la maintenance préventive.
C_{fr}	Coût d'une réparation $C_{fr} = C_f + (i - 1).$
M(t)	Fonction de renouvellement d'un processus de quasi-renouvellement.
α	Facteur de réduction de l'âge du système $0 \leq \alpha \leq 1$.
β	Facteur d'augmentation des durées de réparation $\beta \geq 1$
μ_1	Temps de vie utile.
η_1	Temps de réparation pour la première panne.
L	Coût de maintenance asymptotique.
D	Durée d'un cycle de renouvellement.
C	Coût de la maintenance totale pour un cycle de renouvellement.
T	Temps de maintenance préventive
K	Nombre de réparations imparfaites
Cdf	cumulative distribution function
$\Phi(x)$	Cdf normal standard

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la maintenance.	
I.1 : Introduction	3
I.2 : Définition de la maintenance	3
I.3 : Evolution de la maintenance	4
I.4 : Stratégie de maintenance	5
I.5 : Objectif de la maintenance	5
I.6 : Les différents type de maintenance	6
I.6.1 : La maintenance préventive	6
I.6.1.1 : La maintenance conditionnelle	7
I.6.1.2 : Maintenance systématique	7
I.6.1.3 : Maintenance prévisionnelle	8
I.6.2 : La maintenance corrective	8
I.6.2.1 : La maintenance palliative	9
I.6.2.2 : La maintenance curative	9
I.7 : L'importance de la maintenance	10
I.8 : Opérations de la maintenance	10
I.8.1 : Opérations de la maintenance corrective :	10
I.8.2 : Opérations de la maintenance préventive	10
I.9 : Classification des tâches de maintenance	11
I.10 : Conclusion	12
Chapitre II : Modèles de dégradation.	
II.1 : Introduction	13
II.2 : Types de dégradation:	13
II.3 : Modèles de dégradation	16
II.3.1 : Les modèles à dégradation continue	16
II.3.1.1 : Processus de Wiener	17
II.3.1.2 : Le processus Gamma	19
II.3.2 : Model de dégradation discrète	19
II.3.2.1 : Chaines de Marko	20
II.4 : Conclusion	21

Chapitre III : Politique de maintenance.

III.1 : Introductio	22
III.2 : Politiques de maintenanc.....	23
III.2.1 : Définition.....	23
III.2.2 : Choix de la politique de maintenance.....	23
III.2.3 : Les diverses politiques de maintenanc	25
III.3 : Modèles de maintenance.....	26
III.4 :Les approche de modélisation de la maintenance imparfaite.....	29
III.5 : Conclusion.....	32

Chapitre IV: Optimisation des intervalles de maintenance imparfaite et minimisation de cout moyen

IV.1: Introduction.....	33
IV.2 : Développement du modèle.....	33
IV.3 : Hypothèses de modélisation.....	34
IV.4 : Application numérique.....	35
IV.5 : Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	42

Introduction générale

L'objectif principal de toute entreprise consiste à maximiser les profits et minimiser les pertes. Ainsi, les stratégies de maintenance adoptées s'orientent vers la réduction des coûts des actions de maintenance et/ou l'amélioration de la disponibilité du système de production à maintenir. D'autre part, les actions de maintenance peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité de l'environnement. Ce dernier peut être en effet dégradé suite à la défaillance, voire même à l'exploitation, du système de production. Dès lors, les entreprises doivent répondre aux exigences des normes nationales et internationales pour la protection de l'environnement. Pour cela, il est nécessaire d'adopter de nouvelles stratégies de maintenance, développées dans le but non seulement de maximiser les profits mais aussi dans une logique de contribuer à une stratégie de bien durable et ainsi réduire la dégradation du système et son impact sur l'environnement.

Une stratégie de maintenance peut être définie comme une règle de décision qui établit la séquence des actions de maintenance à entreprendre en fonction du niveau de dégradation de l'équipement et des seuils acceptables d'exploitation. Chaque action de maintenance permet de maintenir ou de rétablir l'équipement dans un état spécifié en utilisant les ressources appropriées. Un coût est encouru pour effectuer chaque action de maintenance. Ce coût peut être constant, croissant ou décroissant selon le contexte où l'équipement est exploité. Plusieurs stratégies de maintenance ont été proposées dans la littérature. Ces stratégies se distinguent par la nature et la séquence des actions qu'elles suggèrent, par le critère de performance retenu, par le caractère déterministe ou stochastique des paramètres qu'elles prennent en considération, par le fait que l'équipement est considéré comme une seule entité ou comme un système constitué de plusieurs composants dont l'état peut être connu en tout instant ou après inspection...etc.

Le travail élaboré dans ce mémoire, se présente en quatre chapitres,

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter les concepts de base de maintenance telle que les types de maintenance, leur objectif et leurs niveaux.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les différents types de dégradation, leurs modèles et quelques processus utilisés par chaque modèle.
- Dans le troisième chapitre, nous allons présenter les diverses politiques de maintenance, leurs méthodes de choix, ainsi que les différents modèles de maintenance, ainsi que quelques approches de la maintenance imparfaite.

Introduction générale

- Le quatrième chapitre qui est le thème de notre mémoire on a fait une application numérique du modèle de maintenance imparfaite en utilisant le remplacement périodique de type bloc, et on c'est focalisé sur l'effet de cette stratégie. Dans l'objectif de minimiser le cout moyen par unité du temps

Finalement, nous présentons une brève analyse des résultats obtenus et une conclusion générale assortie de quelques recommandations.

Chapitre I

Généralités sur la maintenance

I.1 : Introduction

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue une réelle préoccupation dans les entreprises. Elle s'est affirmée comme un véritable enjeu compétitif, tant sur l'assurance des performances de disponibilité des matériels existants qu'en termes de sécurité, de qualité et de coûts, par exemple.

Dans un environnement industriel de plus en plus concurrentiel, les entreprises sont face à des défis de taille et ils sont toujours à la recherche des nouvelles méthodes et stratégies à fin de satisfaire des contraintes externes comme le respect des délais de livraison, la qualité des produits et les prix, en plus d'autres contraintes internes. Pour cela, le système de production ne doit subir qu'un nombre minimum de temps de non production. Exceptés les arrêts inévitables dus à la production elle-même (changements de gamme, montées en température, etc.), les machines ne doivent jamais (ou presque) connaître de défaillances tout en fonctionnant à un régime permettant le rendement maximal. Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction. En quelques années, la fonction « maintenance » est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. En effet, elle s'est transformée de la fonction traditionnelle d'entretien considérée comme une charge financière à une activité nécessaire et considérée comme génératrice de profit, permettant de minimiser les coûts de maintenance et de maximiser la disponibilité des systèmes de production.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance et les différents types existants selon la taille et la productivité de l'entreprise.

I.2 : Définition de la maintenance

La maintenance est l'ensemble des moyens ou des nécessaires pour maintenir et remettre les facteurs d'opérations en bon état de fonctionnement. Elle comprend l'ensemble des moyens d'entretien et leur mise en œuvre. La différence entre la maintenance et l'entretien est que ce dernier consiste à maintenir les facteurs d'opérations en état de fonctionnement adéquat [2].

D'après AFNOR X 60-010, la maintenance est « l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un système destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Bien maintenir, c'est préserver le bon fonctionnement du système et lui permettre d'assurer les opérations requises au coût optimal [3].

La fonction requise est ainsi définie : « fonction, ou ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné ».

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- ◆ Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance.
- ◆ Rétablir c'est-à-dire la correction de défaut.
- ◆ État spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- ◆ Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique [2].

I.3 : Evolution de la maintenance

A la fin des années 70, l'entretien était souvent le parent pauvre des services de l'entreprise. Les dirigeants le considéraient uniquement comme un poste de dépenses et ne pensaient qu'à réduire ses coûts [1].

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure I.1) [2].

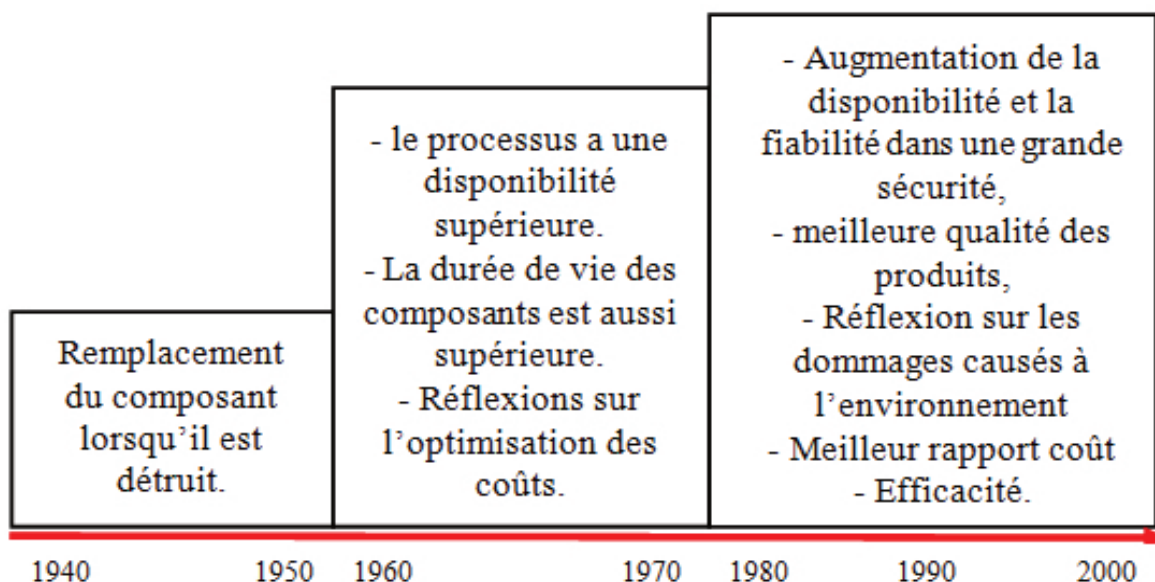


Figure I.1 : Evolution de la maintenance depuis 1940

I.4 : Stratégie de maintenance

Ensemble des décisions qui conduisent :

- à définir le budget d'activités de la production de maintenance, pour choisir la politique de maintenance des équipements.
- et, conjointement, à organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

Les stratégies de maintenance dépendent du système sur lesquels elles s'appliquent. Elles visent à maintenir les systèmes en bon fonctionnement le plus longtemps possible [4].

I.5 : Objectif de la maintenance

Les objectifs de la maintenance dépendent de la nature de l'entreprise, ces objectifs sont définis par une politique de maintenance bien déterminée à partir de la prise en compte de trois facteurs essentiels :

- Facteur technique.
- Facteur économique.
- Facteur humain et écologique.

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la Figure I.2 sont nombreux :

- Améliorer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Optimiser l'efficacité des actions de maintenance (exemple: réduire le nombre des pannes).
- assurer la sécurité au travail.
- réduire les coûts de la maintenance.
- Supprimer les interventions de maintenance inutile.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité) [2].

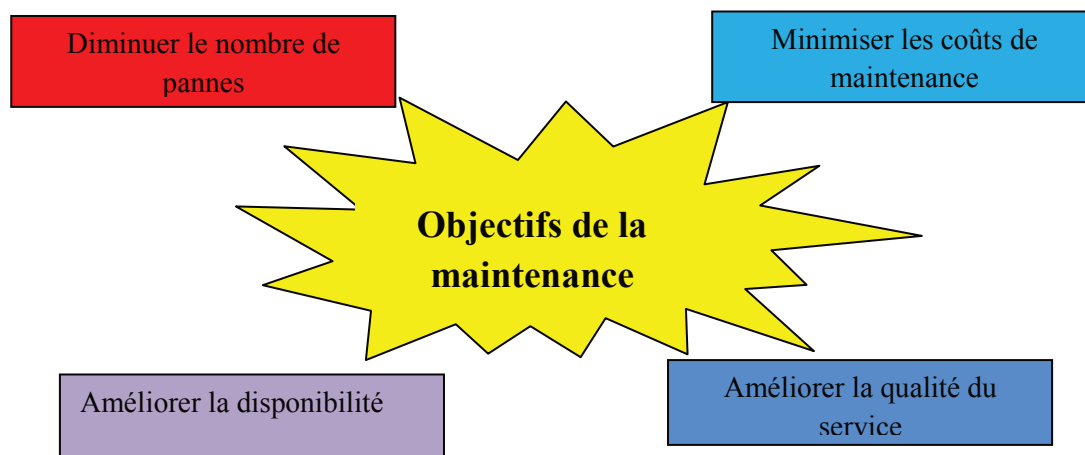


Figure I.2 : Objectif de la maintenance

I.6 : Les différents types de maintenance

On générale la maintenance contiens deux types principale, la maintenance préventive intervien avant la panne (maintenir), elle nous permettre d'éviter les défaillances et de garder le système en bon fonctionnement ainsi de diminuer les arrête et la maintenance corrective intervien pour corrigé le dysfonctionnement (rétablir) (voir Figure I.3).

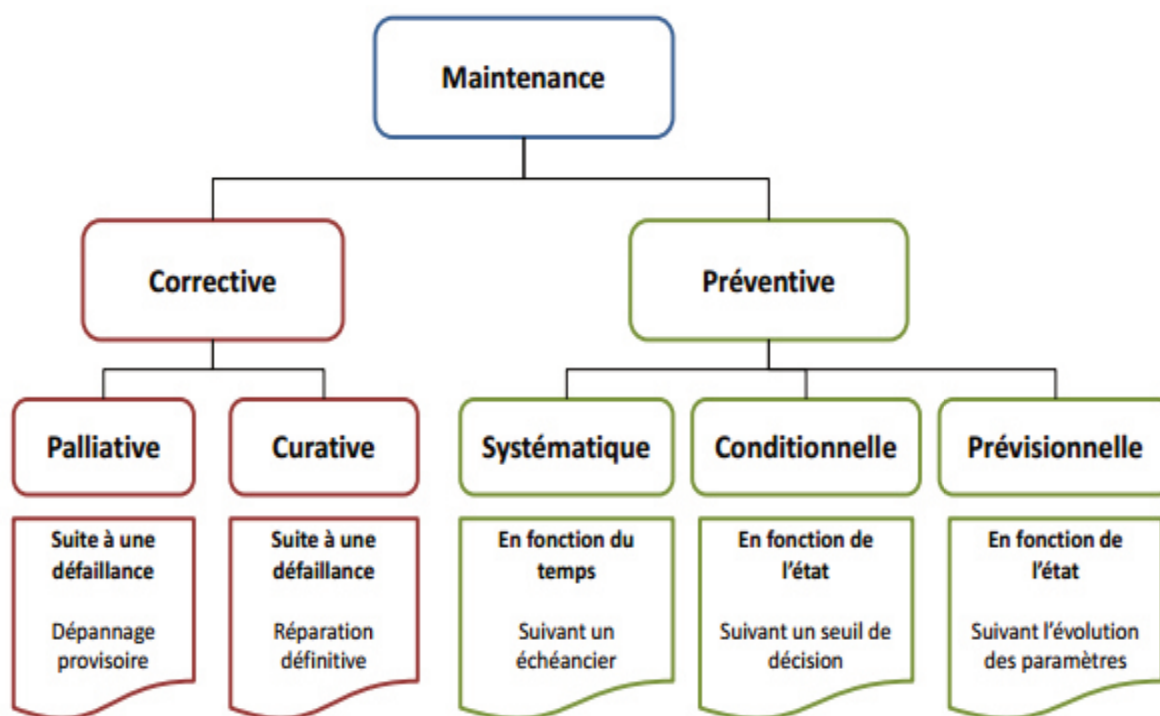


Figure I.3 : Les différents types de maintenance

I.6.1 : La maintenance préventive

Selon l'AFNOR : « La maintenance préventive est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien », elle est exécutée à des intervalles de temps prédéterminés. Elle permet de éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation.

La maintenance préventive se subdivise en trois types [1].

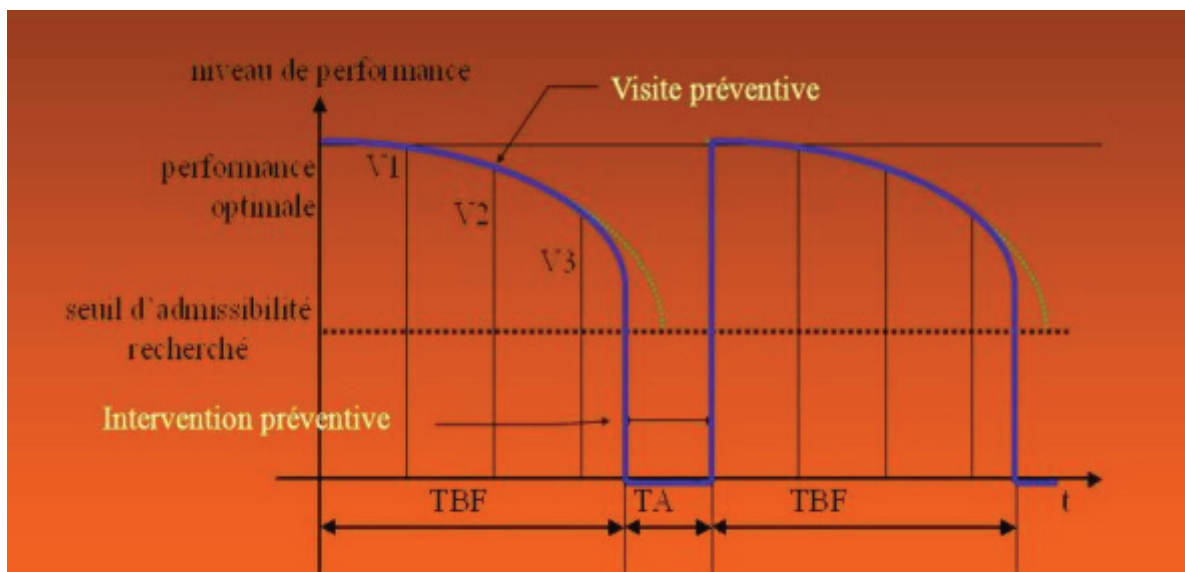


Figure I.4 : Intervention de préventive

I.6.1.1 : La maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle d'après NF EN 13306 est une « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ». D'après la norme AFNOR X 60-100, la maintenance conditionnelle se définit comme une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure) [1].

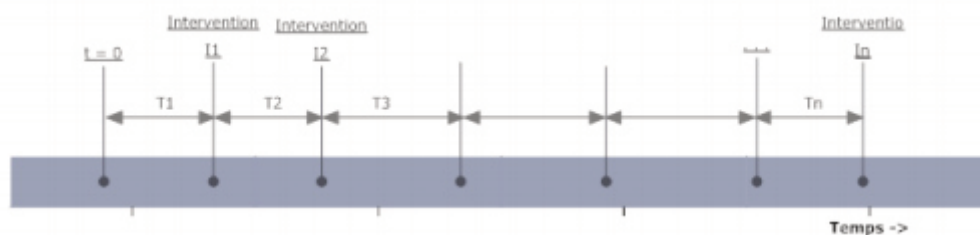


Figure I.5 : Intervention préventive conditionnelle

I.6.1.2 : Maintenance systématique

D'après la norme AFNOR X 60-100, la maintenance systématique se définit comme «une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien» [1]. La maintenance systématique ne nécessite pas les moyens d'analyse, elle est effectuée sans control préalable de l'état du bien mais en suivant un calendrier, ou un échancier, elle intervient même si le système est toujours en bon fonctionnement [5].

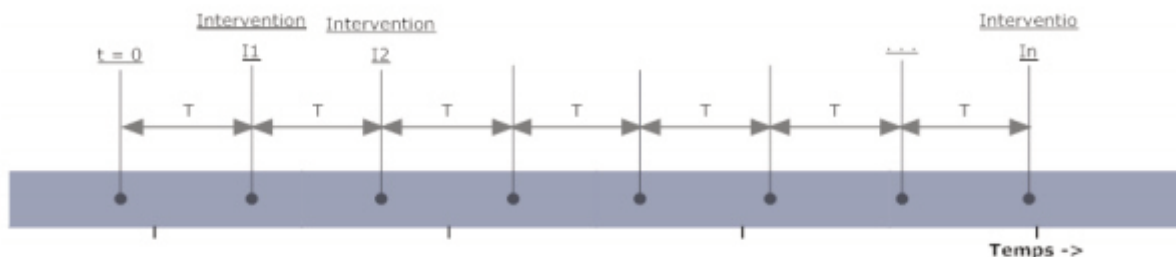


Figure I.6 : Intervention préventive systématique

I.6.1.3 : Maintenance prévisionnelle

Selon NF EN 13306, « Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien ». Elle permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée cela en analysant l'évolution des paramètres techniques qui permettent de quantifier l'état du bien et de déceler les dégradations potentielles dès leur apparition [1].

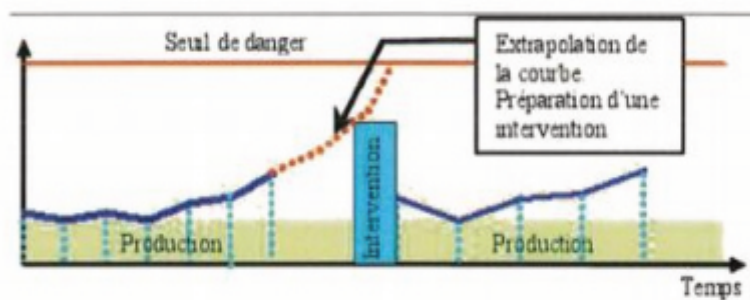


Figure I.7 : Schématisation de la maintenance prévisionnelle.

I.6.2 : La maintenance corrective

La maintenance corrective selon NF EN 13306 est une «maintenance Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise». Appelée aussi "fonctionnement jusqu'à la rupture" ou "arrêt sur panne", qui intervient après la défaillance, et elle est la plus chère et la plus dangereuse. En théorie, elle ne devrait plus exister pour n'importe qu'elle système [1].

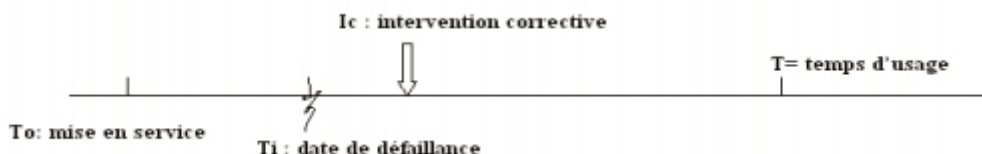


Figure I.8 : Intervention corrective

I.6.2.1 : La maintenance palliative

« Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise » cette maintenance sert juste à dépanner le système et lui permettre d'accomplir provisoirement une partie ou toutes ses fonctions requises. La maintenance palliative est systématiquement suivie d'une maintenance curative [5].

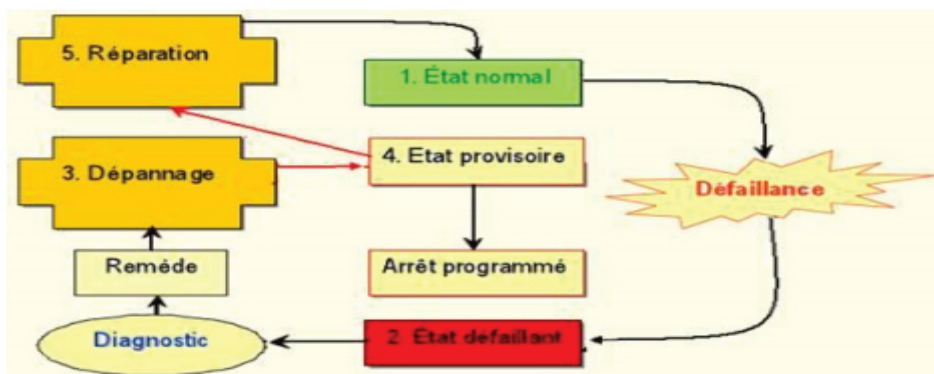


Figure I.9 : Maintenance palliative

I.6.2.2 : La maintenance curative

La maintenance curative aura lieu juste après la défaillance ou après une maintenance palliative (dépannage) pour remettre le système à l'état ou il peut accomplir sa fonction requise. La réparation de la maintenance curative est durable [5]. Les activités de la maintenance curative peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances [1].

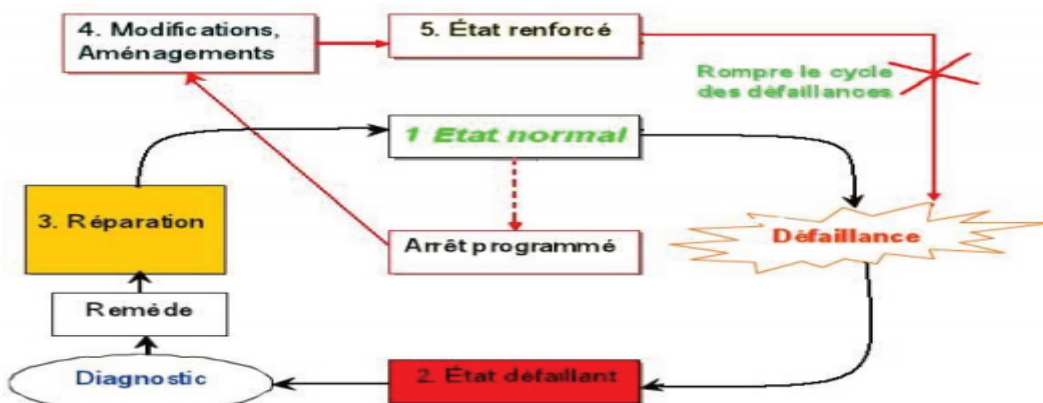


Figure I.10 : Maintenance curative ou réparation

I.7 : L'importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres:

- Augmentation du coût de productions.
- Diminution de la marge du profit.
- Rupture du stock.
- Retard des livraisons.
- Ajout des heures supplémentaires.
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences [2].

I.8: Opérations de la maintenance

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance.

I.8.1 : Opérations de la maintenance corrective :

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **test** : prendre les mesure de l'état actuel system affecté et les comparé a une référence.
- **détection** : ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **localisation** : trouver les éléments ou les composants défaillant.
- **diagnostic** : identification et analyse des causes de la défaillance.
- **dépannage**, réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
- **contrôle** : s'assuré que le système est en bon fonctionnement après l'intervention.
- **amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **historique** : enregistré ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure en cas ou la même panne apparaisse une autre fois [2].

I.8.2 : Opérations de la maintenance préventive

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et

d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).

- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.

- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du première et de deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.

- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.

- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau.

Les trois premières opérations sont encore appelées « **opérations de surveillance** » Elles caractérisent parfaitement la phase d'apprentissage et sont absolument nécessaires si on veut maîtriser l'évolution de l'état réel d'un bien. On accepte donc de payer pour savoir puis pour prévenir. Elles sont effectuées de manière continue ou à intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou sur le nombre d'unités d'usage [2].

I.9 : Classification des tâches de maintenance

Les tâches de maintenance sont classées en cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches [2].

✓ **Tâches de maintenance du premier niveau** : Comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ; ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité, sans avoir la nécessité à un outillage spécifique.

✓ **Tâches de maintenance de deuxième niveau** : Comporte des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.

✓ **Tâches de maintenance de troisième niveau** : Nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc....) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.

✓ **Tâches de maintenance du quatrième niveau** : Est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis tel que du matériel d'essai ou de test, un banc de contrôle, ... etc.

✓ **Tâches de maintenance du cinquième niveau** : Comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur [2].

I.10 : Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre est de donner un bref aperçu sur les concepts de base de la maintenance, sa définition et leurs méthodes. Les objectifs et les intérêts de la maintenance dans le domaine industriel sont présentés, ainsi que les différentes opérations de la maintenance préventive et corrective.

Chapitre II

Modèles de dégradation

II.1 : Introduction

De nombreux travaux ont porté sur la modélisation de la dégradation. Les analyses dont les hypothèses de fiabilité sont basées sur des données de dégradation, lorsque cela est possible, donnent de meilleurs résultats que celles basées sur les données de durée de vie censurées et/ou tronquées. La dégradation d'un système se traduit par l'évolution progressive et parfois irréversible de son état qui causera la diminution d'assurer son bon fonctionnement ceci conduit à la défaillance partiel ou complète du système. La défaillance d'un système peut être de la source de plusieurs mécanismes de dégradation tel que : usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques diverses, etc....

Les études réalisées sur des systèmes suppose que entre l'état de marche et panne il ya un état intermédiaire appelées états dégradés. Pour mettre en place ce genre de modélisation on doit définir l'indicateur de dégradation lie directement l'état de détérioration du système. L'évolution de cet indicateur noté $x(t)$ sera représenter et délimiter par un seuil noté L , un système dite en panne lorsque son indicateur de dégradation dépasse un certain seuil L .

II.2 : Types de dégradation:

Usures

Dans la science des matériaux, l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. L'usure est une conséquence du phénomène de « frottement » entraînant une émission de débris avec perte de cotes, de formes et de poids [6].

Types d'usures mécaniques. (Figures II.1, II.2, II.3) [7].



Figure II.1 : Exemples de surfaces usées par différents mécanismes.

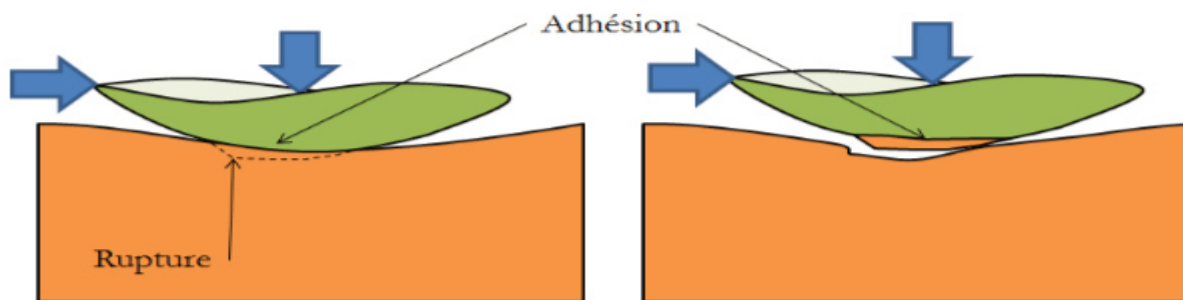


Figure II.2 : Mécanisme de l'usure adhésive.

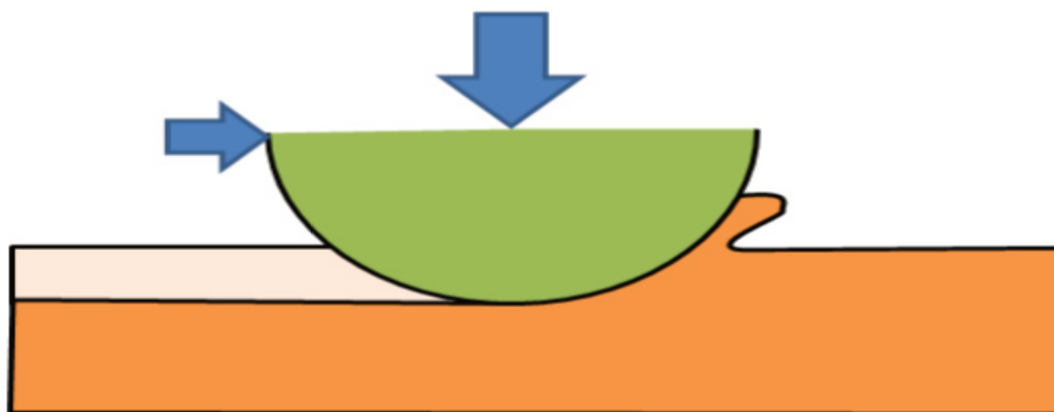


Figure II.3 : Mécanisme de l'usure abrasive

La corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés [8].



Figure II.4 : Corrosion d'un engrenage

Fatigue :

La fatigue est un mode de rupture différé qui se produit lorsque le matériau est soumis à des chargements cycliques, et cela même pour des contraintes bien inférieures à sa limite d'élasticité et des températures faibles [9]. Pour comprendre le phénomène de la fatigue, prenons un fil d'acier entre deux mains en le coudant dans un sens et puis dans l'autre sens, en faisant cela plusieurs fois sans dépasser la limite élastique jusqu'à la rupture.

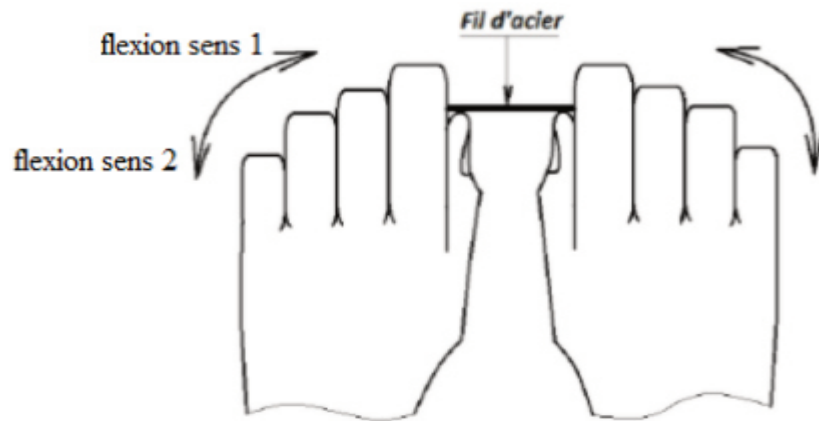


Figure II.5 : Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique aux mains

Fissure :

La fissure est un « défaut » ou une « discontinuité brutale » apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond [10].

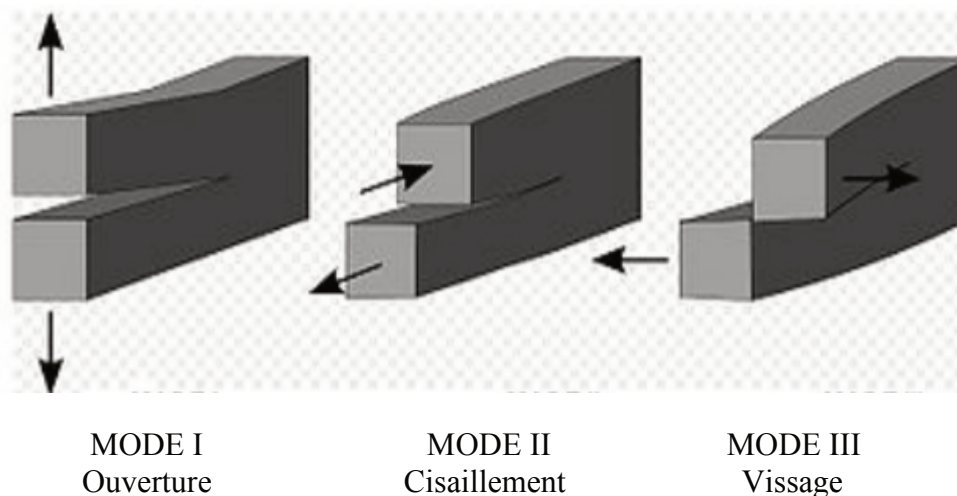


Figure II.6 : Les 3 mode de fissuration

II.3 : Modèles de dégradation

On appelle modèles de dégradation les modèles dont l'espace des états dans lesquels peut se retrouver un composant n'est pas réduit aux états de marche et de panne [11]. Les modèles stochastiques de dégradation sont des modèles mathématiques qui décrivent la dégradation du système au cours du temps [12]. On distingue en général des états de dégradation intermédiaires qui permettent de transiter successivement entre l'état neuf ou le moins dégradé et l'état de panne, Pour modéliser la dégradation d'un système il est nécessaire de déterminer des lois de passage entre les différents états. Cette modélisation devra tenir compte de la nature de l'indicateur de dégradation que l'on décide de suivre. Pour ce faire, on distingue généralement deux grandes classes de dégradation : les modèles à dégradation discrète et les modèles à dégradation continue [11].

II.3.1 : Les modèles à dégradation continue :

Les modèles à dégradation continue tentent de modéliser l'évolution au cours du temps de la dégradation, ils sont pertinents pour modéliser des phénomènes tels que la fatigue, l'érosion graduelle d'un matériau ou encore l'usure progressive d'une pièce mécanique, etc [13]. Pour une estimation pertinente, il est nécessaire donc de connaître la loi d'accroissement de dégradation entre deux instants consécutifs pour pouvoir estimer le niveau de dégradation à toute instant (figure II.7) [14].

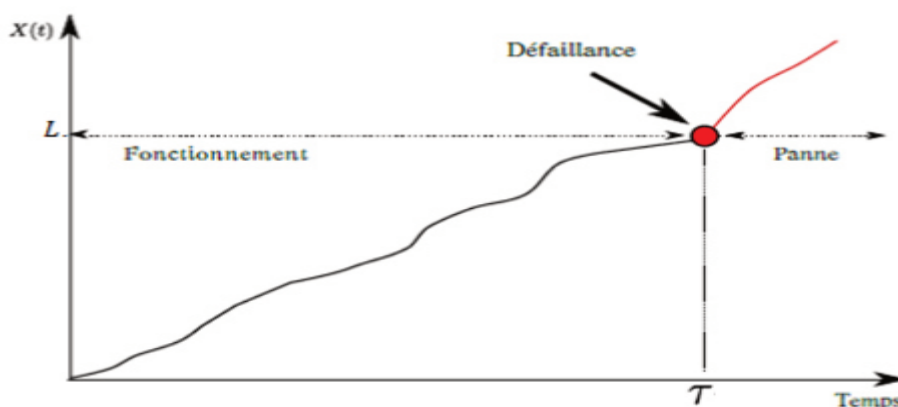


Figure II.7 : Représentation d'un exemple de trajectoire d'états d'un modèle à Dégradation continue

Selon Barlow [15]. On considère généralement que le processus de dégradation est markovien. La dégradation à un instant t (instant de décision) donné ne dépend que du niveau

de dégradation à l'instant $t - \delta t$ (l'instant de Décision) précédent, et de l'intervalle de temps δt entre les deux instants. Cette hypothèse est justifiée si la seule information disponible sur l'état du système est l'accroissement de la dégradation du système entre ces deux instants [14]. Cela implique que les incréments de détérioration ne dépendent ni de l'âge, ni de l'état de santé de l'entité mais uniquement de la durée d'observation. On définit le taux de dégradation par la quantité cumulée instantanée, c'est-à-dire par unité de temps [11].

Lorsque l'on souhaite modéliser une dégradation continue, il faut avoir recours à un processus de Wiener. La modélisation de la dégradation par un processus de Wiener présente le problème majeur de l'existence de trajectoires de dégradation non monotones. Si on souhaite privilégier la monotonie, il faut utiliser un modèle de dégradation construit sur un processus de sauts, au risque de perdre la propriété de continuité. Théoriquement, il est en effet impossible d'utiliser les processus de Lévy pour avoir un modèle de dégradation à la fois continu et croissant. La solution consiste à se placer dans le cas limite d'un processus de sauts présentant un nombre infini de sauts sur un intervalle de temps fini. Pour ce faire, la loi de probabilité des incréments doit être à support positif et infiniment divisible, la famille des lois Gamma vérifie ces conditions et on construit ainsi les processus Gamma [11].

II.3.1.1 : Processus de Wiener :

Le processus de Wiener est souvent utilisé pour modéliser et rendre compte du mouvement brownien (MB), le «bruit» l'aléa pur, l'erreur de mesure physique... il est souvent utilisé en mathématique appliquée, en physique et en économie : description du comportement thermodynamique des gaz, des phénomènes de diffusion, des modèles mathématiques de la finance, équations différentielles stochastiques. Il permet d'effectuer et de simplifier certains calculs.

Définition :

A- On considère un espace de probabilité (Ω, \mathcal{F}, P) . Un processus $(B_t)_{t \geq 0}$ est un processus de Wiener standard s'il satisfait les propriétés suivantes :

1. $B_0(\omega) = 0$ pour tout $\omega \in \Omega$
2. $t \rightarrow (B_t(\omega))$ est une fonction continue, $\forall \omega \in \Omega$
3. Les accroissements de $(B_t)_{t \geq 0}$ sont indépendants et pour tout $t \geq 0$ et $h > 0$

$B_{t+h} - B_t$ suit la loi normale $N(0, h)$ [16].

B- Le processus de Wiener standard $W(t)_{t \in \mathbb{R}^+}$ est définie comme un processus stochastique markovien à accroissements indépendants, stationnaires, et gaussiens aboutissant à une trajectoire d'évolution aléatoire non-monotone sur tout intervalle, continu mais non-différentiable en tout t et pour lequel :

1. $W(0) = 0$
2. $E[W(t)] = 0, l$
3. $Var[W(t) - W(s)] = (t - s)$ pour tout $0 \leq s < t$

Le processus de Wiener standard, noté souvent dans la littérature par $W(t)$, est l'un des processus de Lévy les mieux connus. Il constitue un bloc fondamental de construction pour toute une collection de processus plus généraux. Le processus de Wiener généralisé ou le mouvement Brownien avec dérive est définie comme suit :

$$Y(t) = \mu_d t + \sigma_d W(t)$$

Où μ_d et σ_d sont respectivement les deux paramètres de dérive et de volatilité du modèle.

On note que la volatilité est définie comme une mesure de variation standard de la diffusion du modèle ou en d'autres termes du degré de fluctuation du processus.

Comme dans le cas du processus de Wiener standard, le processus de Wiener avec dérive est aussi caractérisé par des accroissements indépendants, stationnaires et qui suivent la loi de Gauss.

$$\Delta Y(t) \sim N(\mu_d \Delta t, \sigma_d^2 \Delta t),$$

Pour $\Delta Y(t) = Y(t + \Delta t) - Y(t)$ et $\Delta t \geq 0$.

Le processus de Wiener évolue en temps continu et à trajectoires continues. Comme il possède des accroissements indépendants, il est également un processus de Markov. Dans certaines applications la prévision de l'évolution future est de grande importance. Une mesure particulièrement intéressante pour la prise des décisions est le premier temps de passage d'un certain seuil ou limite. Une estimation de la distribution du premier temps de passage et des quantités correspondantes (moyenne, médian, écart-type) à partir du modèle choisi paraît donc indispensable. Pour un processus de Wiener généralisé et une valeur de seuil prédéfinie, la variable suit une loi inverse-gaussienne $IG(S_p/\mu_d, S_d^2/\sigma_d^2)$. La densité de probabilité de T_s est donnée par la fonction suivante [17].

$$IG(t; a, b) = \left(\frac{b}{2\pi t^3}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{b(t-a)^2}{2a^2}\right],$$

Pour $t > 0, a = S_p/\mu_d$ et $b = S_d^2/\sigma_d^2$.

II.3.1.2 : Le processus Gamma

Le processus gamma est un processus de chocs à temps continu et à accroissements indépendants et stationnaires qui décrit des trajectoires de dégradation constante. Ses trajectoires sont continues à droite et admettent des limites à gauche. Le processus gamma est fréquemment utilisé dans la littérature pour modéliser les mécanismes de vieillissement qui sont par nature lents, continus, progressifs et non résorbables. Son utilisation dans cette optique a été justifiée dans plusieurs travaux, notamment dans Noortwijk [18]. Ce processus est essentiellement adapté pour modéliser la phase de propagation des dégradations monotones et croissantes dans le temps comme la corrosion, la propagation de fissures ou l'érosion. Il convient aussi très bien pour la modélisation de la variabilité temporelle de détérioration et pour la détermination des décisions de maintenance et d'inspection optimales. Ce choix de modélisation suppose nécessairement que l'état du système à travers le temps ne s'améliore pas et qu'il est impossible au système de retrouver son état initial ou un état précédent sans intervention de maintenance. Plusieurs travaux portant sur la maintenance et la modélisation de la dégradation ont été menés avec le processus de gamma [14].

Définition :

Le processus $(Y_t)_{t \geq 0}$ est un processus gamma homogène et stationnaire si :

1. $Y_0 = 0$
2. Pour tout $n \geq 1$ et tout $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$, les accroissements $Y_{t_1}, Y_{t_2} - Y_{t_1}, \dots, Y_{t_n} - Y_{t_{n-1}}$ sont indépendants.
3. Pour tout $\Delta t > 0, t > 0$, la loi de l'accroissement $Y_{t+\Delta t} - Y_t$ est une loi gamma $Ga(\alpha \Delta t, \beta)$ où $\alpha, \beta \in \mathcal{R}^*$.

On dit que α est un paramètre de forme et β un paramètre d'échelle.

II.3.2 : Model de dégradation discrète

En générale tous les phénomènes de dégradation, le temps est une variable continue. 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 du temps simplifierait plus les calculs à condition que la description du modèle soit correcte et que le passage du temps discret au temps continu n'altère pas les résultats essentiels du problème. Il suffit alors de prendre une limite de pas de temps de discrétisation adéquate au problème [14].

Les modèles à dégradation discrète permettent de modéliser des dégradations de type chocs. On peut alors considérer que le système passe d'un état de dégradation à un autre par un incrément de type sauts. Entre deux chocs (palier) consécutifs, on considère que l'état du système reste stable. En revanche, en l'absence d'interventions de maintenance.

Ce dernier évolue toujours vers des états de plus en plus dégradés jusqu'à la défaillance totale du système (Figure II.8).

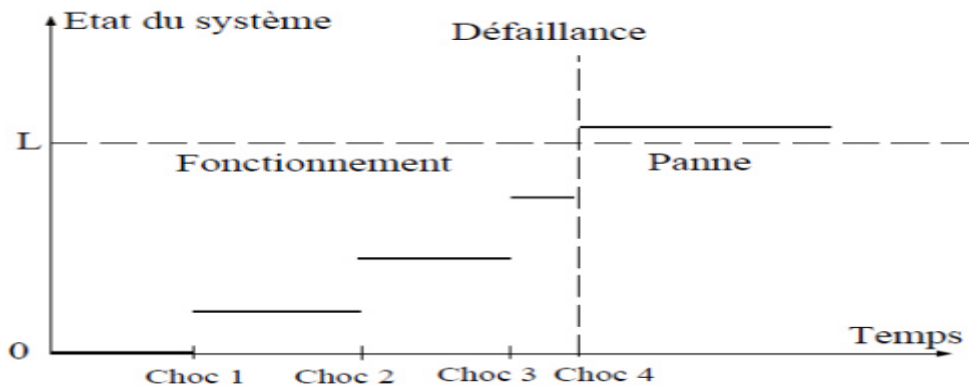


Figure II.8 : Représentation d'un modèle à dégradation discrète

Parmi les modèles à dégradation discrète les plus répandus il y a le processus de poisson et les processus markoviens ou semi-markoviens. La chaîne de Markov sera illustrée dans ce chapitre 2.

Par ailleurs, la loi de dégradation peut ne pas être disponible ou bien peut engendrer certaines difficultés au niveau de la formalisation mathématique du problème de maintenance. Ainsi, il peut être intéressant d'identifier un certain nombre d'états transitoires de dégradation que l'on peut classer par ordre croissant du système neuf jusqu'à la défaillance. Ces niveaux de dégradation peuvent être de nature discrète et dénombrable. On cherche à déterminer la matrice P de transition d'un état i vers un état j avec un taux de transition constant dans le cas markovien ou en fonction du temps dans un cadre non markovien. La caractérisation de cette matrice de transition peut s'avérer délicate et nécessite un grand nombre de données pour avoir une bonne estimation.

II.3.2.1 : Chaînes de Markov

L'approche Markovienne est la plus utilisée pour le traitement probabiliste des systèmes dynamiques. Elles reposent sur deux concepts de base : les états et les transitions. L'état d'un système est caractérisé par les différents états de ses constituants (par exemple opérationnels ou en défaut). Les changements d'état sont appelés les transitions.

Les chaînes de Markov reposent sur l'hypothèse que les taux de transition d'un système (taux de défaillance et de réparation) sont constants et que le processus est sans mémoire (Markovien). Un processus stochastique $X_t, t \in T$ est une collection de variables aléatoires définies sur un espace probabilisé (Ω, F, P) . La variable X_t représente l'état du processus au temps t et l'ensemble de toutes les valeurs possibles pour cette variable est appelée l'espace des états du processus et sera noté \mathcal{E} .

Un processus stochastique dont l'ensemble des états \mathcal{E} est fini ou dénombrable est appelé une chaîne. Le processus est à temps discret lorsque l'ensemble T est fini ou dénombrable [14].

Définition

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

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i)$$

Tel que $(x_k)_{0 \leq k \leq n-1}, i, j \in \mathcal{E}$

B- 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

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_{n+k} = j | X_{n+k-1} = i), k = 0$$

Par conséquent,

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_1 = j | X_0 = i) = p_{i,j}, \forall (i, j) \in \mathcal{E}^2$$

$p_{i,j}$ représente la probabilité de transition initiale de i à j ; en d'autres termes c'est la probabilité conditionnelle que le système se retrouve dans l'état j à l'étape suivante sachant qu'il se trouve actuellement dans l'état i .

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

II.4 : Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de dégradation (usures, corrosion, fatigue et fissure), leurs modèles (continue et discrète), et les processus les plus utilisés (Wiener, Gamma et Chaînes de Markov).

Chapitre III

Politique de maintenance

III.1 : Introduction

Au cours des dernières décennies, les problèmes de maintenance et de remplacement des systèmes en détérioration ont été largement étudiés dans la littérature. Des milliers de modèles de maintenance et de remplacement ont été créés. Cependant, tous ces modèles peuvent appartenir à certaines catégories de politiques de maintenance: politique de remplacement d'âge, politique de remplacement d'âge aléatoire, politique de remplacement de bloc, politique de maintenance préventive périodique ... etc.

Minimiser les coûts de maintenance, maximiser la disponibilité du système, etc. parmi de nombreuses options de maintenance liées à la fréquence d'exécution, au niveau d'intervention (parfait ou imparfait). En conséquence, de nombreuses stratégies de maintenance ont été développées depuis les années 90. Cependant, ces travaux étaient souvent limités à une classe de système: système de production unique (ou système centralisé). ...

Pour la politique de maintenance basée sur le temps, elle est basée sur la distribution à vie des composants. Cette politique est largement appliquée dans les industries car elle est relativement facile à mettre en œuvre et ne peut s'appuyer que sur le comportement statistique à long terme des processus de dégradation des composants et l'expérience du personnel. Normalement, la durée du cycle de maintenance d'un composant peut être déterminée par cette politique.

La variété de matériels a fourni le moyen de réduire ou d'éliminer les réparations inutiles, d'empêcher les pannes catastrophiques des machines, et de réduire l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises et induit des politiques de maintenance variées et adaptées en fonction des besoins.

III.2 : Politiques de maintenance :**III.2.1 : Définition :**

En générale La politique de maintenance doit définir le cadre des activités de maintenance, afin que les différents acteurs ainsi que les services connexes disposent de bases et références pour comprendre et organiser.

La définition de la politique de maintenance doit comporter :

- La définition du budget maintenance.
- Le choix du type de maintenance et les actions de réduction du cout.
- Le politique en manière d investissements.
- La stratégie en matière de gros entretiens.
- La stratégie en matière de sous-traitance.
- La politique de gestion des compétences [19].

III.2.2 : Choix de la politique de maintenance :

Le choix de politique de maintenance nécessite une analyse rigoureuse du système de production, des modes de dégradation, des paramètres physiques pertinents, des

- moyens à mettre en œuvre, des coûts induits, des objectifs en disponibilité et en gain.
- économique, des qualifications du personnel, des réticences des personnels et des conséquences sur l'organisation générale du service. L'organigramme suivant représente la démarche suivie pour le choix d'un type de maintenance.

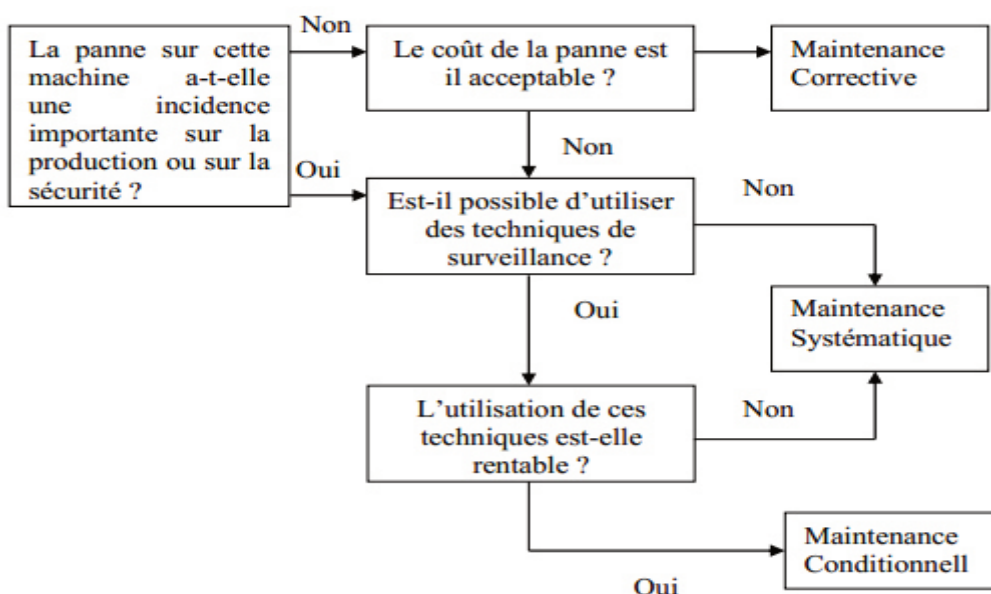


Figure III.1 : Choix de la politique de maintenance

Dans le premier cas, nous suivons l'évolution du taux de panne du composant en fonction du temps. Nous choisissons le type de maintenance en fonction de l'évolution de ce taux, de l'incidence sur la sécurité et la progressivité de la panne.

On peut aussi dans le deuxième cas, estimer pour chaque élément, le rapport entre le coût c d'une intervention préventive effectuée dans de bonnes conditions, et le coût C supplémentaire supporté en cas de défaillance.

Si ce rapport C/c est négligeable, la maintenance corrective est la plus intéressante. S'il est élevé, une maintenance préventive systématique ou conditionnelle s'impose [20].

Le choix de cette politique de maintenance est déterminé par le calcul du coût global de durée de vie (life cycle cost), en se basant sur des contraintes bien identifiées, A long terme, il s'agit d'abord de juger de la durée de vie optimale d'une machine en estimant la somme des coûts suivants :

- Coût d'achat C_a ;
- Coût de fonctionnement f ;
- Coût total de maintenance M ;
- valeur de revente éventuelle VR ;

Le coût global vaut :

$$CG = C_a + f + M - VR$$

Le coût total de maintenance ayant tendance à augmenter avec l'âge de la machine, et la valeur de revente à diminuer, il est intéressant de déterminer la durée au bout de laquelle on atteint un minimum. Cette durée de vie optimale correspond à l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine (Figure III.2) [20].

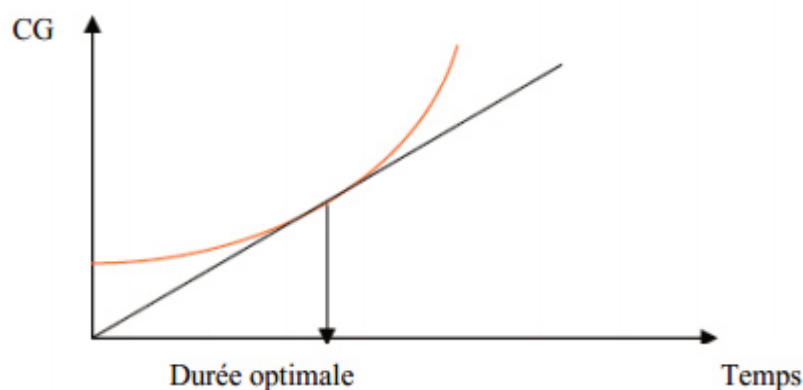


Figure III.2 : Détermination de la durée de vie optimale

III.2.3 : Les diverses politiques de maintenance :

Pour mieux rentabiliser les équipements, il faut choisir une stratégie adéquate de maintenance. Ainsi, au sein du service de maintenance.

La maintenance de type âge

Introduite initialement par Barlow et Proschan [21], elle suggère de remplacer l'unité de production soit après une durée prédéterminée constante de bon fonctionnement (l'âge T) ou dès l'apparition d'une défaillance. Bien évidemment, les coûts liés à un remplacement planifié sont inférieure à ceux dû à une défaillance.

Avec l'apparition des actions de maintenance de type minimal et imparfait, plusieurs extensions ont été étudiées et plusieurs modifications ont été proposées. Désormais, cette stratégie consiste à effectuer une action de maintenance préventive à l'âge prédéterminé T ou une action de réparation en cas de défaillance. Il est important de mentionner que les actions de MP à l'âge T et les actions de MC en cas de panne peuvent être minimales, imparfaites et parfaites. Plusieurs travaux (Nakagawa et al [22], Park and Pham2016 [23]) ont été effectués basées sur cette stratégie de maintenance de type âge an de développer de nouvelles politiques de maintenance tenant compte de la cadence de production et diverses contraintes opérationnelles [24].

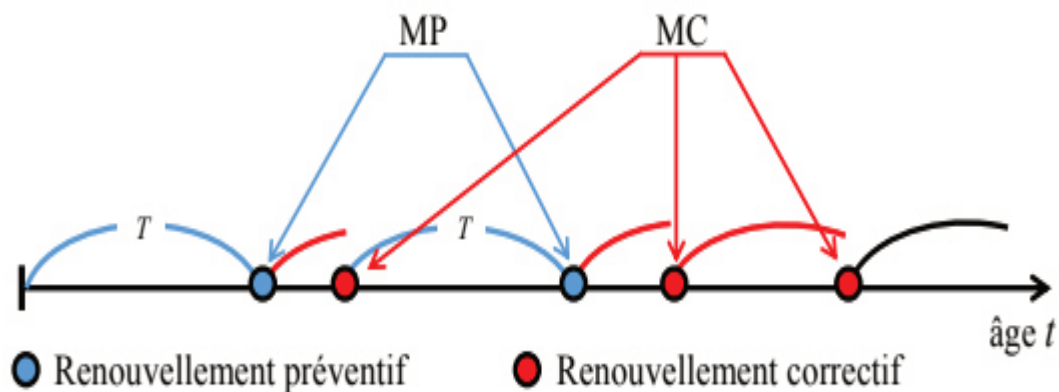


Figure III.3 : Principe de la politique de maintenance selon l'âge

La maintenance de type bloc

Cette politique est aussi connue sous le nom de "politique de MP périodique". Ce nom est utilisé puisque suivant cette politique, le système est renouvelé périodiquement à des intervalles fixes kT ($k = 1, 2, 3, \dots$) et indépendants de l'historique des défaillances du système, comme le montre la Figure(III.4) [5].

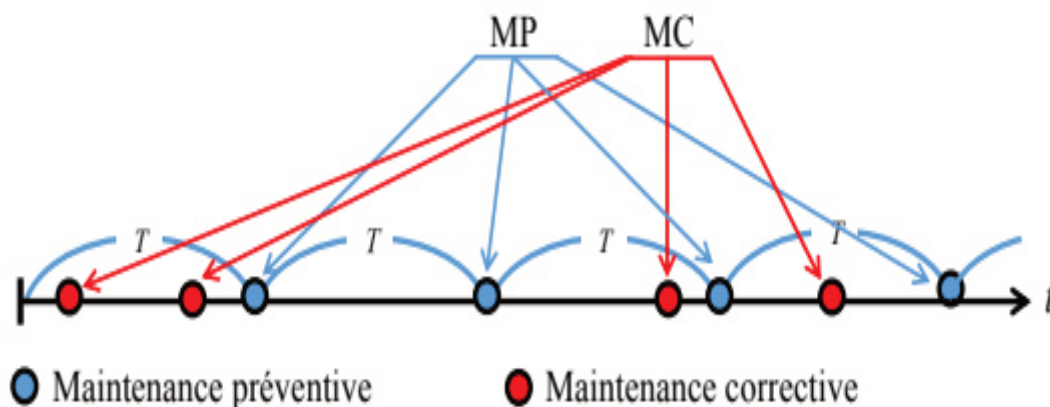


Figure III.4 : Principe de la politique de maintenance en bloc

III.3 : Modèles de maintenance :

Ou choix d'une politique de maintenance, l'efficacité des décisions qui sont prises va dépendre de la qualité du modèle qui représente le système. La modélisation du système permet d'avoir accès au comportement du système en termes de probabilité d'occurrence : probabilité de tomber en panne à chaque instant, probabilité d'être dans un état de dégradation donné en fonction du temps, etc... Cette représentation est indispensable pour pouvoir évaluer les coûts de maintenance sur une période donnée et prévoir les interventions.

Les différentes étapes pour l'élaboration d'un modèle sont les suivantes.

Tout d'abord, l'espace d'états qui correspond à l'ensemble des mesures qui permettent de rendre compte de l'état de fonctionnement du système à chaque instant doit être défini.

L'ensemble de tous les états possibles peut être un ensemble de valeurs (discrètes ou continues).

Les états menant à la défaillance du système sont généralement modélisés de l'une des manières suivantes:

- Soit comme une "boîte blanche" qui correspond à un modèle conceptuel dont l'idée est de décrire à un niveau de réduction donné le comportement du système. L'ensemble des relations correspondent alors à des phénomènes connus et identifiés, dont la signification est pertinente dans la problématique posée.

Toutefois, une relation entre variables d'état inclut souvent des phénomènes qui se produisent à des niveaux inférieurs au niveau de réduction retenu.

- Soit comme une "boîte noire" qui est à l'opposé du modèle conceptuel ("boîte blanche"). La "boîte noire" est un modèle empirique où on ne cherche pas à comprendre le

fonctionne de system, mais à décrire à partir d'une analyse statistique les relations entre variables de sortie et variables d'entrée.

- Soit comme une “boîte grise” qui est un bon intermédiaire entre la “boîte blanche” et la “boîte noire”. La “boîte grise” correspond à une approche stochastique.

Lorsque la transparence du modèle dans le cas de la “boîte blanche” devient moins nette à cause des relations masquées par des processus non décrits, on parle alors de “boîte grise”. Dans la “boîte noire” qui est un modèle déterministe, on cherche à associer une sortie à une entrée, et l'on affecte à cette sortie une probabilité d'occurrence. Alors que dans la “boîte grise” qui est un modèle stochastique, on associe, pour une entrée donnée une distribution de probabilité des sorties.

Ensuite, il faut déterminer les différentes actions de maintenance disponibles qui peuvent être de deux types :

- De type surveillance (inspections).
- Curative (remplacements, réparations).

♦ Le modèle de maintenance parfaite :

Le modèle de maintenance parfaite considère que chaque maintenance remet le système à neuf. Le système après maintenance est donc aussi bon que neuf ou en anglais As Good As New (AGAN). Les durées inter-défaillances, et donc inter-maintenances, sont alors indépendantes et de même loi. On montre facilement que cela implique que l'intensité de défaillance s'écrit : [20]

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

Avec :

t = temps

TN_t = Le passe du processus

La Figure III.5 représente une trajectoire de l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances AGAN.

Les instants de défaillance sont les instants de saut de l'intensité. Après une maintenance, l'intensité repart de zéro parallèlement à la courbe d'intensité initiale.

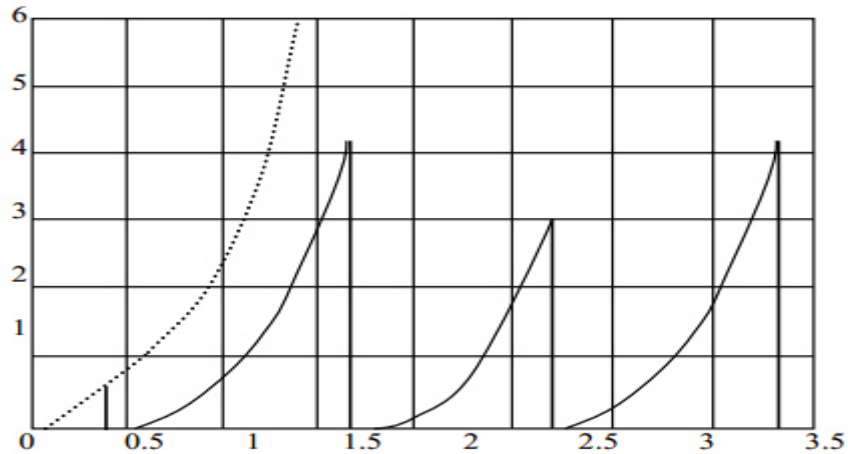


Figure III.5 : Intensité dans le cas AGAN (As Good As New)

♦ Le modèle de maintenance minimale :

L'effet de la maintenance minimale est de remettre le système en fonctionnement dans l'état exact ou il était juste avant la défaillance. Cela caractérise un effet de maintenance neutre (n'améliore pas et ne dégrade pas le système).

Le système après maintenance est dit aussi mauvais que vieux ou en anglais As Bad As Old (ABAO) (Figure III.6).

L'intensité de défaillance est alors une fonction uniquement du temps et ne dépend donc pas du passé du processus : [20]

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

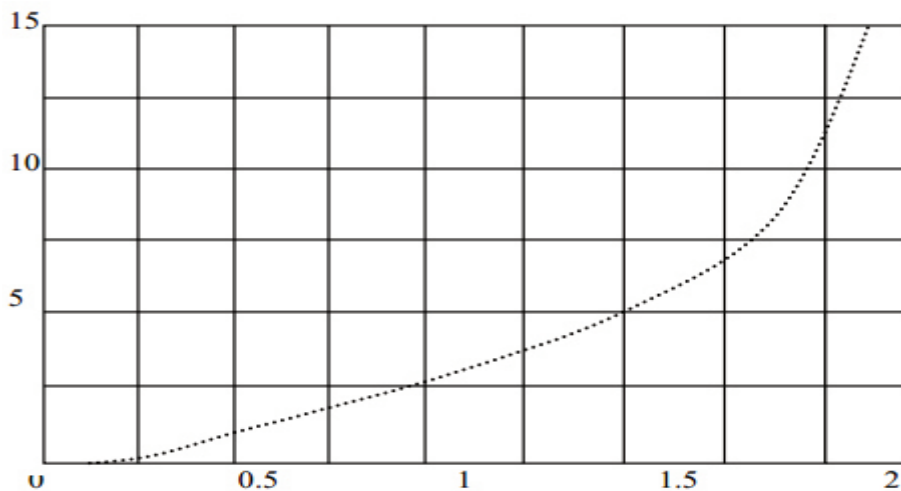


Figure III.6 : Intensité dans le cas ABAO

◆ Le modèle de maintenance imparfaite:

La situation As Bad As Old signifie que l'efficacité de la maintenance est minimale et la situation As Good As New qu'elle est maximale. En pratique, on est entre ces deux cas extrêmes. Le système après maintenance est meilleur que vieux ou Better than Old. Et après maintenance est moins bon que neuf ou Worse than New.

Ces deux situations se retrouvent parfois dans la littérature sous le nom de réparation meilleure que minimale (Better than Minimal Repair) ou plus largement maintenance imparfaite (Imperfect Maintenance) [25]. Plusieurs causes peuvent être à l'origine d'une action de maintenance imparfaite comme par exemple :

- ✓ La réparation de la mauvaise pièce.
- ✓ La réparation partielle de la pièce défectueuse.
- ✓ La réparation partielle ou totale de la pièce défectueuse mais en endommageant des pièces adjacentes.
- ✓ Le choix du moment de l'intervention.
- ✓ Des techniciens non-qualifiés.
- ✓ Des pièces de rechange appropriées non-disponibles.

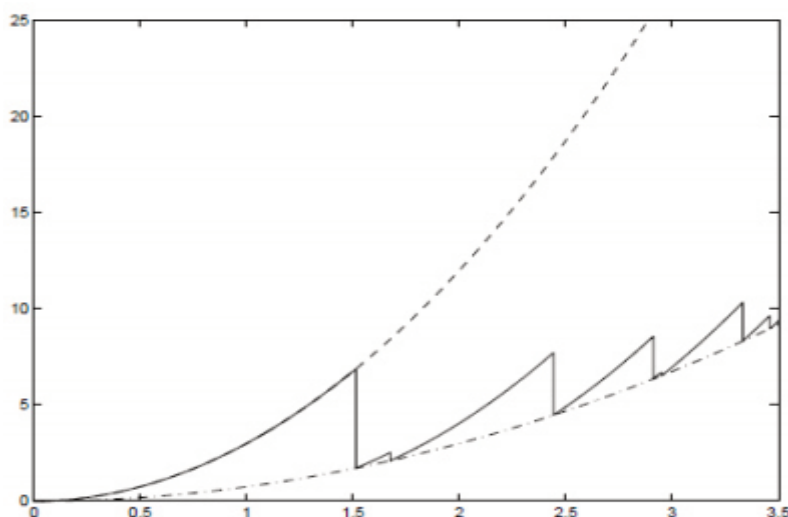


Figure III.7 : L'intensité de la défaillance dans le cas de la maintenance imparfaite

III.4 : Approche de modélisation de la maintenance imparfaite

Pour modéliser la maintenance préventive imparfaite, Plusieurs méthodes ont été utilisées. Les méthodes présentées dans la littérature peuvent être classées en trois catégories : les méthodes basées sur une réduction du taux de défaillance, les méthodes basées sur une

réduction arithmétique d'âge et les modèles hybrides qui représentent une combinaison entre les deux méthodes précédemment citées.

Dans ce qui suit, nous présenterons les principales approches publiées dans la littérature (Voir figure III.8)

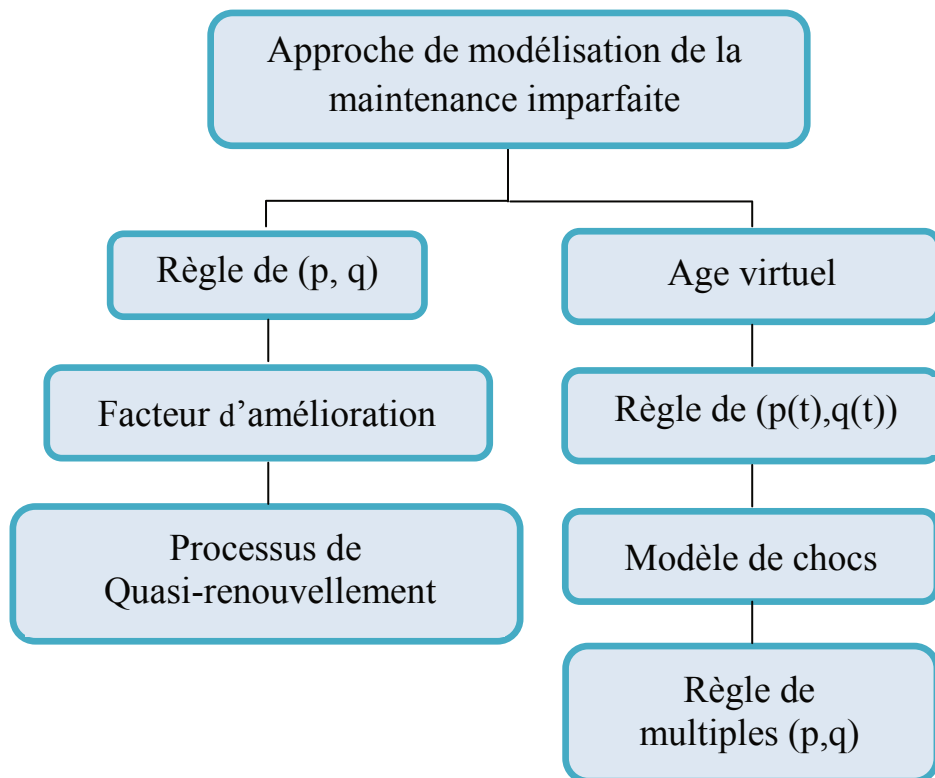


Figure III.8 : les principales approches de la maintenance imparfaite

♦ Modèle de (p-q) de Nakagawa

[Nakagawa [26], [Nakagawa [27] a étudié la modélisation de la maintenance préventive (MP) imparfaite. En effet, il a considéré que suite à une action de maintenance le système peut être restauré à l'état parfait (maintenance parfaite) avec une probabilité p et à l'état minimal avec la probabilité complémentaire $q = 1 - p$. Si $p = 1$, l'action effectuée coïncide avec une MP parfaite et si $p = 0$, l'action effectuée coïncide avec une action minimale. Dans ce cas, les actions de maintenance préventive parfaite et minimale peuvent être considérées comme des cas particuliers de la maintenance préventive imparfaite [24].

♦ Approche $p(t), q(t)$ -Modèle de Block

Le modèle de Brown et de Proschan [23] a été étendu par Block et al [28]. Considérant que p et q dépendent de l'âge du système à maintenir.

$$q(t) = 1 - p(t) \quad \forall t > 0$$

Cette politique de maintenance dépendante de type âge, Si ce composant tombe en panne à un âge $y < T$, il est soit remplacé par un neuf, avec une probabilité $p(t)$ soit il subit une réparation minimale qui est effectuée avec une probabilité $q(t)$ [29].

◆ Approche utilisant des nouveaux facteurs d'amélioration

Introduite initialement par Malik, dans la modélisation des stratégies de maintenance imparfaite. Selon Malik, la maintenance réduit l'âge du composant d'un facteur α défini à l'avance.

Si $\alpha = 0$ Réparation minimale

Si $\alpha = 1$ Remise à neuf

Le degré d'amélioration du taux de panne correspond au facteur d'amélioration α [29].

◆ Approche utilisant l'âge virtuel

Développé par Kijima et al [31]. Si le système à l'âge virtuel $V_{n-1}=y$, immédiatement après la $n - 1^{ième}$ réparation, le $n^{ième}$ instant de défaillance X_n est tel

$$\Pr\{X_n \leq x / V_{n-1}=y\} = \frac{F(x+y) - F(y)}{1 - F(y)}$$

Où $F(x)$ est la fonction de distribution associée aux durées de vie du système [29].

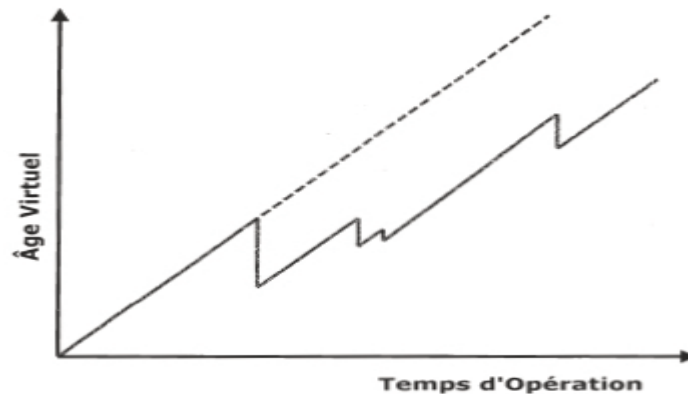


Figure III.9 : Profil de l'âge virtuel en fonction du temps d'opération

◆ Les modèles de quasi-renouvellement

Wang et Pham [32], ont construit un modèle reposant sur l'hypothèse suivante:

Si $\{Y_i\} \forall i \geq 1$ est une suite de variables aléatoires indépendantes et de même loi, alors les durées inter-défaillances sont définies par:

$$X_i = \alpha^{i-1} Y_i, \forall i \geq 1$$

Où α est un paramètre réel strictement positif. Le taux de panne est défini comme suit:

$$X_i = \frac{1}{\alpha^{Nt}} \lambda \left(\frac{t - T_{Nt}}{\alpha^{Nt}} \right)$$

L'efficacité de la maintenance dépend ici du paramètre α au sens où, selon la valeur prise par α , les durées inter-défaillances seront de plus en plus grandes, de plus petites ou de même loi:

- $\alpha > 1$: la maintenance est plus que parfaite.
- $\alpha = 1$: la maintenance est parfaite.
- $\alpha \in]0,1[$: les X_i sont de plus en plus petits, l'efficacité de la maintenance est moins bonne que dans le cas précédent [29].

III.5 : Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les diverses politiques de maintenance (de type âge et de type bloc), leurs méthodes de choix, ainsi que les différents modèles de maintenance (parfaite, minimale, et imparfaite).

La maintenance imparfaite sur laquelle on va prendre un exemple détaillé dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

Optimisation des intervalles de maintenance imparfaite et minimisation des couts moyens

IV.1 : Introduction :

Dans ce chapitre on va appliquer un modèle de maintenance imparfaite en utilisant le remplacement périodique de type bloc. Il est spécifiquement utilisé pour l'analyse des systèmes électroniques et électriques complexes.

La stratégie de remplacement de type Bloc ne prend pas en considération l'âge et l'état de l'équipement, elle recommande d'effectuer les remplacements à la panne et à tous les T unités de temps.

L'objectif de ce chapitre est d'avoir l'influence de variations des différents paramètres sur l'optimisation des intervalles de maintenance imparfaite et sur la minimisation des couts moyens.

❖ Le processus de quasi-renouvellement:

Tant donné $\{N(t), t > 0\}$ un processus continu et X_n , qui représente le temps entre le $(n - 1)^{ième}$ et le $n^{ième}$ événement de ce processus avec $n \geq 1$. En considérant la séquence des variables aléatoires non négatives $\{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ on peut dire, que ce processus est un processus de quasi-renouvellement. Ce modèle a donc comme but décrire l'état du système lorsqu'il reçoit des actions de maintenance préventive imparfaite dans les moments distincts dans le temps mais avec une fréquence fixée auparavant [21].

IV.2 : Développement du modèle :

Le concept de cette politique de maintenance est de réparer imparfaitement le système et cela à des instant kT prédéterminé tel que $kT (k = 1, 2, 3 \dots)$ sans tenir compte de l'historique du système. Après chaque réparation imparfaite le cout de la i défaillances est donne par :

$$C_{fr} = C_f + (i - 1)C_v$$

Si et seulement SI $1 \leq i \leq (k - 1)$; où k est un entier positif

On considère que la réparation est imparfaite lorsque les temps successifs d'opération d'un système sont indépendants et décroissent d'une fraction $(\alpha - 1)$. Les temps successifs de réparation sont eux aussi indépendants et augmentent d'un facteur $(\beta - 1)$, tel que $0 < \alpha < 1$, $\beta > 1$. Sachant que le coût de réparation augmente d'un facteur C_v à chaque fois qu'on réalise une nouvelle maintenance imparfaite.

Désignons par x_1 , la variable aléatoire, le premier temps de l'opération avec une moyenne μ_1 . A chaque fois qu'un temps d'opération est ajoutée la variable aléatoire sera multiplié par α , donc on aura :

$$X_2 = \alpha x_1; X_3 = \alpha^2 x_1; X_4 = \alpha^3 x_1; X_5 = \alpha^4 x_1; \dots X_k = \alpha^{k-1} x_1; X_{k-1} = \alpha^{k-2} x_1.$$

Ceci signifie que les temps d'opération diminuent avec l'augmentation du nombre de réparations imparfaites.

Sur la $(k - 1)$ réparation imparfaite, le système est maintenu préventivement sur les intervalles $T, 2T, 3T, \dots$ et ce à un coût C_f où $T > 0$. On considère que la maintenance préventive est imparfaite lorsque le système se trouve comme neuf (as good as new) avec une probabilité p (MP parfaite) et comme vieux (as bad as old) avec une probabilité $q = 1 - p$ (MP minimale) après chaque action de maintenance.

Supposons maintenant que le temps pour effectuer la maintenance préventive parfaite soit une variable aléatoire W avec une moyenne w , et que le temps pour effectuer la maintenance préventive minimale est négligeable. Si une défaillance se présente entre les instants mT ($m = 1, 2, 3 \dots$) on effectuera une réparation imparfaite à un coût C_{fr} avec un temps de réparation négligeable. Les temps successifs de réparation d'un système sont indépendants et décroissent d'une fraction $(1 - \lambda)$, où $0 < \lambda < 1$ [21].

Variables de décision

- T = Temps de maintenance préventive.
- k = Nombre de réparations imparfaites.

IV.3 : Hypothèses de modélisation

Les temps entre les maintenances préventives parfaites consécutives, constituent un cycle de renouvellement. En utilisant la théorie classique de renouvellement, le coût de maintenance durable par unité de temps, ou de coût moyen $L(T, k)$, est égal au coût de maintenance par cycle de renouvellement $C(T, k)$ divisé par la durée d'un cycle de renouvellement $D(T, k)$ [21].

$$L(T) = \frac{C(T)}{D(T)} \quad (1)$$

Où,

$$C(T) = (k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} p(ic_p + c_{fr}M(iT)) \quad (2)$$

Et

$$D(T) = \frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \sum_{i=1}^{\infty} (w + iT)pq^{i-1} \quad (3)$$

Par conséquent le coût de maintenance moyen par unité de temps ou taux de coût est égal

A:

$$L(T) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + c_p p^{-1} + p c_{fr} \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} M(iT)}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (4)$$

Où $M(T)$ est la fonction de renouvellement d'un processus de quasi-renouvellement.

Par conséquent, la fonction de quasi-renouvellement est donnée par:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi \left(\left[t - \frac{\mu \alpha^{k-1} (1-\lambda^n)}{1-\lambda} \right] / \sqrt{\frac{\sigma^2 \alpha^{2k-2} (1-\lambda^{2n})}{1-\lambda^2}} \right) \quad (5)$$

Où « Φ » est le cdf (cumulative distribution function) normal standard. [Zelen et Severo (1964)]

$$\Phi(x) = 1 - (0.4361836t - 0.1202676t^2 + 0.9372980t^3)(\sqrt{2\pi})^{-1} \exp(-\frac{1}{2}x^2) \quad (6)$$

Où:

$$t = \frac{1}{(1+0.33267x)} \quad (7)$$

IV.4 : Application numérique

❖ Première partie

Dans cette partie on a programmée les équations du model de la stratégie de maintenance imparfait en utilisant le remplacement périodique de type bloc on utilisant logiciel MATLAB. Dans le but d'obtenir le coût moyen minimal pour T optimal.

Pour : $p = 0.7$; $q = 1 - p$; $\alpha = 0.6$; $\mu_1 = 0.9$; $\eta_1 = 0.8$; $\beta = 1.1$; $w = 0.15$; $\mu = 10$; $\lambda = 0.95$; $\sigma = 1.1$; $c_f = 500$; $c_v = 200$; $c_p = 880$; $N=10$.

Algorithme de calcul de cout minimal et de T optimal

- ✓ La programmation de la fonction de coût de maintenance par cycle de renouvellement $C(T, k)$.
- ✓ La programmation de la fonction de la durée d'un cycle de renouvellement $D(T, k)$.
- ✓ La programmation de la fonction de cout moyen $L(T)$, Que est égale a la division de ces dernière fonction. (voir Figure IV.1)
- ✓ Utilisons la fonction (fminbnd) pour calculer le cout moyen minimal et le T optimal, Cela on fonction de K (voir les tableaux ci dessous).

- La courbe de coût moyen

$$L(T) = \frac{C(T, k; \alpha, \beta, p)}{D(T, k; \alpha, \beta, p)}$$

$$L(T) = \frac{(k - 1)c_f + \frac{(k - 1)(k - 2)}{2}c_v + c_p p^{-1} + p c_{fr} \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} M(iT)}{\frac{\mu_1(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} + \frac{\eta_1(1 - \beta^{k-1})}{1 - \beta} + \frac{T}{p} + w}$$

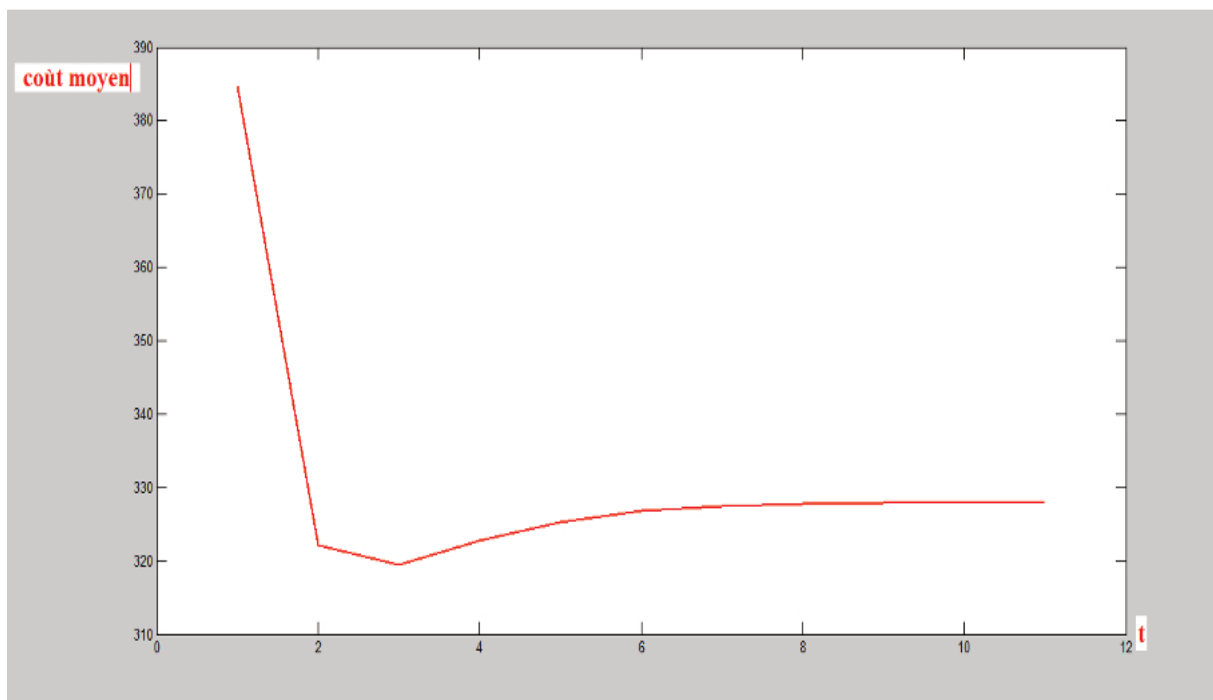


Figure IV.1 : courbe de cout moyen

Pour (T=5, k=3)

On remarque une diminution brutale du coût moyen jusqu'à $t \approx 3$, puis il croît l'égerment.

On a le cout moyen égal au coût de maintenance par cycle de renouvellement $C(T, k)$ divisé par la durée d'un cycle de renouvellement $D(T, k)$.

Cela signifie qu'au début le system est neuf, et ça dégrade avec le temps, le coût de maintenance par cycle de renouvellement augmente et la durée d'un cycle de renouvellement diminue.

❖ Deuxième partie

Dans cette partie on a utilisé la fonction (fminbnd) pour trouver le coût moyen minimal et le T optimal cela on fonction de K (nombre de réparation imparfaite). On variant k tel que $k \in [1,12]$, on a obtenus les résultats suivant :

Pour :

$p = 0.7; q = 1 - p; \alpha = 0.6; \mu_1 = 0.9; \beta = 0.8; \beta = 1.1; w = 0.15; \mu = 10; \lambda = 0.95;$
 $\sigma = 1.1; c_f = 90; c_v = 5; c_p=300; N=10.$

Tableau IV.1 : La variation de coût moyen minimal et T optimal en fonction de k

k	Cout moyen minimal	T optimal
1	39.0059	9.9979
2	40.6555	9.9753
3	43.6683	9.7700
4	79.8330	4.1655
5	93.6854	2.8886
6	101.0783	2.1545
7	105.0856	1.6171
8	106.7576	1.1889
9	106.7398	0.8320
10	105.4991	0.5258
11	103.3858	0.2575
12	100.6633	0.0188

On remarque que le cout moyen minimal augmenté à chaque fois que une autre réparation imparfaite apparaitre et cela jusqu'à $k=8$, puis ce dernier diminue l'égerment, par contre le T optimal diminue à chaque nouvel réparation.

Cela signifie qu'à chaque réparation imparfaite, le coût de maintenance par cycle de renouvellement augmente et la durée d'un cycle de renouvellement diminue.

❖ **Influence de $C_f, C_V, C_p/C_{fr}$ et p sur le coût moyen minimal et le T optimal :**

- **Influence de C_f** (le coût fixe pour effectuer une réparation à la panne)

Tableau IV.2 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en fonction de C_f tel que $k=5$; $C_V=200$; $C_p=880$.

C_f	Cout moyen minimal	T optimal
50	307.9048	2.4858
100	343.1364	2.3649
150	379.4557	2.2465
200	416.8658	2.1309
300	494.9464	1.9084
500	663.9731	1.4993
700	849.6066	1.1368
1000	1157.6	0.6693

On remarque que le cout moyen minimal augmente, et le T optimal diminue. A chaque fois que le coût fixe pour effectuer une réparation à la panne augment.

On à Le coût de la $i^{ème}$ défaillances est donné par : $C_f + (i - 1) C_V$, ce la signifie que à chaque augmentation de C_f le coût de la $i^{ème}$ défaillances augmente, donc le cout moyen minimal augment. Et comme notre objectif et de minimisé le cout moyen pour un T optimal, il faut prendre alors les valeurs de C_f les plus petites possible.

- **Influence de C_V** (coût variable par réparation imparfaite)

Tableau IV.3 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en fonction C_V tel que $k=5$; $C_f =500$; $C_p =880$.

C_V	Cout moyen minimal	T optimal
50	545.2363	1.3050
100	582.7419	1.4010
150	622.7213	1.4599
200	663.9731	1.4993
300	748.3968	1.5484
500	920.4157	1.5971
700	1094	1.6212
1000	1355.4	1.6407

On remarque l'augmentation de Cout moyen minimal et de T optimal à chaque variation de coût variable par réparation imparfaite (C_V).

On à le coût de la $i^{\text{ème}}$ défaillances est donné par : $C_f + (i - 1) C_V$, ce la signifie que à chaque augmentation de C_V le coût de la $i^{\text{ème}}$ défaillances augment, le cout moyen minimal augment. Et comme notre objectif et de minimisé le cout moyen pour un T optimal, il faut prendre alors les valeurs de C_V les plus petites possible.

- **Influence de C_p/C_{fr}** (cout de la maintenance préventive sur le cout d'une réparation)

Tableau IV.4 : Les valeurs des coûts moyen minimal et les T optimal en variant le rapport C_p/C_{fr} , tel que $K=5$; $C_f=500$; $C_V=200$

C_p/C_{fr}	Coût moyen minimal	T optimal
0.1	633.2763	0.7675
0.2	641.2928	1.0602
0.5	681.0951	1.7421
1	758.5932	2.6115
2	891.0987	4.1333
3	956.9529	5.9563
5	1009.2	10.0000

On remarque l'augmentation de Coût moyen et de T optimal à chaque variation de rapport C_p / C_{fr} . Donc pour avoir un coût minimal il faut prendre la plus petite valeur de rapport. et pour avoir un T optimal il faut prendre la plus grand valeur de rapport.

- **Influence de p** (la probabilité d'être restauré à l'état parfaite)

Tableau IV.5 : La variation de coût moyen minimal et le T optimal en variant p, tel que $k=5$; $C_f=500$; $C_v=200$; $C_p=880$.

p	Coût moyen minimal	T optimal
0.1	710.9587	2.3039
0.2	749.7150	2.6998
0.3	740.8759	2.5836
0.4	718.3605	2.3130
0.5	695.6103	2.0187
0.6	677.2311	1.7442
0.7	663.9731	1.4993
0.8	655.2292	1.2821
0.9	650.1478	1.0879

On remarque une augmentation de Coût moyen minimal et de T optimal à la deuxième variation de p, suivie d'une diminution jusqu'à la dernière variation.

Pour avoir un coût minimal il faut prendre la plus grand valeur de p. et pour avoir un T optimal il faut prendre la plus petite valeur.

IV.5 : Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté un modèle de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc. Cette stratégie suggère d'effectuer les remplacements à la panne et à tous les T unités de temps est ce indépendamment de l'âge et de l'état de l'équipement.

Ce modèle a donc comme but décrire l'état du système lorsqu'il reçoit des actions de maintenance préventive imparfaite.

Dans l'application numérique, utilisons « MATLAB », on a programmé les différentes fonctions dans le but de minimiser le coût moyen par unité de temps. Les résultats montrent que ce modèle permet une diminution de ce coût en optimisant les temps d'intervention ainsi que les activités de maintenance afin d'exploiter au mieux la durée de vie résiduelle des équipements. Et pour voir l'influence de différentes variations des coûts et de la probabilité d'être restauré à l'état parfaite sur ces dernières.

Dans le cas de l'expérience réalisée, on a pu constater l'importance fondamentale des paramètres de performance du système à évaluer avant qu'un modèle précis d'optimisation ne soit appliqué.

Conclusion générale

Dans le contexte de mondialisation actuel, les entreprises doivent être de plus en plus compétitives. Le fonctionnement des moyens de production étant très optimisé, de nos jours, il est nécessaire de trouver d'autres leviers d'amélioration. Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements.

L'optimisation des plannings des activités de maintenance représentent donc un moyen d'action directe sur la performance des entreprises.

Nous avons constaté que la fonction de maintenance dans une entreprise est nécessaire à plus d'un titre, dans la mesure où elle lui assure une performance globale conjuguée avec une rentabilité importante.

Dans notre travail et plus précisément dans le quatrième chapitre une stratégie de maintenance préventive imparfaite a été proposée pour un système de production. Cette stratégie suggère qu'à chaque fois que le système tombe en panne, son âge se réduit d'une certaine valeur α et le temps pour effectuer une réparation imparfaite augmente d'une certaine fraction β . Également, dans cette stratégie le système sera remplacé préventivement soit à la panne suivante après la dernière réparation imparfaite k ou bien à un âge déterminé T . Ce type de stratégie a suscité, au cours de la dernière décennie, beaucoup d'intérêt dans le domaine de la recherche autant sur le plan fondamental qu'appliqué.

En fin on conclut que la maintenance joue un rôle très important dans les grandes entreprises, et l'investissement dans ce domaine est nécessaire et indispensable pour la préservation du bien.

Références bibliographiques

Références

- [1] DAFDAF Abd Elhak et FAID Omar, « Optimisation de la fiabilité d'un système électromécanique », mémoire, Université Mohamed Boudiaf, M'silla, 2018.
- [2] BENAICHA Halima, « Analyse des stratégies de maintenance des Systèmes de production industrielle », Thèse Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf, Oran, 2015.
- [3] Jean Heng, « Pratique de la maintenance préventive », Paris 2002.
- [4] DERRADJ Tahar, « Mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive d'un système de production », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2018.
- [5] AIT MOKHTAR El Hassene, « optimisation de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens », Thèse Doctorat, université Abderrahmane MIRA, Bejaïa, 2016.
- [6] AMMAM Djamel et HAMIDI Yacine, « conception d'un dispositif de type abrasimètre par la méthode de l'analyse de valeur », mémoire, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.
- [7] BRUNETIERE Noel « Introduction à la tribologie », cours, institut prime-Futuroscope 2016.
- [8] GROSGOGEAT Brigitte et P.COLON, « La Corrosion », cours, Société Francophone De Biomateriaux Dentaires, université médicale virtuelle francophone, 2009-2010.
- [9] Sylvie Pommier « Mécanique des matériaux » cours, Université de Paris Saclay.
- [10] BOUALEM Ali et BAILICHE Baghdâd, « effet des propriétés mécaniques et des paramètres géométriques des patches en composites sur le comportement en rupture des pipelines », Mémoire, Universitaire BELHADJ BOUCHAIB, Ain T'émouchent, 2015.
- [11] DELOUX Estelle, « Politique de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant », Thèse Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Techniques Industrielles Et Des Mines Université De Nantes, 2008.

Références bibliographiques

- [12] CHOUIKHI Houssam, « optimisation des stratégies de maintenance verte pour les systèmes de production de biens et de services », Thèse Doctorat, Ecole Doctorale IAERM, Université De Lorraine Metz, 2012.
- [13] LESOBRE Romain, « 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 Doctorat, Université De Grenoble, 2006.
- [14] AYADI Inès, « Optimisation des politiques de maintenance préventive dans un cadre de modélisation par modèles graphiques probabilistes », Thèse Doctorat, École Doctorale MSTIC Université Paris-Est 2013.
- [15] Richard E. Barlow et Frank Proschan, « Mathematical Theory of Reliability (Classics in Applied Mathematics) », Society for Industrial Mathematics, Janvier 1987.
- [16] BERGLUND Nils, « Introduction aux intégrales stochastiques » Université de Toulon France, 2003.
- [17] GHAMLOUCH Houda, « Modélisation de la dégradation, maintenance conditionnelle et pronostic: usage des processus de diffusion », Thèse doctorat, Université De Technologie De Troyes, 2016.
- [18] J. M. Van Noortwijk, « A survey of the application of gamma processes in maintenance », Reliability Engineering & System Safety, vol 94, no. 1, pages 2–21, Janvier 2009.
- [19] HOHMANN Christian, « Qu'est qu'une politique de maintenance », Article, Mise à jour le 18/04/2020.
- [20] ABDALLAH Mohammed, « Optimisation de la maintenance préventive des systèmes de production incorporant la dépendance par les méta-heuristique », thèse doctorat, Université De Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes.
- [21] Richard E Barlow et Frank Proschan, « Mathematical theory of reliability », John Wiley sons, 1965.
- [22] Toshio Nakagawa, Xufeng Zhao, et Won Young Yun, «Optimal age replacement and inspection policies with random failure and replacement times », International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 18(05):405416, 2011.

Références bibliographiques

- [23] Minjae Park et Hoang Pham., « Cost models for age replacement policies and block replacement policies under warranty», *Applied Mathematical Modelling*, 40(9):5689-5702, 2016.
- [24] GOUIAA-MTIBAA Amal, « Développement de nouvelles politiques de maintenance intégrée à la qualité en tenant compte de diverses contraintes opérationnelles », Thèse Doctorat , Université de Lorraine, 2017.
- [25] DOYEN Laurent et GOUDOIN Olivier, « Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables», Synthèse bibliographique, Institut National Polytechnique, Grenoble.
- [26] Toshio Nakagawa, « imperfect preventive maintenance», *IEEE Transactions on Reliability*, R 28(5):402, 1979.
- [27] Toshio Nakagawa, «Optimum policies when preventive maintenance is imperfect», *IEEE Transactions on Reliability*, R 28:331-332, 1979.
- [28] Block H., Borges W. et Savist T. « 'Age dependent minimal repair » *Journal of Applied Probability* 22:370-385 (1985).
- [29] MERLANO Arturo, « Optimisation de la disponibilité des systèmes assujettis à la maintenance imparfaite », Mémoire, Université Laval, 2008.
- [30] Malik M, « Reliable preventive maintenance policy », *AIEE Transactions* 11/3:221-228 (1979).
- [31] Kijima M. Morimura H. et Suzuki Y, « Periodical replacement problem without assuming minimal repair », *European Journal of Operational Research* 37/2:194-203(1988).
- [32] Wang H.Z. et Pham H, « A quasi renewal process and its application in the imperfect maintenance. », *International Journal of Systems Science* 27/10: 1 055-1 062. (1996).

Résumé

Ce travail consiste un modèle de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc. Cette stratégie suggère d'effectuer les remplacements à la panne et à tous les T unités de temps est ce indépendamment de l'âge et de l'état de l'équipement.

A cet effet, on a exploité le logiciel « MATLAB » pour la programmation et la simulation des fonctions de coût et de la durée d'un cycle de renouvellement, et on à utilisé la fonction (fminbnd) pour trouver le coût moyen minimal et le T optimal cela on fonction de K (nombre de réparation imparfaite).

Dans le cas de l'expérience réalisée, on a pu constater l'importance fondamentale des paramètres de performance du système à évaluer avant qu'un modèle précis d'optimisation ne soit appliqué.

Abstract

This work consists of an imperfect maintenance model using periodic block replacement. This strategy suggests performing replacements at failure and every T time units regardless of the age and condition of the equipment.

To this end, the MATLAB software was used for programming and simulating the cost functions and the duration of a renewal cycle, and the function (fminbnd) to find the minimum average cost and the optimal T that it is a function of K (number of imperfect repairs).

In the case of the experiment carried out, we could see the fundamental importance of the performance parameters of the system to be evaluated before a precise optimization model is applied.