

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Option : Maintenance Industrielle

Thème

**OPTIMISATION DES PÉRIODES
D'INTERVENTION SUR LES ÉLÉMENTS D'UNE
LIGNE DE PRODUCTION INDUSTRIELLE**

Préparé par :
BRAHIM Ismail et **MESSAOUD** Kheireddine

Soutenu publiquement le : 27 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M.BALTACH .A	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Président
M.MECHEKOUR. A	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
M. SASSI .A	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
Mr.GUEMMOUR M.B	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

On tient avant tout à remercier chaleureusement Monsieur **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, Maître de conférences (B) à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, il a su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On le remercie non seulement pour la qualité de son encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont il a toujours fait preuve.

On remercie tout autant Monsieur **BALTACH Abdelghani** Maître de conférences classe A à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs **SASSI Ahmed** Maître de conférences classe A et **MECHEKOUR Abdelhadi** Maître de conférences classe B à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret qui nous ont fait l'honneur d'être examinateur de notre mémoire, et qui ont consacré de leur précieux temps à l'examen et à l'évaluation de notre travail.

On les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail afin de l'expertiser avec une grande efficacité et une grande rapidité, ainsi que pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document.

Sommaire

Introduction générale.....	2
CHAPITRE 01: Stratégie de maintenance préventive.	
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 MAINTENANCE INDUSTRIELLE	4
1.2.1 Définitions	4
1.2.1.1 Définition (EN).....	4
1.2.1.2 Définition selon (DIN)	4
1.2.1.3 Définition selon (AFNOR)	4
1.2.2 Philosophie de maintenance	5
1.3 MAINTENANCE PREVENTIVE	6
1.3.1 Définition.....	6
1.3.2 Maintenance préventive systématique.....	6
1.3.2.1 Les travaux de maintenance préventive systématique	6
1.3.2.2 Plan de maintenance préventive systématique	7
1.3.2.3 Procédure de la maintenance préventive systématique	7
1.3.3 Maintenance préventive conditionnelle.....	8
1.3.3.1 Les travaux de maintenance préventive conditionnelle.....	8
1.3.3.2 Mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle.....	8
1.3.3.3 Techniques de la maintenance conditionnelle (prédictive)	9
1.3.4 Opération de maintenance préventive	9
1.4. RELATION CATEGORIE EQUIPEMENT ET OPTION DE MAINTENANCE	10
1.4.1. Equipement critique.....	10
1.4.2 Equipement essentiel	11
1.4.3 Equipement général	11
CHAPITRE 02: Optimisation en maintenance.	
2.1. INTRODUCTION	13
2.2 OPTIMISATION	13
2.2.1 Définition.....	13
2.2.2 Domaines d'application	13
2.2.3 Techniques d'optimisation	14
2.2.3.1 Programmation linéaire	14
2.2.3.2. Programmation non linéaire	14
2.2.3.3 Programmation dynamique	14

2.2.3.4 Principe maximal de Pontryaguine.....	14
2.2.3.5 Programmation en nombres mixtes.....	15
2.2.3.6 Théorie de la décision.....	15
2.2.3.7 Approches heuristiques	15
2.3 DOMAINES D'OPTIMISATION EN MAINTENANCE	16
2.3.1 Optimisation de la redondance	16
2.3.2 Optimisation de l'approvisionnement en pièces de rechange	16
2.3.2.1 Pièces de rechange pour une période.....	16
2.3.2.2 Fourniture à plusieurs étapes et à plusieurs niveaux d'unités de rechange	16
2.3.2.3. Fourniture de modules renouvelables et d'unités non réparables	16
2.3.3. Contrôle optimal des stocks de pièces de rechange.....	17
2.3.4. Maintenance optimale	18
2.3.5. diagnostic optimal	18
2.4 OPTIMISATION EN MAINTENANCE.....	19
2.4.1 problèmes mathématiques associés	19
2.5. PROBLEMES D'OPTIMISATION EN MAINTENANCE.....	21
CHAPITRE 03: Modélisation en maintenance industrielle.	
3.1 INTRODUCTION.....	25
3.2 MODELES POUR MAINTENANCE PREVENTIVE	25
3.2.1 Modèles déterministes	25
3.2.1.1 Mesures PM.....	25
3.2.1.2 Modèles PM	27
3.2.2 Modèle stochastique	31
3.2.2.1 PM Markov modèle.....	31
3.3 MODÈLE POUR MAINTENANCE CORRECTIVE	33
3.3.1 Modèle déterministe	33
3.3.1.1 Mesures de maintenance corrective.....	33
3.3.1.2 Modèles mathématique de maintenance corrective.....	34
CHAPITRE 04: Application sur optimisation de cout.	
4.1 INTRODUCTION.....	44
4.2 LA MODELISATION DU COUT DU SYSTEME.....	45
4.2.1 La représentation du système	45
4.2.2 Données de défaillance et de maintenance	46
4.2.3 La présentation de cout en fonction de temps pour chaque sous système.....	47
4.3 L'optimisation de cout	48

4.3.1 Optimisation a l'aide d'une dérivation simple	49
4.3.2 Optimisation avec la méthode du nombre d'or	50
4.3.3 Optimisation avec Programmation non linéaire	51
4.4 Conclusion.....	52
Conclusion générale	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	56
resumé	

**INTRODUCTION
GÉNÉRALE**

Dans le marché d'aujourd'hui, les compagnies doivent faire face à une concurrence féroce. Ces compagnies doivent alors restructurer leurs systèmes de production, imaginer des concepts de nouveaux produits et de production qui soient plus flexibles, intégrés, sûrs et propres et surtout maîtriser les coûts et les délais de production.

L'optimisation de la Maintenance Préventive est un processus d'amélioration de leur rendement et leur efficacité. Ce processus essaie d'équilibrer les exigences de la maintenance préventive (législatif, économique, technique,...etc.) et les ressources utilisés pour la réalisation de leur programme (main d'œuvre, pièces de rechange, articles de consommation, équipement,...etc.).

Le but d'optimisation de la maintenance préventive est de choisir la politique appropriée pour chaque équipement et l'identification de la périodicité de cette politique devrait être effectuée pour atteindre les objectifs concernant la sécurité, la fiabilité des équipements et la disponibilité du système. Quand une optimisation de la maintenance préventive est efficacement mise en œuvre les coûts globaux de cette dernière seront réduits.

L'organisation de ce mémoire suit une progression ordonnée. Il se compose en quatre chapitres : Dans le premier chapitre nous avons présenté des notions de généralités sur la maintenance. Dans le deuxième chapitre les méthodes d'Optimisation de la Maintenance préventive. Le troisième chapitre, consiste à la modélisation de la maintenance préventive. Le quatrième chapitre présente une application sur l'optimisation de coût .

Chapitre 01

**STRATEGIE
DE
MAINTENANCE PREVENTIVE**

1.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'évolution des processus de production industrielle et en particulier ceux qui intègrent des systèmes techniques automatisés, le concept de sûreté de fonctionnement (SDF) à un rôle important pour tendre vers le zéro panne. De ce fait, il est primordial de le prendre en considération à travers une démarche d'aide à la décision en matière de politique de maintenance orienté vers le management du risque. Dans ce chapitre sera abordé le " Pourquoi ?" de la maintenance préventive ainsi que les critères de décision qui peuvent être influencés par le choix d'une politique de maintenance.

1.2 MAINTENANCE INDUSTRIELLE

1.2.1 Définitions [1]

1.2.1.1 Définition (EN)

Selon la norme européenne, "La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à la maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise" (**EN 13306/2001**).

1.2.1.2 Définition selon (DIN)

L'institut allemand de normalisation DIN définit la maintenance comme "l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel" (**norme DIN 31051**).

1.2.1.3 Définition selon (AFNOR)

La définition selon AFNOR (Association Française de normalisation) de la maintenance industrielle est la suivante :

"Ensemble des actions permettant de **maintenir** ou de **rétablir** un bien dans un état spécifié, ou dans un état où il est en mesure d'assurer un service déterminé"(**NF X60-010**). Tel que :

- L'action de **MAINTENIR** induit la notion de **prévention** sur un système en fonctionnement.
- L'action de **RETABLIR** induit la notion de **correction** consécutive à une perte de fonction
- Selon la norme NF EN 13306 la maintenance est « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise »

1.2.2 Philosophie de maintenance[2]

Les différentes philosophies de maintenance employées par les différentes installations industrielles sont légèrement semblable, malgré la grande différence dans la nature de leurs opérations. Ces philosophies sont habituellement classées en quatre catégories (figure 1.1):

- **Corrective** ou maintenance de catastrophe,
- **Préventive systématique:** Maintenance à base de temps ou de délais,
- **Préventive conditionnelle (ou Prédicative) :** Maintenance à base de conditions,
- **Préventive Proactive :** maintenance de prévention (systématique + conditionnelle)

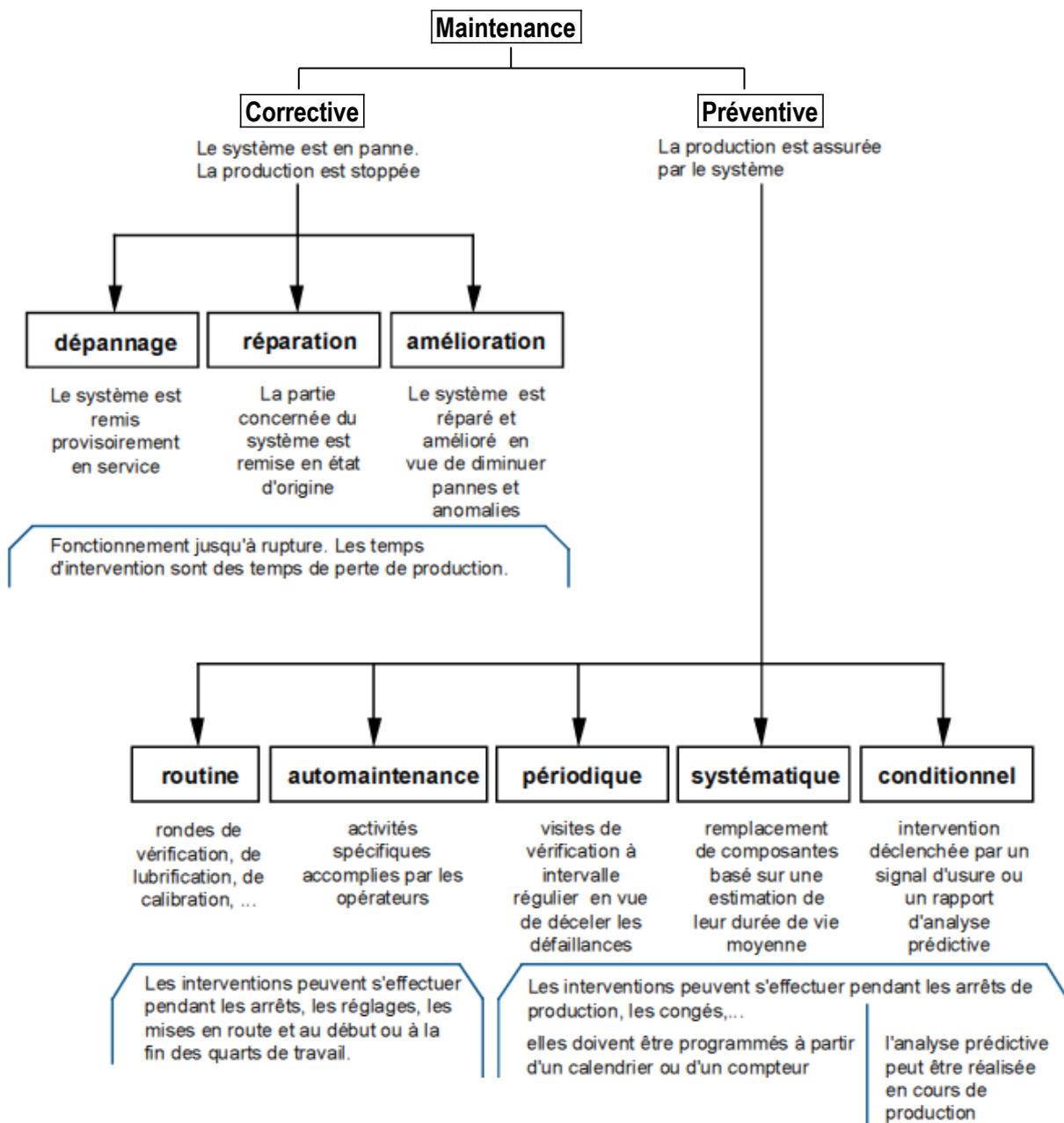


figure 1.1 : différents philosophies de la maintenance.

1.3 MAINTENANCE PREVENTIVE

1.3.1 Définition

La maintenance préventive correspond à la volonté de *prévoir la dégradation* du bien (matériel ou équipement), afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne. Dans ce type de maintenance, on n'attend pas que le matériel ou l'équipement tombe en panne. Elle est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la **probabilité de défaillance** d'un bien ou d'une dégradation d'un service rendu. Elle aussi comprend deux types :

- **Maintenance préventive systématique**
- **Maintenance préventive conditionnelle**

1.3.2 Maintenance préventive systématique

C'est une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps d'usage ou le nombre d'unités d'usage (la loi de dégradation doit être connue). Dans ce type de maintenance, les opérations de maintenance sont effectuées suivant un calendrier (journalier, hebdomadaire, mensuel) et concernant tous les produits consommables, tels que les huiles, les graisses, les liquides de coupe et les composants de faibles durées de vie par rapport aux machines. Ce type de maintenance demande de la rigueur pour être planifiée.

1.3.2.1 Les travaux de maintenance préventive systématique

Ce sont des opérations dont les modalités d'exécution est fixé à l'avance et qui sont exécutées à des moments prévus :

-à périodicité calendaire prévue

-à un nombre prédéterminé d'heures de fonctionnement

-l'établissement d'un plan de maintenance préventive systématique, ce qui permet une programmation facile des travaux (essentiellement lorsqu'il s'agit de périodicités calendaires). Les

actions préventives systématiques comprennent :

- le nettoyage
- la lubrification
- les inspections ou activités de surveillance du fonctionnement
- l'examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) d'un équipement, et pouvant impliquer des réglages ou des échanges d'éléments consommables
- les remplacements de pièces ou échanges standard.

1.3.3 Maintenance conditionnelle

Est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation du bien. Elle s'applique aux organes dont la dégradation peut être mise en évidence par des indicateurs. Cette forme moderne de maintenance permet d'assurer le suivi continu du matériel en service, dans le but de prévenir des défaillances attendues. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation, la décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent en approche d'un seuil de dégradation prédéterminé.

1.3.3.1 Les travaux de maintenance préventive conditionnelle

Ce sont des travaux qui sont déclenchés suite à des constats de dégradation du matériel, elles constituent un système d'alerte permettant d'agir avant la panne. Le système d'alerte est constitué par des données issues d'indications données par des capteurs installés sur le matériel. Le traitement et l'interprétation continue de ces données permettront de déclencher, en urgence ou de manière programmée, des travaux prédéterminés :

- Remplacement standard d'ensembles ou de pièces
- Révision partielle ou générale
- Réparations
- Modifications

1.3.3.2 Mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle

-partant du principe qu'une panne est le résultat d'une lente dégradation du matériel, l'idée retenue est de :

- suivre la condition du matériel au travers des mesures
- assurer un diagnostic permanent de son fonctionnement

-disposer d'un appareillage et d'une instrumentation de contrôle :

- appareils robustes acceptant l'environnement industriel
- appareils à étalonnage facile
- appareils devant définir le degré de la dégradation
- appareils couvrant si possible toute la gamme des défaillances possibles

-posséder un personnel qualifié :

- avoir des bases sur les méthodes de maintenance conditionnelle
- connaître le fonctionnement des appareils de contrôle
- connaître profondément la machine à vérifier
- avoir une bonne expérience de la maintenance et du dépannage.

1.3.3.3 Techniques de la maintenance conditionnelle (prédictive)

Il existe une multitude de techniques pour la maintenance prédictive, qui sont:

1. **Surveillance des vibrations**: C'est la technique la plus efficace pour détecter les défauts mécaniques dans les machines tournantes.
2. **Emission acoustiques**: Cette technique peut être utilisée pour la détection, la localisation ainsi que la surveillance continue de la fissuration des structures et des pipelines.
3. **Analyse des huiles**: Cette technique consiste à analyser les huiles d'une machine, pour suivre l'apparition des particules métalliques microscopiques, dont la présence donne des indications sur les conditions des éléments mobiles.
4. **Analyse des particules**: A cause des phénomènes de frottement, la plupart des composants et organes de machines libèrent des débris métalliques. L'analyse de ces particules fournit des informations vitales sur la détérioration et l'usure de ces composants.
5. **Surveillance de la corrosion**: Les mesures de l'épaisseur du métal par ultrason sont menées pour traquer l'usure par corrosion.
6. **Thermographie**: Cette technique permet de détecter les défauts thermiques et mécaniques pour analyser les équipements électriques et mécaniques.
7. **Suivi des performances**: C'est une technique efficace pour déterminer les problèmes opérationnels dans les équipements. L'efficacité des machines fournit un regard sur leurs conditions internes.

1.3.4 Opération de maintenance préventive

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

1°. Inspection

- C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie.
- Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies.
- Elle peut être effectuée sous forme de "rondes" et à pour but la détection de défaillances mineures :
 - défauts de lubrification (contrôles des niveaux)
 - défauts de pression, de températures, de vibrations.
 - détection visuelle de fuites, détection d'odeurs, de bruits anormaux.
 - dépannages simples : réglage de tension de courroie, échanges de lampes...

2°. Contrôle

C'est une activité qui consiste à la vérification de la conformité du bien par rapport à des données préétablies, suivie d'un jugement. L'activité de contrôle peut:

- Comporter une activité d'information,

- Inclure une décision (décision de non conformité, d'acceptation, d'ajournement);
- Déboucher sur des actions correctives

3°. Visite

C'est une activité consiste à faire un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite partielle ou limitée) des différents éléments d'un bien. Elle peut :

- Entraîner certains démontages;
- déclencher des opérations correctives des anomalies constatées;
- Impliquer des opérations de maintenance de 1^{er} niveau.

1.4. RELATION CATEGORIE EQUIPEMENT ET OPTION DE MAINTENANCE[3]

Les différentes philosophies ont leur propres avantages et inconvénients et elles sont mise en place après avoir mené une analyse critique sur les équipements installés. Habituellement l'analyse critique distingue trois catégories d'équipements:

- **Equipement critique**
- **Equipement essentiel**
- **Equipement général**

1.4.1. Equipement critique

Les équipements **critiques** sont généralement sélectionnés à la base des points suivants:

- Leurs défaillances affecte la sécurité de l'installation.
- Leur défaillance entrave le processus de production. Equipements indispensables à la transformation,
- Equipements à forte valeur ajoutée, leurs réparations sont longues et coûteuses. Train de machines inséparables et train de machines à grandes puissances.
- Equipements dont les opérations économise l'énergie ou améliore la production
- On installe à plein temps une instrumentation pour une surveillance continue des vibrations. Cette surveillance peut être simultanément multi-voies (ou multi-canaux) de telle sorte que l'évaluation de l'état du train de machine est possible.

Maintenance adoptée: **Maintenance proactive et prédictive appropriées.**

1.4.2 Equipement essentiel

Les équipements **essentiel** sont généralement sélectionnés à la base de ce qui suit:

- Leurs défaillances affecte la sécurité de l'installation

- Leur défaillance entrave le processus de production. Equipements indispensables à la transformation,
- Equipements de grandes puissances ou grandes vitesses mais sans service continu.
- Equipements demandant une maintenance à base de temps (maintenance préventive systématique)
- Ce type de machines requière une dépense, une expertise et un temps de réparation modéré.
- Les systèmes de surveillance des vibrations installés sur les équipements essentiels, peuvent être du type scanneur, où le système de surveillance passe d'un capteur à un autre afin d'en afficher les signaux de sortie un à un.

1.4.3 Equipement général

Les équipements **généraux** sont généralement sélectionnés à la base de ce qui suit:

- Leurs défaillances n'affecte pas la sécurité de l'installation.
- Ne sont pas critique pour la production.
- Equipements mis en marche à la demande.
- Equipement exigeant de faibles ou moyennes dépenses en terme d'expertise et le temps de réparation.
- Maintenance adoptée: Maintenance corrective avec surveillance à l'aide d'instruments portables. comme :
 1. vibromètre.
 2. sonomètre

Chapitre 02

**OPTIMISATION
EN
MAINTENANCE INDUSTRIELLE**

2.1. INTRODUCTION

Les approches de maintenance optimales visent à minimiser les temps d'arrêt tout en permettant l'utilisation la plus efficace des systèmes technique afin de garantir les résultats souhaités au moindre coût possible. Dans le contexte actuel d'ouverture des marchés, les entreprises doivent améliorer leur compétitivité et donc leur productivité. « Produire plus pour moins cher » c'est avoir une meilleure disponibilité des moyens de production et c'est-à-dire dépenser moins. Or la maintenance influe sur les deux facteurs : une maintenance mieux ciblée, c'est moins d'indisponibilité ; une maintenance mieux maîtrisée, c'est moins de dépenses. Les deux anciens concepts de la maintenance qui sont le fréquence des entretiens (dans ce cas, la fiabilité de l'équipement est directement proportionnelle à la fréquence de la maintenance), et le remplacement d'urgence (dans ce cas, il faut faire fonctionner l'équipement jusqu'à ce qu'il soit inopérable) peuvent ne pas être optimaux. De plus, les deux concepts entraînent une maintenance incorrecte, des pannes excessives et des coûts élevés. En raison de la complexité accrue des systèmes techniques, des exigences strictes de qualité et des coûts croissants des matériaux et de la main-d'œuvre, des techniques de maintenance appropriées ont été mises en avant. Ce chapitre est une revue de l'état de l'art de la littérature liée à l'optimisation des modèles de maintenance des systèmes sujets à défaillance.

2.2 OPTIMISATION

3.2.1 Définition [5]

L'optimisation est une branche des mathématiques appliquées qui vise la résolution analytique ou numérique des problèmes qui traite la recherche sur un domaine donné du minimum ou du maximum d'une certaine quantité, appelée fonction objectif. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, du bon choix des variables que l'on cherche à optimiser, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique.

2.2.2 Domaines d'application [5]

Les domaines d'application de l'optimisation sont vaste, elle est utilisée en:

- recherche opérationnelle (RO) (domaine à la frontière entre l'informatique, les mathématiques et l'économie), dans
- mathématiques appliquées (fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie),
- analyse mathématique
- analyse numérique,
- statistique pour: l'estimation du maximum de vraisemblance d'une distribution, la recherche de stratégies dans le cadre de la théorie des jeux, théorie du contrôle et de la commande.

2.2.3 Techniques d'optimisation [4][5][6][7]

Les techniques d'optimisation utilisées pour obtenir des politiques de maintenance optimales sont les suivantes :

2.2.3.1 Programmation linéaire

Une solution réalisable est une solution optimale s'il n'existe pas d'autres solutions réalisables qui fournissent une plus grande valeur de la fonction objectif. À noter que dans un problème possédant des solutions réalisables, il se peut que la valeur optimale de la fonction objectif soit infinie. Dans ce cas, on parle de solution optimale infinie.

2.2.3.2. Programmation non linéaire

L'optimisation non linéaire (en anglais : *nonlinear programming* – NLP) s'occupe principalement des problèmes d'optimisation dont les données, i.e., les fonctions et ensembles définissant ces problèmes, sont non linéaires, mais sont aussi différentiables autant de fois que nécessaire pour l'établissement des outils théoriques, comme les conditions d'optimalité, ou pour la bonne marche des algorithmes de résolution qui y sont introduits et analysés. Cette sous-discipline de l'optimisation, à la frontière mal définie et l'introduction un peu artificielle, a aussi son existence liée à la communauté de chercheurs qui se sont spécialisés sur ces sujets et au type de résultats qui ont pu être obtenus.

2.2.3.3 Programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation procédant par énumération implicite des solutions. Bien que déjà pratiquée auparavant, elle est élevée au rang de méthode générale de résolution avec les travaux de Bellman [BEL 54, BEL 57], qui formalise l'approche et la baptise. Cette approche permet de résoudre efficacement des problèmes de décision séquentiels. Plus généralement, elle consiste à aborder des problèmes d'optimisation avec une stratégie consistant en deux points essentiels : – décomposer le problème en une séquence de problèmes, – établir une relation de récurrence entre les solutions optimales des problèmes.

2.2.3.4 Principe maximal de Pontryaguine

Il est couramment utilisé dans de nombreux domaines pour calculer effectivement une solution d'un problème de contrôle optimal. Il permet d'écrire une condition d'optimalité pour un minimum du problème comme un système différentiel avec conditions aux limites. Ce dernier est souvent difficile à résoudre (c'est ce qu'on appelle faire la synthèse), mais il conduit également à des outils numériques pour le résoudre (méthode de tir).

2.2.3.5 Programmation en nombres mixtes

La programmation non linéaire à nombres entiers mixtes (MINLP) vise à trouver des solutions optimales aux modèles d'optimisation mathématique combinant des éléments discrets et non linéaires (continus). Les modèles de ce type apparaissent dans des applications importantes dans de nombreux domaines, notamment le génie chimique, l'énergie et les transports. De plus, les cadres bien développés pour une optimisation discrète et continue ne sont pas suffisants en eux-mêmes pour attaquer cette vaste classe de modèles.

La complexité mathématique sous-jacente n'est pas aussi bien comprise en raison de la combinaison de la façon dont les non-convexités résultent des éléments discrets et non linéaires. En particulier, il reste encore des défis théoriques, algorithmiques et informatiques à relever avant que MINLP puisse obtenir un succès similaire à celui de l'optimisation régulière ou de la programmation linéaire en nombres entiers. Ces défis de recherche, associés à un potentiel d'impact remarquable, font de MINLP la nouvelle frontière la plus excitante en matière d'optimisation mathématique. Le MINLP a attiré l'attention de toutes les grandes sociétés d'optimisation qui ont encouragé les travaux dans ce domaine. Le MINLP a également établi de nouveaux liens importants entre l'industrie et le monde universitaire.

2.2.3.6 Théorie de la décision

La théorie de la décision est une théorie de mathématiques appliquées ayant pour objet la prise de décision par une entité unique.

2.2.3.7 Approches heuristiques

L'approche heuristique est un algorithme d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des techniques de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution (d'une manière proche des algorithmes d'approximation).

Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents.

2.3 DOMAINES D'OPTIMISATION EN MAINTENANCE [8]

2.3.1 Optimisation de la redondance

Le terme redondance est appliqué à l'amélioration structurelle du système, aux pièces internes en double et aux pièces de rechange. La redondance est utilisée pour augmenter la fiabilité des systèmes techniques. En utilisant la redondance, il faut tenir compte non seulement des facteurs de fiabilité, mais aussi de la dépense totale de chaque ressource. La ressource cruciale est le coût de la plupart des systèmes techniques. Le poids est important pour les systèmes tels que les avions et les missiles, et la taille et le volume peuvent être pris en compte pour les systèmes tels que les trains et les navires. Cependant, dans la plupart des cas, il y a un seul facteur, généralement le coût monétaire.

2.3.2 Optimisation de l'approvisionnement en pièces de rechange

2.3.2.1 Pièces de rechange pour une période

Un système est souvent fourni avec des pièces de rechange d'une installation d'approvisionnement suffisamment proche pour que les pièces de rechange puissent être utilisées pour une réparation immédiate en cas de panne du système. Les unités de rechange elles-mêmes peuvent ne pas être réparables. Le stock s'épuise et doit être rempli de temps en temps. Le problème d'optimisation se pose lorsqu'on considère l'allocation optimale des différents types d'unités de rechange pour une période de temps donnée t . Le problème est très proche du problème de redondance optimale pour la redondance de secours sans renouvellement.

2.3.2.2 Fourniture à plusieurs étapes et à plusieurs niveaux d'unités de rechange

Pour l'optimisation du processus de fourniture à plusieurs étapes et à plusieurs niveaux d'unités de rechange, on utilise un modèle heuristique d'un système d'approvisionnement hiérarchique (HSS: Hierarchical Supply System) à plusieurs étapes et à plusieurs niveaux avec plusieurs unités de rechange différentes. Ce modèle est très utile pour l'analyse des systèmes techniques dispersés géographiquement. Ainsi, si on considère plusieurs systèmes techniques différents et si chacun d'eux dispose d'un entrepôt individuel d'unités de rechange pour les réparations en cours, alors chaque entrepôt peut être rempli selon un calendrier ou sur demande. La demande est basée sur l'état actuel de l'entrepôt. Il s'agit d'un problème de contrôle des stocks.

2.3.2.3. Fourniture de modules renouvelables et d'unités non réparables.

Dans ce cas, un système technique est fourni avec des modules de secours de différents types prêts à remplacer les modules défectueux. Les modules défectueux sont envoyés à un atelier de réparation.

L'atelier de réparation a besoin d'unités de rechange de réparation de différents types. Les unités elles-mêmes ne sont pas réparables et constituent le stock de l'atelier. La réparation des modules à l'atelier peut se poursuivre jusqu'à épuisement du stock d'unités de rechange. Le stock est destiné à une période de temps t .

Dans l'hypothèse d'une réparation complète; un module réparé est identique à un nouveau. Nous supposons également que tous les types de modules peuvent être réparés indépendamment. Ainsi, le système d'assistance à la maintenance (MSS: Maintenance Support System) se compose de modules de secours, de l'entrepôt et d'un stock d'unités de rechange nécessaires à la réparation des modules défectueux.

Le remplacement d'un module défaillant par un module de secours prend un temps limité. Habituellement, les temps de remplacement sont nettement plus courts que les temps de réparation et réduisent ainsi le temps d'inactivité. Un modèle de redondance de secours peut donc être utilisé pour un modèle mathématique grossier de substitution de module. Un système servi devient indisponible s'il échoue alors qu'il n'y a pas de modules de secours du type nécessaire car tous ont été envoyés à l'atelier et n'ont pas encore été renvoyés.

2.3.3. Contrôle optimal des stocks de pièces de rechange

Le principal sujet d'investigation dans le contrôle des stocks est **le nombre d'unités de rechange disponibles au moment t** . La valeur de ce nombre est appelée le "niveau" du stock. C'est un processus stochastique qui diminue lorsque des unités de rechange sont utilisées et augmente lorsqu'elles sont acquises. La dépense d'unités de rechange est déterminée par la défaillance du système. Certains paramètres du processus présentent un intérêt particulier. Il s'agit notamment de la distribution du temps d'épuisement du stock (ou de la probabilité de non interruption de l'approvisionnement en unités de rechange), de la distribution stationnaire du niveau de stock, du niveau moyen du stock et du taux de réapprovisionnement du stock.

Les politiques optimales de contrôle des stocks sont déterminées par un objectif sélectionné. Habituellement, cet objectif est l'atteinte du niveau souhaité d'un indice d'efficacité de la performance à un coût minimum. Alternativement, l'objectif peut atteindre le niveau d'indice le plus élevé possible avec des niveaux de coûts fixes. Ces facteurs forment des problèmes controversés qui sont difficiles à résoudre et souvent même pas clairement formulés.

2.3.4. Maintenance optimale

En fonctionnement, tous les équipements déperissent suite à des défaillances, une dégradation et un vieillissement. La surveillance et l'entretien sont nécessaires, et il y a des dépenses d'inspection, d'entretien préventif et de réparation. Les frais mènent au problème de l'entretien optimal.

Un plan d'entretien optimal comprend à la fois le type d'entretien et la période qui minimise les dépenses totales. Les dépenses totales peuvent inclure non seulement les coûts de maintenance, mais également les pertes du système dues au temps d'inactivité. Dans la plupart des modèles mathématiques, la maintenance et la réparation produisent un article qui sera considéré "comme neuf". Les principaux indicateurs de l'analyse de la maintenance sont :

- *le coefficient de disponibilité,*
- *le coefficient de disponibilité opérationnelle,*
- *le profit moyen du système par unité de temps (premier indicateur économique),*
- *le coût total moyen par unité de temps (deuxième indicateur économique),*

Le premier indicateur économique est très pratique lorsque les résultats du système et les dépenses d'entretien sont mesurés dans les mêmes unités de coût.

2.3.5. diagnostic optimal

Les problèmes de diagnostic technique, tels que la recherche des états de défaillance du système ou la recherche des unités défaillantes, peuvent être difficiles. Un système électronique est généralement considéré comme un objet représenté par des unités (ensemble) reliées les unes aux autres par des liens fonctionnels. Si toutes les unités sont considérées comme indépendantes. Si chaque unité a deux états possibles: opérabilité ou défaillance.

Donc si p_i est la probabilité d'un état opérationnel d'une *ième* unité, alors $q_i = 1 - p_i$ est la probabilité de l'état de défaillance de la *ième* unité. Le diagnostic du système est basé sur des tests, chaque test déterminant l'état d'un sous-ensemble d'unités. Le diagnostic procède deux principaux objectifs:

- Trouver si le système est en fonctionnement ou en défaillance
- Identifiez toutes les unités défaillante si le système est en défaillance.

2.4 OPTIMISATION EN MAINTENANCE[9]

2.4.1 problèmes mathématiques associés

Dans le cas d'un système réparable de manière plus ou moins complète, le problème est de trouver le degré optimal de sa réparation. Cependant, la prédiction de la date de défaillance ne suffit pas à décrire la qualité de fonctionnement du système [5]. Après la première défaillance, le fonctionnement est interrompu pendant la durée des réparations. Le système est alors indisponible. La notion de disponibilité ou d'indisponibilité est importante pour l'utilisateur. Elle traduit le fait, par exemple, que la production est arrêtée, que la machine ne peut démarrer, etc.

- À long terme, généralement, la disponibilité s'exprime sous la forme simple :

$$D = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad \text{ou bien} \quad D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Où:

MUT : Mean Up Time (temps moyen entre la fin d'une réparation et la panne suivante).

MDT : Mean Down Time (temps moyen d'une réparation)

MTBF : Mean Time Between Failure (temps moyen entre deux défaillances).

MTTR : Mean Time To Repair (temps moyen de réparation)

À court terme, les calculs de la disponibilité se compliquent assez vite et le choix d'approximations pertinentes dans un cadre assez général est un problème qui nécessite de nouvelles recherches. Une très grande fiabilité n'est pas suffisante pour que le système soit disponible à chaque fois qu'il est sollicité. Une machine fiable a de grandes chances de ne pas avoir de défaillances pendant longtemps mais si la réparation d'une panne est très longue (problème de pièces détachées par exemple) la machine restera longtemps indisponible et le gain en fiabilité risque d'être perdu.

Donc accroître la disponibilité devient un enjeu important, en particulier pour des équipements de production où l'indisponibilité fait chuter la productivité. Sachant que la maintenance est l'ensemble des actions permettant de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé, cette notion est liée aux coûts, à la productivité, à la qualité et à la fiabilité. On voit que les critères de choix sont multiples et contradictoires.

- réduire au maximum la durée de réparation en multipliant les équipes de maintenance,
- limiter au maximum le nombre de défaillances en multipliant les redondances,
- réduire le risque de défaillance en multipliant les inspections, etc.

Ces notions sont souvent synthétisées, en termes financiers, sous la forme de "coût global du produit". Ce dernier inclut à la fois les coûts de production, les coûts de fonctionnement mais aussi les coûts de maintenance (et même les coûts d'arrêt d'exploitation). Ici la notion de coût est à prendre au sens large.

Ainsi, une baisse de production a un coût qu'il est possible d'évaluer. La stratégie de la maintenance et la qualité des opérations de maintenance ont des répercussions directes sur la production et sur les charges financières. donc il faut Les choix de stratégie de maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de maintenance :

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance
- Elaborer et optimiser les gammes de maintenance
- Organiser les équipes de maintenance
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance
- Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables
- Etudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation
- ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité.

Intuitivement, on peut dire que meilleure est la maintenance, moins fréquentes seront les défaillances et moins élevés seront les coûts de réparations. Si on se limite à la maintenance préventive, on constate qu'il y a un grand nombre de choix de politiques de maintenance. Rien que pour un composant d'un produit, on peut décider de le changer au bout d'un certain temps d'utilisation du composant ou du produit, au bout d'un certain nombre de défaillances du produit, après la défaillance d'un autre élément, etc.

Cette diversité explique le nombre considérable de modèles développés entre 1970 et 2000. Les deux premiers ouvrages fondamentaux furent, à l'époque de la guerre froide, d'une part celui de **Barlow R.E. et Proschan F.** "*Mathematical Theory of Reliability*" et d'autre part celui de **Gnedenko B.V, Belyaev Yu.K. et Solovyev A.D.** "*Mathematical Methods in Reliability Theory*". On y trouve les premiers résultats mathématiques d'optimisation de la maintenance préventive. Ces résultats s'appuient sur la théorie des processus stochastiques, en particulier la théorie du renouvellement, des processus de markov, semi-markov, etc.

La théorie du renouvellement est l'exemple même de théorie mathématique qui s'est développée à partir des problèmes concrets de remplacement de machines. Ces théories étaient déjà bien développées à cette époque mais leur importance économique s'est accrue et l'optimisation de la maintenance de systèmes industriels est devenue une source supplémentaire de recherches en théorie des probabilités.

Étudier la maintenance préventive n'a de sens que si les résultats sont concrètement faciles à mettre en oeuvre. Cela dépend souvent des données statistiques disponibles. Or, dans le domaine industriel, les données sont la plupart du temps incomplètes ou même fortement censurées. Il est alors indispensable de mettre au point de nouvelles techniques statistiques pour les estimations de durées de vie ou des paramètres d'un processus stochastique.

Ces difficultés ouvrent le champ à de nombreuses recherches concernant l'estimation de paramètres, l'analyse bayésienne, l'estimation de taux de défaillance, dans des modèles à information complète ou incomplète, avec ou sans propriétés de vieillissement. Récemment, les travaux dans ce domaine se sont multipliés, tant dans le secteur public des universités ou des grands organismes que dans le secteur Recherche et Développement du privé. La théorie mathématique de l'optimisation de la maintenance préventive est devenue un thème de recherche dans de nombreux laboratoires, non seulement dans des écoles d'ingénieurs mais aussi dans des universités. Il serait trop long de tous les citer, et nous prendrions le risque d'en oublier.

2.5 PROBLEMES D'OPTIMISATION EN MAINTENANCE

Le tour d'horizon des problèmes d'optimisation de la maintenance que nous proposons ne peut se prétendre exhaustif. Il s'agit plutôt d'un circuit touristique au pays de la méthodologie de la maintenance.

- Les exposés 1,2,3 et 4 donnent des exemples de recherches théoriques récentes. Les deux premiers exposés sont le fruit des travaux de recherche du groupe de fiabilité de l'Université de Marne-la-Vallée (S. Bloch-Mercier, C. Coccozza-Thivent, M. Roussignol).
 - Les exposés 5.6 et 7 sont centrés sur l'aspect pratique de l'optimisation.
1. **Le premier exposé** décrit "*divers modèles stochastiques utilisés pour l'optimisation de la maintenance*". Il s'agit de présenter un modèle de maintenance suffisamment général pour englober de nombreux modèles usuels. Le système possède plusieurs niveaux de dégradation et prend en compte à la fois la maintenance préventive (inspections régulières) et la maintenance corrective (réparations non nécessairement instantanées). Le processus de dégradation est supposé dans un premier temps markovien, mais une généralisation au cas semi-markovien est proposée. En particulier les auteurs donnent des résultats asymptotiques d'optimisation pour les deux grands types de maintenance conditionnelle vus plus haut : maintenance conditionnelle à l'âge et maintenance conditionnelle à l'état. Dans certains cas, il est possible de calculer ou d'optimiser la disponibilité asymptotique ou le coût moyen asymptotique mais des exemples sont donnés pour lesquels ce problème reste ouvert.
 2. **Le deuxième exposé** intitulé "*Optimisation de la maintenance corrective d'un système réparable*" est dans le prolongement de cette présentation. Il s'agit de discuter l'opportunité d'un type de réparation en fonction des différents états d'un système. Comment le système doit-il redémarrer après la réparation ? Quels sont les composants prioritaires à réparer? etc. De nombreux résultats récemment publiés dans la thèse de S. Bloch-Mercier sont donnés. Ils sont illustrés par des exemples numériques.

3. **Le troisième exposé** donne un résultat d'optimisation pour "*la disponibilité de systèmes subissant des tests périodiques*". Quand on veut comparer des politiques de maintenance, on est conduit à comparer des variables aléatoires positives. C'est là qu'intervient la notion d'ordre stochastique utilisée dans d'autres domaines des probabilités. Pratiquement, se pose le problème de savoir si la modélisation par une loi exponentielle ou par toute autre loi raisonnable donne des résultats similaires. Il est montré, qu'à moyenne fixée, l'indisponibilité asymptotique est encadrée par les valeurs obtenues respectivement avec une loi de Dirac et celles obtenues avec une loi exponentielle. D'autres problèmes du même type sont abordés dans la thèse de J. Collet (EDF) à l'Université Paris-Sud.

4. **Le quatrième exposé** concerne les "*modèles à structure masquée utilisés en maintenance*". La qualité de la maintenance dépend de la qualité des indicateurs de fiabilité. Ceux-ci reposent sur les données de retour d'expériences. Or, dans la pratique, de nombreuses difficultés sont rencontrées dans l'analyse de ces données. C'est donc un point de vue plus statistique. G. Celeux montre, à partir de deux exemples concrets, quelques problèmes de maintenance qui surviennent lorsque les données de retour d'expériences sont trop peu informatives. Les modèles associés (modèles à structure cachée) peuvent être estimés par les modèles EM. Une annexe permet de se familiariser avec la méthode EM qui repose sur une estimation par maximum de vraisemblance. Mais une approche bayésienne est possible pour ces modèles. Une comparaison entre les deux approches est donnée dans un cadre plus général de situations à structure cachée.

5. **Le cinquième exposé:** Concerne la présentation d'un cas pratique d'estimation d'un paramètre clef de la maintenance, ce qui conduit à l'optimisation des intervalles inter-inspections de turboréacteurs civils .[10]. Dès la phase avant-projet d'un futur moteur civil, on doit faire une prévision des coûts de maintenance. En aéronautique, il s'agit essentiellement d'un modèle de maintenance selon l'état, la fréquence des visites en atelier dépendant de la température de sortie de turbine. Bien sûr aucun retour d'expérience n'est possible pour ce nouveau matériel. Comment modéliser ce paramètre à partir des informations disponibles ? Comment combiner jugements d'experts et certains éléments statistiques connus des constructeurs? C'est la connaissance de ces paramètres qui permettra de définir les temps de dépose de moteurs pour une flotte considérée.

6. **Le sixième exposé:** Il s'agit d'établir "*une politique de maintenance conditionnelle à temps continu pour un système qui se dégrade de manière aléatoire et continue*" du laboratoire de

Modélisation et Sûreté des Systèmes de l'Université de Troyes. Les inspections peuvent avoir lieu à n'importe quel instant et leur choix est fonction de l'état du système lors de l'inspection précédente. Elles permettent de connaître l'état exact du système aux dates de visites. Beaucoup d'inspections permettent certes un suivi efficace de la dégradation mais le coût en est élevé. Trop peu d'inspections ne permettent pas d'intervenir à temps pour empêcher la défaillance du système. Il s'agit d'une modélisation par un processus Gamma à temps continu et espace continu. Des techniques faisant appel aux processus régénératifs et semi-régénératifs sont utilisées pour évaluer un coût moyen sur un horizon fini et permettre de l'optimiser.

7. **Septième exposé:** Concerne "*l'analyse de fiabilité et de vieillissement d'une cage de développantes de l'alternateur principal d'une installation nucléaire*". Cet alternateur est une pièce critique à la fois pour la disponibilité de la tranche (et donc la production) mais aussi pour les coûts de maintenance qu'elle engendre. Les auteurs, T. Souchois, B. Villain et N. Richard, de la Direction Recherche et Développement d'Electricité de France, présentent d'abord le problème concret d'estimation de la durée de vie d'une cage de développantes sous l'effet de vibrations. Une démarche bayésienne est proposée pour valider ou améliorer la politique de maintenance actuelle. Un logiciel développé par EDF permet une estimation à partir de lois de Weibull usuelles pour les matériels avec usure.

Chapitre 03

MODÉLISATION
EN
MAINTENANCE INDUSTRIELLE

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre vise à faire un tour d'horizon rapide sur l'élaboration, l'évaluation et l'optimisation des politiques de maintenance. Une politique de maintenance a pour objectif de prévenir, éviter ou corriger les dysfonctionnements d'un système. Elle consiste à définir un ensemble de règles permettant de planifier les dates et la nature des actions de maintenance à exécuter. Le but étant à terme de déterminer une politique de maintenance capable d'optimiser le/les critère/s défini/s. Pour répondre à ce genre de problématique, il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation. Autrement dit, nous avons besoin d'utiliser la modélisation pour évaluer les performances et optimiser la maintenance. Nous devons donc construire un modèle capable de rendre compte de l'évolution de l'état d'un système soumis à une politique de maintenance spécifique. Un modèle de maintenance apparaît ainsi comme un véritable outil d'aide à la décision utilisé pour évaluer et comparer les performances des politiques de maintenance entre elles. Dans cette thèse, cet outil est également utilisé pour évaluer les différentes conceptions proposées pour un système donné.

3.2 MODELES POUR MAINTENANCE PREVENTIVE [11]

3.2.1 Modèles déterministes

3.2.1.1 Mesures PM

Trois mesures importantes de PM sont :

- Modèles MPMT : (Mean Preventive Maintenance Time) Temps moyen de maintenance préventive
- Modèle MDPMT: (Median Preventive Maintenance Time) temps médian de maintenance préventive
- Modèle MXPMT: (Maximum Preventive Maintenance Time) temps de maintenance préventive maximum.

Chaque mesure est décrite ci-dessous.

1° Temps moyen de maintenance préventive (MPMT)

MPMT est l'élément moyen /temps d'arrêt de l'équipement nécessaire pour effectuer une PM programmée. Ce temps n'inclut pas le temps PM consacré à l'équipement/élément pendant le fonctionnement ou temps d'arrêt administratif et logistique.

L'heure moyenne pour PM est définie par :

$$MPMT = \frac{\sum_{i=1}^m (MPMT_i \times f_i)}{\sum_{i=1}^m f_i} \quad (3.1)$$

alors que:

m = nombre total de points de données.

$MPMT_i$ = temps moyen ou moyen nécessaire pour effectuer i ème maintenance préventive action, pour $i=1,2,3,\dots,m$,

\mathcal{F}_i =fréquence de i ème action de maintenance préventive en actions par opération heure après ajustement pour le cycle de service de l'équipement.

2° temps médian de maintenance préventive (MDPMT)

C'est l'objet/ temps d'arrêt de l'équipement nécessaire pour réaliser 50% de toutes les actions de maintenance préventive planifiées sur l'article/temps d'arrêt de l'équipement nécessaire pour réaliser 50% de toutes les actions de maintenance préventive planifiées sur l'article. Pour les heures PM distribuées log-normales, le MDPMT est donné par :

$$MDPMT = \text{antilog} \left[\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \times \log MPMT_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \right] \tag{3.2}$$

que:

λ_i =taux de défaillance constant de l'élément i de l'article/équipement dont la maintenabilité doit être évaluée, ajusté pour des facteurs tels que le cycle de service, échecs de tolérance et d'interaction, et les pannes catastrophiques qui conduiront à la détérioration de l'article/la performance des équipements dans la mesure où une action de maintenance sera lancée,

Pour $i=1,2,3,\dots,m$,

3° temps maximum de maintenance préventive (MXPMT):

C'est l'article maximum/temps d'arrêt de l'équipement nécessaire pour accomplir un pourcentage donné de toutes les actions de maintenance préventive planifiées sur l'article/équipement à l'étude .Pour les heures PM distribuées log-normales ,le MXPMT est donné par :

$$MXPMT = \text{antilog} \left(\log MPMT_m + y \cdot S_{\log MPMT} \right) \tag{3.3}$$

Ou

Y= valeur du tableau de distribution normale correspondant à la valeur en pourcentage donnée à laquelle MXPMT est définie (e.g, $y = 1,283$ pour le 90 centile et $y = 1,645$ pour le 95e centile). \log

$MPMT_m$ est la moyenne des logarithmes de $MPMT_i$ est exprimé par :

$$\log MPMT_m = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \times \log MPMT_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \tag{3.4}$$

$$S_{\log MPMT} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m (\log MPMT_i)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^m \log MPMT_i\right)^2}{m}}{m-1} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

3.2.1.2 Modèles PM

Au fil des ans, de nombreux modèles mathématiques utiles liés aux PM ont été développés. Ce chapitre présente certains de ces modèles.

1°Modèle d'optimisation d'inspection I

Les inspections sont souvent perturbatrices, mais elles réduisent généralement les temps d'arrêt en raison d'un nombre moindre de pannes.

Ce modèle peut être utilisé pour obtenir le nombre optimal d'inspections par installation et par unité de temps. Le temps d'arrêt total de l'installation est défini par

$$TDT = yT_i + c \frac{T_b}{y} \quad (3.6)$$

où

TDT = temps d'arrêt total par unité de temps pour une installation,

c = une constante associée à une installation particulière ,

T_b = temps d'arrêt de l'installation par panne ou panne

T_i = temps d'arrêt de l'installation par inspection,

y = nombre d' inspections par installation et par unité de temps.

En différenciant (3.6) par rapport à y , on obtient

$$\frac{d(TDT)}{dy} = T_i - c \frac{T_b}{y^2} \quad (3.7)$$

En réglant (3.7) égal à zéro puis en réarrangeant, on obtient

$$\hat{y} = \sqrt{\frac{cT_b}{T_i}} \quad (3.8)$$

où

\hat{y} = nombre optimal d'inspections par installation et par unité de temps.

En remplaçant (3.8) vere (3.6) donné:

$$\hat{TDC} = 2\sqrt{cT_i T_b} \quad (3.9)$$

où

TDC = temps d'arrêt optimal total par unité de temps pour une installation

Fiabilité et temps moyen de défaillance détermination modèle d'un système avec une maintenance périodique

Ce modèle mathématique peut être utilisé pour calculer la fiabilité et le temps moyen de défaillance d'un système soumis à une maintenance périodique. Le modèle est soumis aux hypothèses suivantes:

- Une pièce défectueuse est remplacée par une nouvelle et statistiquement identique .
- périodique d' entretien est effectué sur le système après toutes les y heures, démarrage ment à temps zéro.

Pour la maintenance périodique, l'intervalle de temps de y heures s'écrit

$$y = iY + T \tag{3.10}$$

$i=0, 1, 2, \dots ; 0 < T < Y$

Pour $i = 1$ et $T = 0$, la fiabilité d'un système redondant soumis à une maintenance périodique toutes les Y heures est donnée par

$$R_Y (y = Y) = R(Y) \tag{3.11}$$

Pour $i = 2$ et $T = 0$, on a

$$R_Y (y = 2Y) = [R(Y)]^2 \tag{3.12}$$

Dans ce cas, le système doit fonctionner les Y premières heures sans subir de panne. De plus, pour un autre Y sans panne, après le remplacement de toute pièce défectueuse.

Pour $0 < T < Y$, T heures supplémentaires de fonctionnement sans panne du système sont nécessaires. Donc,

$$R_Y (y = 2Y + T) = [R(Y)]^2 R(T) \tag{3.13}$$

Sous forme générale . (3.13) est

$$R_Y (y = iY + T) = [R(Y)]^i R(T) \tag{3.14}$$

Pour $i = 0, 1, 2, 3, \dots ; 0 < T < Y$

Le temps moyen de défaillance du système redondant avec l'exécution de la maintenance périodique est donné par :

$$MTTF_{pm} = \int_0^{\infty} R_Y (y) dy \tag{3.15}$$

Pour évaluer . (3.15), nous écrivons l'intégrale sur la plage $0 < y < \infty$ comme suit:

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{iY}^{(i+1)Y} R_Y (y) dy \tag{3.16}$$

Dans (3.16), l'intégrale de l'équation (3.15) est divisée en intervalles de temps de longueur Y . Pour $y = iY + T$, en substituant l'équation (3.14) dans l'équation (3.16) nous obtenons

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^Y [R(Y)]^i R(T) dT \tag{3.17}$$

Dans (3.17) pour $y = iY + T$, $dy = dT$ et les limites deviennent 0 et Y . Ainsi, réorganiser (3.17) donne:

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^Y [R(Y)]^i R(T) dT \tag{3.18}$$

Puisque:

$$\sum_{i=0}^{\infty} [R(Y)]^i = \frac{1}{1 - R(Y)} \tag{3.19}$$

L'équation (3.18) devient

$$MTTF_{pm} = \frac{\int_0^Y R(T) dT}{1 - R(Y)} \tag{3.20}$$

2°Modèle d'optimisation d'inspection II

Ceci est similaire au modèle de fréquence d'inspection I. Il peut être utilisé pour déterminer la fréquence d'inspection optimale afin de minimiser le temps d'arrêt de l'équipement / installation par unité de temps. Dans ce modèle d'installation / équipement (par unité de temps), le temps d'arrêt total est le fonction de la fréquence d'inspection mathématiquement, il est défini comme suit :

$$TDT(n) = DT_r + DT_i = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{\theta} \tag{3.21}$$

Ou

$TDT(n)$ = temps d'arrêt total installation / équipement par unité de temps,

DT_i = temps d'arrêt des équipements / installations en raison d'une inspection par unité de temps,

DT_r = temps d'arrêt des équipements / installations en raison de réparations par unité de temps,

n = fréquence d'inspection ,

$\lambda (n)$ le= taux de défaillance des équipements / installations ,

μ = taux de réparation des équipements / installations ,

$1 / \theta$ = moyenne des temps d'inspection répartis de manière exponentielle .

En différenciant . (3.21) par rapport à n , on obtient

$$\frac{dT(n)}{dn} = \frac{d\lambda(n)}{dn} \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\theta} \quad (3.22)$$

Réglage . (3.22) égal à zéro et réarrangement des rendements

$$\frac{d\lambda(n)}{dn} = \frac{\mu}{\theta} \quad (3.23)$$

La valeur de n sera optimale lorsque les côtés gauche et droit de l'. (3.23) sont égaux. À ce stade, le temps d'arrêt total de l'équipement / de l'installation sera minimale.

3°Modèle d'optimisation d'inspection III

Il s'agit d'un modèle mathématique utile qui peut être utilisé pour calculer la fréquence d'inspection optimale afin de maximiser le profit.

Le modèle est développé en partant du principe que l'installation l'équipement en réparation conduit à une production nulle, donc moins de profit. En outre, si l'équipement est inspecté trop souvent, il y a un risque qu'il soit plus coûteux en raison de facteurs tels que la perte de production, le coût des matériaux et les salaires que les pertes dues aux pannes. Les hypothèses suivantes sont associées à ce modèle :

- L'équipement défaillance taux est une fonction des inspections.
- Les délais d'inspection sont répartis de manière exponentielle.
- Les taux de panne et de réparation de l'équipement sont constants.

Les symboles suivants ont été utilisés pour développer les équations du modèle :

n = nombre d'inspections effectuées par unité de temps,

$1 / \theta$ = moyennedes temps d'inspection répartis de manière exponentielle ,

p = profit sans perte de temps d'arrêt ,

C_i = coût moyen d'inspection par unité de temps ininterrompue,

C_r =coût moyen de réparation par unité de temps ininterrompue

λ = Taux de défaillance des équipements,

μ = Taux de réparation de l'équipement.

Le profit par unité de temps est exprimé par:

$$\begin{aligned} PR &= p - PL_i - PL_r - IC - RC \\ &= p - \frac{pn}{\theta} - \frac{p\lambda(n)}{\mu} - \frac{nc_i}{\theta} - \frac{C_r\lambda(n)}{\mu} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Ou

PL_i = perte de valeur de sortie de production par unité de temps due aux inspections,

PL_r = perte de valeur de sortie de production par unité de temps due aux réparations,

IC = coût d'inspection par unité de temps,

RC = coût de réparation par unité de temps.

En différenciant (3.24) par rapport à n puis en l'assimilant à un rendement nul

$$\frac{dPR}{dn} = -\frac{p}{\theta} - \frac{p}{\mu} \frac{d\lambda(n)}{dn} - \frac{C_i}{\theta} - \frac{C_s}{\mu} \frac{d\lambda(n)}{dn} = 0 \quad (3.25)$$

Réorganiser l'. (3.25), on obtient

$$\frac{d\lambda(n)}{dn} = -\left[\frac{1}{\theta} (p + C_i)\right] / \left(\frac{p}{\mu} + \frac{C_s}{\mu}\right) \quad (3.26)$$

La valeur de n sera optimale lorsque les côtés gauche et droit de l'. (3.26) sont égaux. À ce stade, le profit sera à sa valeur maximale.

3.2.2 Modèle stochastique

3.2.2.1 PM Markov modèle

Ce mathématique modèle représente un système qui peut soit échouer complètement ou subir PM périodique. Le système défaillant est réparé. Le diagramme de transition du système est illustré à la [Figure. 3.1](#). Le modèle est utile pour prédire la disponibilité du système, la probabilité de panne du système pour PM et la probabilité de défaillance du système. Les hypothèses suivantes sont associées au modèle:

- Système PM, échec, et la réparation des taux sont constants.
- Après la réparation ou PM le système est aussi bon que nouveau.

Les symboles suivants ont été utilisés pour développer les équations du modèle:

j = le j ème état du système,

$j = 0$ (système fonctionnant normalement),

$j = 1$ (système défaillant),

$j = p$ (système arrêté pour PM),

$P_j(t)$ = probabilité que le système soit dans l'état j au temps t , pour $j = 0, 1, p$,

λ = Taux de défaillance du système

μ = Taux de réparation du système

λ_p = Taux de descente du système pour PM,

μ_p = Taux de performance du système PM.

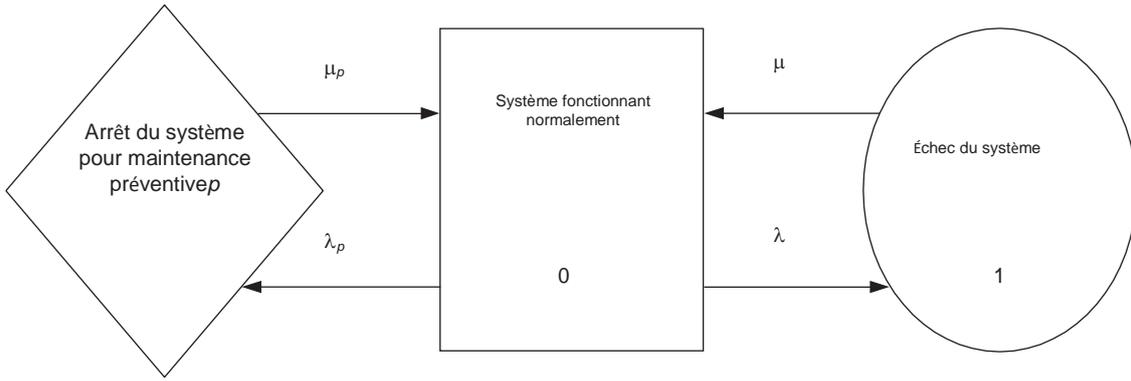


Figure 3.1 Diagramme de transition du système.

En utilisant la méthode de Markov, nous écrivons les équations suivantes pour la figure 3.1 :

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_p) P_0(t) = \mu P_1(t) + \mu_p P_p(t) \quad (3.27)$$

$$\frac{dP_p(t)}{dt} + \mu_p P_p(t) = \lambda_p P_0(t) \quad (3.28)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu P_1(t) = \lambda P_0(t) \quad (3.29)$$

Au temps $t = 0$, $P_0(0) = 1$ et $P_p(0) = P_1(0) = 0$.

Résolution des équations. (3.27) - (3.29), on obtient

$$P_0(t) = \frac{\mu_p \mu}{m_1 m_2} + \left[\frac{(m_1 + \mu_p)(m_1 + \mu)}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_p)(m_2 + \mu)}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (3.40)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda \mu_p}{m_1 m_2} + \left[\frac{\lambda m_1 + \lambda \mu_e}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(\mu_e + m_2)\lambda}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (3.41)$$

$$P_p(t) = \frac{\lambda_p \mu}{m_1 m_2} + \left[\frac{\lambda_p m_1 + \lambda_p \mu}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(\mu + m_2)\lambda_p}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (3.42)$$

où

$$m_1, m_2 = \frac{-B \pm [B^2 - 4(\mu_p \mu + \lambda \mu_p + \lambda_p \mu)]^{1/2}}{2} \quad (3.43)$$

$$B \equiv (\mu + \mu_p + \lambda + \lambda_p) \quad (3.44)$$

$$m_1 + m_2 = -B \quad (3.45)$$

$$m_1 m_2 = \mu_p \mu + \lambda_p \mu + \lambda \mu_p \quad (3.46)$$

La probabilité de défaillance du système est donnée par l'. (3.41), la probabilité d'un système vers le bas pour les PM par l'équation. (3.42), et la disponibilité du système par . (3.40). Lorsque le

temps t devient grand dans (3.40), nous obtenons l'expression suivante pour la disponibilité en régime permanent du système:

$$AV_{ss} = \frac{\mu\mu_p}{\mu_p\mu + \lambda_p\mu + \lambda\mu_p} \quad (3.47)$$

3.3 MODÈLE POUR MAINTENANCE CORRECTIVE

3.3.1 Modèle déterministe

3.3.1.1 Mesures de maintenance corrective

Il existe différentes mesures associées à la maintenance corrective. Cette section présente trois de ces mesures.

1° Temps de maintenance corrective moyen

Ceci est défini par :

$$T_{\max} = \frac{\sum \lambda_j T_{cm}}{\sum \lambda_j} \quad (3.48)$$

où

T_{mam} = temps moyen de maintenance corrective,

T_{cm} = temps de maintenance corrective du i ème équipement / élément système,

λ_j = échec taux de la i ème équipement / système élément.

L'expérience passée indique que les distributions de probabilités des temps de maintenance corrective suivent exponentielle, normale et log-normale. Par exemple, dans le cas d'un équipement électronique avec une bonne capacité de test intégrée et un concept de maintenance rapide à retirer et à remplacer, on suppose souvent une distribution exponentielle. Dans le cas de matériel mécanique ou électromécanique, généralement avec un concept de maintenance à retirer et à remplacer, la distribution normale est souvent applicable. Normalement, la distribution log - normale s'applique aux équipements électroniques qui ne possèdent pas de capacité de test intégrée.

2° Temps de maintenance corrective Active moyen

Cela fournit normalement le meilleur emplacement moyen des données d'échantillon et correspond au 50ème de toutes les valeurs du temps de réparation. On peut dire que la médiane de correction d'entretien du temps est une mesure de la durée au sein dont 50% de tous les correctifs de maintenance peut être accompli. Le calcul de cette mesure dépend de la distribution représentant les temps de maintenance corrective. Par conséquent, la médiane de la log normale

les temps de maintenance corrective répartis sont donnés par

$$T_{\text{med}} = \text{antilog}\left(\frac{\sum \lambda_j \log T_{\text{cmj}}}{\sum \lambda_j}\right) \quad (3.49)$$

ou

T_{med} temps= médian de maintenance corrective active.

3° Temps maximum de maintenance corrective moyen

Il mesure le temps nécessaire pour accomplir toutes les actions de maintenance corrective potentiels jusqu'à à un donné pourcentage, souvent la 90e ou 95e percentiles. Par exemple, dans le cas du **90 éme** centile, le temps maximal de maintenance corrective est le temps pendant luel 90% de toutes les actions de maintenance peuvent être accomplies. La répartition des temps de maintenance corrective dicte le calcul du temps maximum de maintenance corrective. Dans le cas des temps de maintenance corrective distribution log - normale, la maximale actif corrective d'entretien du temps est donnée par:

$$T_{\text{cmax}} = \text{antilog}(T_{\text{ma}} + z\sigma_{\text{cm}}) \quad (3.50)$$

où

T_{cmax} temps= maximal de maintenance corrective active,

T_{ma} = moyenne des logarithmes de T_{cm} ,

σ_{cm} = écart type des logarithmes des temps de maintenance corrective de l'échantillon,

z = valeur de l'écart type correspondant à la valeur du centile spécifiée pour T_{max}

La valeur de σ_{cm} peut être calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\sigma_{\text{cm}} = \left[\frac{\sum_{j=1}^M (\log T_{\text{cmj}})^2 - \left(\frac{\sum_{j=1}^M \log T_{\text{cmj}}}{M} \right)^2}{M-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.51)$$

Ou

M = nombre total de temps de maintenance corrective.

3.3.1.2 Modèles mathématique de maintenance corrective

Aufil des années, une grande quantité de littérature a étépubliéui concerne directement ou indirectement la maintenance corrective. Cette section présente un certain nombre de modèles mathématiques tirés de la littérature publiée. Ces modèles prennent en compte la défaill ancede l'article et les tauxde maintenance corrective, et peuvent être utilisés pour prédire l'article / le système

probabilité d'être en panne (c.-à-d. en cours de réparation), disponibilité, temps moyen avant la panne, etc.

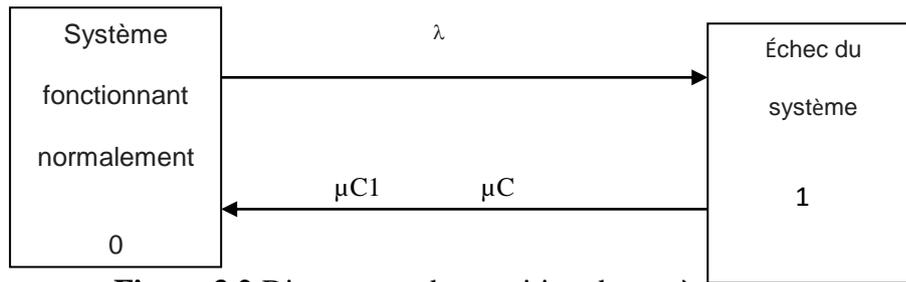


Figure 3.2: Diagramme de transition du système.

1° Modèle I

Ce modèle mathématique représente un système qui peut être à l'état haut (en fonctionnement) ou en panne (en panne).une maintenance corrective est effectuée sur le système défaillant pour le remettre en état de fonctionnement. Le diagramme de l'espace d'état du système est illustré à la Fig. 3.2 .

Les équations pour le modèle sont soumises à des suivantes hypothèses :

- Les taux de défaillance et de maintenance corrective sont constants.
- Le réparé système est aussi bon que nouveau.
- Les pannes système sont statistiquement indépendantes.

Les symboles suivants sont utilisés pour développer des équations pour le modèle:

i = le i ème état du système ,

$i = 0$ (système fonctionnant normalement),

$i = 1$ (système défaillant);

$P_i(t)$ = probabilité que le système soit dans l'état i au temps t ;

λ = taux de défaillance du système ;

μ_c = taux de maintenance corrective du système .

En utilisant l'approche de Markov , nous écrivons les deux équations suivantes pour le diagramme de la figure 3.2

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + \lambda P_0(t) = \mu_c P_1(t) \tag{3.52}$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu_c P_1(t) = \lambda P_0(t) \tag{3.53}$$

Au temps $t = 0$, $P_0(0) = 1$ et $P_1(t) = 0$.

En résolvant les équations. (3.52) et (3.53), on obtient

$$P_0(t) = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \tag{3.54}$$

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu_c} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \tag{3.55}$$

La disponibilité du système est donnée par :

$$A_s(t) = P_0(t) = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \quad (3.56)$$

Où

$A_s(t)$ = disponibilité du système au temps t .

Lorsque t devient très grand, (3.56) se réduit à

$$A_s = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} \quad (3.57)$$

Où

A_s = système disponibilité à l'état stable.

Puisque $\lambda = 1 / \text{MTTF}$ et $\mu_c = 1 / T_{\text{mom}}$, (3.57) devient

$$A_s = \frac{\text{MTTF}}{T_{\text{mom}} + \text{MTTF}} \quad (3.58)$$

Où

MTTF = temps moyen avant l'échec.

2°Modèle II

Ce modèle mathématique représente un système qui peut fonctionner normalement ou tomber en panne dans deux modes de défaillance mutuellement exclusifs (c'est-à-dire, les modes de défaillance I et II). Un exemple typique de ce type de système ou de dispositif est une vanne de débit de fluide (c'est-à-dire, modes de défaillance ouvert et fermé). La maintenance corrective est effectuée à partir de l'un ou l'autre des modes de défaillance du système pour le remettre dans son état opérationnel.

Le diagramme de transition du système est illustré à la **Fig. 3.3** Les hypothèses suivantes sont associées à ce modèle:

- Le système peut échouer dans deux modes de défaillance mutuellement exclusifs .
- Le réparé système est aussi bon que nouveau.
- Toutes les pannes du système sont statistiquement indépendantes.
- Les taux de défaillance et de maintenance corrective sont constants.

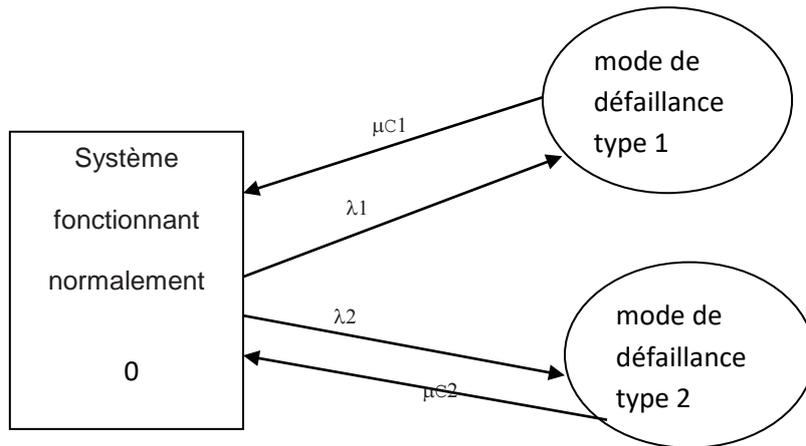


Figure 3.3 : Diagramme de transition du système.

Les symboles suivants sont associés au modèle:

$i =$ la i ème système état, $i = 0$ (système d'exploitation normalement), $i = 1$ (système a échoué en panne en mode de type I), $i = 2$ (système a échoué en panne en mode de type II),

$P_i(t)$ = probabilité que le système soit dans l'état i au temps t , pour $i = 0, 1, 2$,

λ_i = taux de défaillance du système de l'état 0 à l'état i , pour $i = 1, 2$,

μ_{Ci} = taux de maintenance corrective du système de l'état i à l'état 0, pour $i = 1, 2$.

Pour le modèle I, nous écrivons les équations suivantes pour le diagramme de la [figure 3.3](#)

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) = \mu_{C1}P_1(t) + \mu_{C2}P_2(t) \quad (3.59)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu_{C1}P_1(t) = \lambda_1P_0(t) \quad (3.60)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + \mu_{C2}P_2(t) = \lambda_2P_0(t) \quad (3.60)$$

Au temps $t = 0$, $P_0(0) = 1$ et $P_1(0) = P_2(0) = 0$.

En résolvant les équations. (3.59) - (3.60), on obtient

$$P_0(t) = \frac{\mu_{C1}\mu_{C2}}{m_1m_2} + \left[\frac{(m_1 + \mu_{C1})(m_1 + \mu_{C2})}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{-1t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_{C1})(m_2 + \mu_{C2})}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2t} \quad (3.61)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda_1\mu_{C2}}{m_1m_2} + \left[\frac{\lambda_1m_1 + \lambda_1\mu_{C2}}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1t} - \left[\frac{(\mu_{C1} + m_2)\lambda_1}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2t} \quad (3.62)$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2\mu_{C1}}{m_1m_2} + \left[\frac{\lambda_2m_1 + \lambda_2\mu_{C1}}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1t} - \left[\frac{(\mu_{C1} + m_2)\lambda_2}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2x} \quad (3.63)$$

Où

$$m_1, m_2 = \frac{-A \pm (A^2 - 4B)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (3.64)$$

$$A = \mu_{C1} + \mu_{C2} + \lambda_1 + \lambda_2 \quad (3.65)$$

$$B = \mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C2} + \lambda_2 \quad (3.66)$$

$$m_1 m_2 = \mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C2} + \lambda_2\mu_{C1} \quad (3.67)$$

$$m_1 + m_2 = -(\mu_{C1} + \mu_{C2} + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.68)$$

La disponibilité du système, $A_S(t)$, est donnée par:

$$A_S(t) = P_0(t) \quad (3.69)$$

Lorsque le temps t devient très grand, à partir des équations. (3.61) et (3.69) nous obtenons l'expression suivante pour la disponibilité en régime permanent du système :

$$A_S = \frac{\mu_{C1}\mu_{C2}}{m_1 m_2} = \frac{\mu_{C1}\mu_{C2}}{\mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C2} + \lambda_2\mu_{C1}} \quad (3.70)$$

3° Modèle III

Ce modèle mathématique représente un système qui peut soit fonctionner normalement, soit fonctionner en mode de dégradation, soit tomber complètement en panne. Un exemple de ce type de système pourrait être un générateur d'électricité, c'est-à-dire produisant de l'électricité à pleine capacité, déclassant la capacité ou pas du tout. La maintenance corrective est lancée à partir de la dégradation et des modes complètement défaillants du système pour réparer les pièces défaillantes. Le diagramme de l'espace d'état du système est illustré à

la [Figure. 3.4](#). Le modèle est soumis à des suivantes hypothèses:

- Les taux de défaillance complète du système, de défaillance partielle et de maintenance corrective sont constants.
- Le système d'exploitation peut échouer totalement ou partiellement. Le système partiellement opérationnel peut cesser complètement de fonctionner.
- Toutes les pannes du système sont statistiquement indépendantes.
- Le réparé système est aussi bon que nouveau.

Les symboles suivants sont associés au modèle:

i = le i ème état du système, $i = 0$ (système fonctionnant normalement), $i = 1$ (système fonctionnant dans son mode de dégradation), $i = 2$ (système en panne),

$P_i(t)$ = probabilité que le système soit dans l'état i au temps t , pour $i = 0, 1, 2$,

λ_i = taux de défaillance du système, $i = 1$ (de l'état 0 à l'état 1), $i = 2$ (de l'état 0 à l'état 2), $i = 3$ (de l'état 1 à l'état 2),

μ_{C_i} = taux de maintenance corrective du système, $i = 1$ (de l'état 1 à l'état 0), $i = 2$

(de l'état 2 à l'état 0), $i = 3$ (de l'état 2 à l'état 1).

Pour les modèles I et II, nous écrivons les équations suivantes pour la [figure 3.4](#) Diagramme:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) = \mu_{C1}P_1(t) + \mu_{C2}P_2(t) \quad (3.71)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\mu_{C1} + \lambda_3)P_1(t) = \mu_{C3}P_2(t) + \lambda_1P_0(t) \quad (3.72)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + (\mu_{C2} + \mu_{C3})P_2(t) = \lambda_3P_1(t) + \lambda_2P_0(t) \quad (3.73)$$

Au temps $t = 0$, $P_0(0) = 1$ et $P_1(0) = P_2(0) = 0$. En résolvant les équations. (3.71) - (3.73), on obtient

$$P_0(t) = \frac{(\mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_3\mu_{C2} + \mu_{C1}\mu_{C3})}{K_1K_2} + \left[\frac{\mu_{C1}K_1 + \mu_{C2}K_2 + \mu_{C3}K_1 + K_1\lambda_3 + K_1^2 + \mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_3\mu_{C2} + \mu_{C1}\mu_{C3}}{Y} \right] e^{K_1t} + \left\{ 1 - \left(\frac{\mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_3\mu_{C2} + \mu_{C1}\mu_{C3}}{K_1K_2} \right) - \left[\frac{\mu_{C1}K_1 + \mu_{C2}K_1 + \mu_{C3}K_1 + K_1\lambda_3 + K_2^2 + \mu_{C1}\mu_{C2} + \lambda_3\mu_{C2} + \mu_{C1}\mu_{C3}}{Y} \right] \right\} e^{K_2t} \quad (3.74)$$

Où

$$Y = K_1(K_1 - K_2)$$

$$P_1(t) = \left(\frac{\lambda_1\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C3} + \lambda_2\mu_{C3}}{K_1K_2} \right) + \left[\frac{K_1\lambda_1 + \lambda_1\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C3} + \lambda_2\mu_{C3}}{Y} \right] e^{K_1t} - \left[\frac{\lambda_1\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C3} + \lambda_2\mu_{C3}}{K_1K_2} + \frac{K_1\lambda_1 + \lambda_1\mu_{C2} + \lambda_1\mu_{C3} + \lambda_2\mu_{C3}}{Y} \right] e^{K_2t} \quad (3.75)$$

$$P_2(t) = \left(\frac{\lambda_1\lambda_3 + \mu_{C1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{K_1K_2} \right) + \left[\frac{K_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\mu_{C1} + \lambda_2\lambda_3}{Y} \right] e^{K_1t} - \left[\frac{\lambda_1\lambda_3 + \mu_{C1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{K_1K_2} + \frac{\lambda_2K_1 + \lambda_1\lambda_3 + \mu_{C1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{Y} \right] e^{K_2t} \quad (3.76)$$

Où

$$K_1, K_2 = \frac{-D \pm (D^2 - 4F)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (3.77)$$

$$D = \mu_{C1} + \mu_{C2} + \mu_{C3} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (3.78)$$

$$F = K_1 K_2 = \mu_{C1} \mu_{C2} + \lambda_3 \mu_{C2} + \mu_{C1} \mu_{C3} + \mu_{C2} \lambda_1 + \lambda_1 \mu_{C3} + \lambda_1 \lambda_3 + \mu_{C1} \lambda_2 + \lambda_2 \mu_{C3} + \lambda_2 \lambda_3 \tag{3.79}$$

La disponibilité totale / partielle du système, est donnée par:

$$A_{sf/p}(t) = P_0(t) + P_t(t) \tag{3.80}$$

Lorsque t devient grand, (3.80) se réduit à

$$A_{sf/p} = \frac{\mu_{C1} \mu_{C2} + \lambda_3 \mu_{C2} + \mu_{C1} \mu_{C3} + \lambda_1 \mu_{C2} + \lambda_1 \mu_{C3} + \lambda_2 \mu_{C3}}{K_1 K_2} \tag{3.81}$$

où

$A_{sf/p}$ = disponibilité totale / partielle du système en régime permanent.

De même, la disponibilité totale du système en régime permanent est

$$A_{St} = P_0 = \frac{\mu_{C1} \mu_{C2} + \lambda_3 \mu_{C2} + \mu_{C1} \mu_{C3}}{K_1 K_2} \tag{3.82}$$

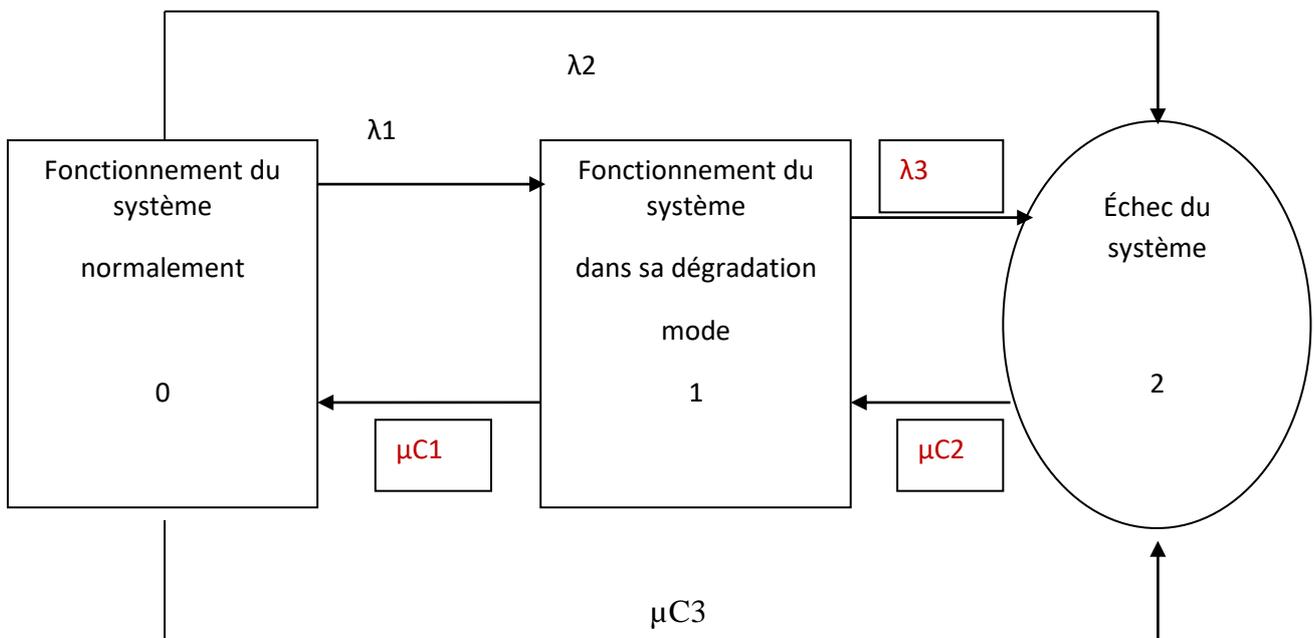


FIGURE 3.4: Diagramme de transition du système.

4°Modèle IV

Ce modèle mathématique représente un système redondant (parallèle) à deux unités identiques. Au moins une unité doit fonctionner normalement pour que le système réussisse. La maintenance corrective pour le remettre dans son état de fonctionnement commence dès qu'une des unités tombe en panne. Le diagramme de l'espace d'état du système est illustré à la **Figure 3.5**

Les hypothèses suivantes sont associées au modèle:

- Le système est composé de deux unités indépendantes et identiques.
- La réparation unité est aussi bonne que nouvelle.
- Aucune maintenance corrective n'est effectuée sur le système défaillant (c'est-à-dire lorsque les deux unités tombent en panne).
- Les taux de défaillance de l'unité et de maintenance corrective sont constants.

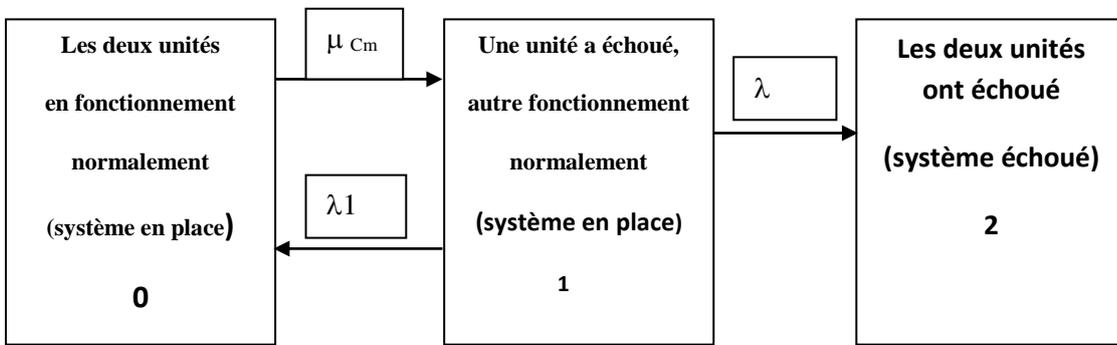


Figure 3.5 Diagramme de transition de système redondant à deux unités identiques.

Les symboles suivants se rapportent au modèle:

$i =$ le i ème état du système, $i = 0$ (les deux unités fonctionnent normalement), $i = 1$ (une unité est en panne, l'autre fonctionne), $i = 2$ (les deux unités sont en panne),

$P_i(t)$ = probabilité que le système soit dans l'état i au temps t , pour $i = 0, 1, 2$,

λ = taux de défaillance de l'unité,

μ_{Cm} = taux de maintenance corrective de l'unité.

Pour les modèles I, II et III, nous écrivons les équations suivantes pour le diagramme de transition de la **figure 3.5**

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + 2\lambda P_0(t) = \mu_{Cm} P_1(t) \tag{3.84}$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\mu_{Cm} + \lambda) P_1(t) = 2\lambda P_0(t) \tag{3.85}$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) \tag{3.86}$$

Au temps $t = 0$, $P_0(0) = 1$ et $P_1(0) = P_2(0) = 0$. Résolution des équations. (3.84) - (3.86), on

obtient

$$P_0(t) = \left[\frac{\lambda + \mu + C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{\lambda + \mu + C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.87)$$

$$P_1(t) = \left[\frac{2\lambda}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{2\lambda}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.88)$$

$$P_2(t) = 1 + \left[\frac{C_2}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.89)$$

Où

$$C_1, C_2 = \frac{[-(3\lambda + \mu) \pm (3\lambda + \mu)^2 - 8\lambda^2]^{1/2}}{2} \quad (3.90)$$

$$C_1 C_2 = 2\lambda^2 \quad (3.91)$$

$$C_1 + C_2 = -(3\lambda + \mu) \quad (3.92)$$

La fiabilité du système est donnée par

$$R_S(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (3.93)$$

Où

$R_S(t)$ = fiabilité du système redondant au temps t .

Le temps moyen avant défaillance du système (MTTFS) est donné par

$$\text{MTTFS} = \int_0^\infty R_S(t) dt = \frac{3\lambda + \mu C_m}{2\lambda^2} \quad (3.94)$$

Puisque $\lambda = 1/\text{MTTF}_u$ et $\mu C_m = 1/\text{MCMT}$

$$\text{MTTFS} = \frac{\text{MTTF}_u}{2\text{MCMT}} (3\text{MCMT} + \text{MTTF}_\omega) \quad (3.95)$$

Où

MTTF_u = temps moyen de l'unité avant la défaillance,

MCMT = temps moyen de maintenance corrective de l'unité

Chapitre 04

**APPLICATION : MINIMISATION DU COÛT /TEMPS
DE MAINTENANCE PREVENTIVE**

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre ,nous avons proposé une politique de maintenance préventive pour les équipements de manutention du Terminal à Conteneurs de Bejaia (BMT). Nous avons adopté la politique de maintenance préventive périodique imparfaite, avec réparation minimale à la défaillance. Le modèle utilisé est basé sur les processus stochastiques afin de tenir compte de l'efficacité de la maintenance, ce qui permet d'obtenir la nouvelle intensité de défaillance après chaque action de maintenance préventive. Le problème est formulé sous forme d'un programme mathématique non linéaire sans contraintes, la fonction objective, à minimiser, représente l'espérance du coût total de maintenance par unité de temps.

La thématique concerne l'optimisation de la MP et s'intéresse à la réduction des coûts qu'elle engendre, tout en prenant en compte des contraintes de disponibilité. A noter que cette dernière est également liée au problème de réduction des risques (fiabilité) qui peut également être une contrainte dans le problème posé. Cela concerne l'organisation de la maintenance (ressources et stratégies), la fiabilité des systèmes maintenus (caractéristiques de dégradation et organisation du système) et la productivité (organisation et planification de la production). L'impact dans le milieu industriel des action de maintenance et des risques de dégradation qu'ils soient internes au système ou qu'il concerne l'environnement sont importants du point de vue financier mais aussi en terme d'image de marque, en particulier pour la qualité (normes, etc.). Ces aspects restent encore mal maîtrisés dans l'industrie car ils sont souvent traités trop indépendamment les uns des autres et surtout sans l'aide de méthodes d'optimisation adaptées ou limitées des cas trop simplistes ou spécifiques .

En particulier, la MP systématique des systèmes multi-composants (inspection à dates déterminées dans un planning) a un effet direct sur le coût de la maintenance dans les entreprises. Or, la détermination des dates d'intervention doit tenir compte des autres modes de maintenance et de leurs effets sur la disponibilité d'un système délivrant un service (et par conséquent sa productivité et/ou sa qualité de service). Ainsi, trouver un échéancier optimal pour chaque composant peut donc permettre une réduction notable des coûts de possession ou d'exploitation d'un système (en particulier, réduction des coûts de maintenances curatives et d'indisponibilités fortuites).

4.2 Bejaia Mediterranean Terminal

BMT (Béjaia Mediterranean Terminal) est créée comme une société par action, c'est une entreprise de service spécialisé dans le fonctionnement, l'exploitation, et la gestion du terminal à conteneurs. Pour atteindre son objectif, elle s'est dotée d'un personnel compétent particulièrement formé dans les opérations de gestion du terminal. Elle dispose d'équipement d'exploitation des plus perfectionnées pour les opérations de manutention et d'acconage afin d'offrir des prestations de services de qualité, d'efficacité et de fiabilité en des temps records et à des coûts 10 compétitifs. BMT offre ses prestations de services de qualité sur la base de 24h/7j. Le niveau de la technologie mise en place et la qualité des infrastructures et équipements performants (portiques de quai, portiques gerbeurs) font aujourd'hui du port de Béjaia et de BMT, le premier terminal moderne d'Algérie avec une plateforme portuaire très performante

4.3 LA MODELISATION DU COÛT DU SYSTEME

4.3.1 la représentation du système[12]

La présente approche a été appliquée pour l'optimisation de coût de la maintenance de la grue portuaire mobile (MGHK) du terminal à conteneurs de Bejaia Qui pèsent 1000 tonnes . La grue est constituée de quatre sous-systèmes essentiels : La partie levage, la partie rotation, la partie translation et le groupe électrogène. Dans la première phase, le modèle est appliqué séparément pour chaque sous-système. et on a choisis deux système Partie levage, Partie rotation.

Suivant les pratiques de la maintenance suivies à BMT, il s'avère qu'une politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale à la défaillance est la plus appropriée pour l'entreprise. Le modèle de coût correspondant à la dite politique est donné par:

$$C(T) = \frac{C_c H(T) \cdot (1 + e^a + e^{2a} + \dots + e^{a(k-1)}) + (k-1) \cdot C_p + C_{ov}}{kT} \quad (4.1)$$

Le numérateur donne l'espérance du coût total de maintenance durant un cycle de renouvellement, le dénominateur représente l'espérance de la longueur du cycle de renouvellement, où :

C_c : Coût d'une réparation minimale (coût de la maintenance corrective)

C_p : Coût de maintenance préventive périodique (coût d'une révision partielle)

C_{ov} : Coût d'une révision complète (coût du renouvellement)

$H(T)$: Nombre de défaillance (de réparations minimales) durant l'intervalle de temps T

e^a : Facteur d'amélioration de la fiabilité du système après une révision partielle

k : Nombre de révisions partielles avant que le système subisse un renouvellement.

Sous l'hypothèse de réparation minimale après défaillance, le processus de défaillance caractérisé sera un processus de poisson non homogène (NHPP pour Non Homogenous Poisson Process). Par conséquent le nombre de défaillances, dans l'intervalle de temps T , sera donné par le taux cumulé de défaillance $H(T)$ comme suit :

$$H(T) = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (4.2)$$

$$H(T) = \int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} dt = \frac{\beta}{\eta} \int_0^T \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} dt \quad (4.2)$$

$$H(T) = \frac{\beta}{\eta} \int_0^T \left[\frac{t^{\beta-1}}{\eta^{\beta-1}} \right] dt = \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_0^T t^{\beta-1} dt \quad (4.3)$$

$$H(T) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \left[\frac{t^\beta}{\beta} \right]_0^T = \frac{\beta}{\eta^\beta} * \left(\frac{T^\beta}{\beta} - 0 \right) \quad (4.4)$$

$$H(T) = \frac{T^\beta}{\eta^\beta} \quad (4.5)$$

$$C(T) = \frac{C_c \cdot (T^\beta / \eta^\beta) (1 + e^a + \dots + e^{a(K-1)}) + (K - 1)C_p + C_{ov}}{KT} \quad (4.6)$$

$$C(T) = \frac{C_c \cdot T^\beta (1 + e^a + \dots + e^{a(K-1)})}{KT\eta^\beta} + \frac{(K - 1)C_p + C_{ov}}{KT} \quad (4.7)$$

$$c(T) = \frac{c_c \cdot T^{\beta-1} (1 + e^a + \dots + e^{a(K-1)})}{K\eta^\beta} + \frac{(K - 1)C_p + C_{ov}}{KT} \quad (4.8)$$

Représente notre fonction objective à minimiser.

4.3.2 Données de défaillance et de maintenance

Les donnes sont collectées par Laggoune. R et Haddad. C en vu d’optimisation du coût de la maintenance préventive d’une grue portuaire mobile du terminal à conteneurs de Bejaia (BMT : Bejaia Méditerranéen Terminal). Les données de défaillance et de maintenance des deux sous-systèmes sont collectées au niveau du service maintenance des équipements de manutention du BMT.

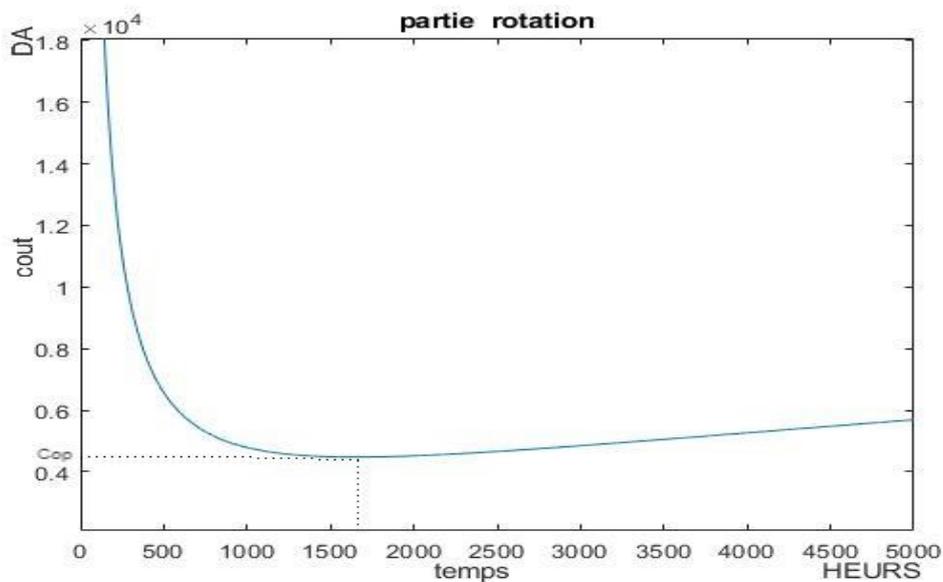
Sous-système	Paramètre de forme β	Paramètre d’échelle η
Partie levage	2.8	2490.2
Partie rotation	1.5	2855.5

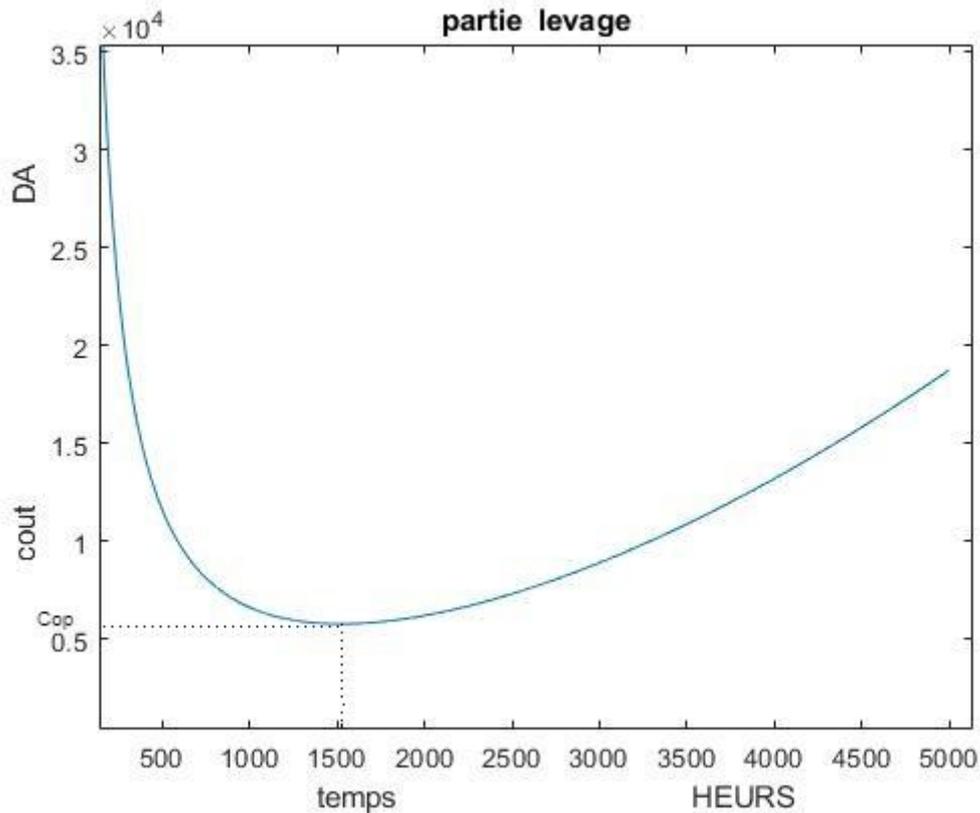
Tableau 4.1 Données de défaillance de la grue

Sous-système	Partie levage	Partie rotation
Cov (DA)	50419252	21818680
Cp (DA)	688439.39	312166.5
Cc (DA)	115811.8	103778.76
k	10	10

Tableau 4.2 : Données des coûts et du paramètre K

4.3.3 la présentation de coût en fonction de temps pour chaque sous système:





4.4 L'optimisation de coût:

on a choisit d'utilisé MATLAB pour chercher le coût optimal pour les deux sous système.

4.4.1 présentation de matlab

Le nom MATLAB vient de l'anglais *MATrix LABORatory*. Une traduction littérale nous amène à voir MATLAB comme un laboratoire pour manipuler des matrices. Nous reviendrons sur ce point, qui est un élément fondamental du langage MATLAB : la plupart des fonctions définies dans MATLAB le sont pour des grandeurs matricielles, et par extension, pour des données tabulées.

MATLAB comprend de nombreuses fonctions, de calcul ou de traitements de données, d'affichage, de tracés de courbes, de résolution de systèmes et d'algorithmes de calculs numériques au sens large du terme.

Toutes ces fonctions sont définies par défaut dans MATLAB dans un langage de programmation spécifique que l'on appellera... MATLAB !

Ce langage comprend de nombreuses fonctions prédéfinies pour le calcul matriciel, mais pas seulement. De ce fait, les domaines d'application sont extrêmement variés, et l'on peut citer par exemple :

- le calcul numérique dans le corps des réels ou des complexes ;
- le calcul de probabilités ou les statistiques ;
- le calcul intégral ou la dérivation ;
- le traitement du signal ;
- l'optimisation ;
- le traitement d'image ;
- l'automatisme.

on a choisit optimisation dans notre cas.

On a utiliser:

1. Optimisation a l'aide d'une dérivation simple.
2. Optimisation avec la méthode du nombre d'or.
3. Optimisation avec Programmation non linéaire.

4.4.2 Optimisation a l'aide d'une dérivation simple

Le calcul a été fait sous MATLAB avec un algorithme basé sur la méthode analytique de la dérivation simple.

```

6 - B=1.5;
7 - n=2855.5;
8 - A=0.7;
9 - a=1;
10 - for i=1:k-1
11 - a=a+exp(i*A);
12 - end
13 - T= (100:5000);
14 - C=((T.^(B-1))*cc*a)/(k*(n^B))+((k-1)*cp+cov)./(k*T);
15 - Ccp=(((n^B)/(B-1))*((k-1)*cp+cov)/(cc*a))^(1/B).^(B-1))*cc*a)/(k*(n^B))+((k-1)*cp+cov)./(k*(n^B)/(B-1))*((k-1)*cp+cov)/(cc*a))^(1/B)))
16 - plot(T,C);
17 - xlabel ('temps EN HEURS')
18 - ylabel ('cout en DA')
19 - title ('partie rotation')
20 - end
    
```

figure 4.1 algorithme de dérivation simple .

Les résultats sont :

Sous-système	Partie levage	Partie rotation
Temps optimal (h)	1520.6	1649.8
Le coût optimal (DA)	5791.7	4478.4

Tableau 4.3 temps optimal et coût optimal calculé par la méthode de dérivation

4.4.3 Optimisation avec la méthode du nombre d'or

Cette méthode est applicable à un problème de minimisation sans contrainte tel que l'intervalle de solution $[a, b]$ est connu et la fonction objectif $f(x)$ est uni modale dans l'intervalle; c'est-à-dire le signe de sa dérivée $f'(x)$ change au plus une fois $[a, b]$ de sorte que $f(x)$ diminue / augmente de façon monotone pour $[a, x_0] / [x_0, b]$, où x_0 est la solution que nous recherchons. La procédure dite de recherche dorée est

Étape 1 : Prenez les deux points $c = a + (1 - r)h$ et $d = a + rh$ à l'intérieur du intervalle $[a, b]$,

où $r = (\sqrt{5} - 1) / 2$ et $h = b - a$.

Étape 2 : Si les valeurs de $f(x)$ aux deux points sont presque égales [c'est-à-dire $f(c) \approx f(d)$] et la largeur de l'intervalle est suffisamment petite (c'est-à-dire $h \approx 0$), puis arrêtez l'itération pour sortir de la boucle et déclarer $x_0 = c$ ou $x_0 = d$ selon que $f(c) < f(d)$ ou non. Sinon, passez à l'étape 3.

Étape 3 : Si $f(c) < f(d)$, soit la nouvelle limite supérieure de l'intervalle $b \leftarrow d$; sinon, laissez la nouvelle borne inférieure de l'intervalle $a \leftarrow c$.

```
function [xo, fo] = opt_gs(f, a, b, r, TolX, TolFun, k)
h = b - a; rh = r*h; c = b - rh; d = a + rh;
fc = feval(f, c); fd = feval(f, d);
if k <= 0 || (abs(h) < TolX & abs(fc - fd) < TolFun)
if fc <= fd, xo = c; fo = fc;
else xo = d; fo = fd;
end
if k == 0, fprintf('Just the best in given # of iterations'), end
else
if fc < fd, [xo, fo] = opt_gs(f, a, d, r, TolX, TolFun, k - 1);
else [xo, fo] = opt_gs(f, c, b, r, TolX, TolFun, k - 1);
end
end

f = inline('C(x)', 'x');
a = 0;
b = 5000;
r = (sqrt(5) - 1) / 2;
TolX = 1e-4;
TolFun = 1e-4;
MaxIter = 50;
[xo, fo] = opt_gs(f, a, b, r, TolX, TolFun, MaxIter)
```

figure 4.2 algorithme de la méthode du nombre d'or

Ensuite aller à les résultat obtenu par cette méthode:

Sous-système	Partie levage	Partie rotation
Temps optimal (h)	1520.6	1649.8
Le coût optimal (DA)	5791.8	4478.4

Tableau 4.4 temps optimal et coût optimal calculé par la méthode du nombre d'or

4.4.4 Optimisation avec Programmation non linéaire

le programme MATLAB contient des application pour l'optimisation des fonction déjà programmer qui sous le nom 'optimization toolbox'

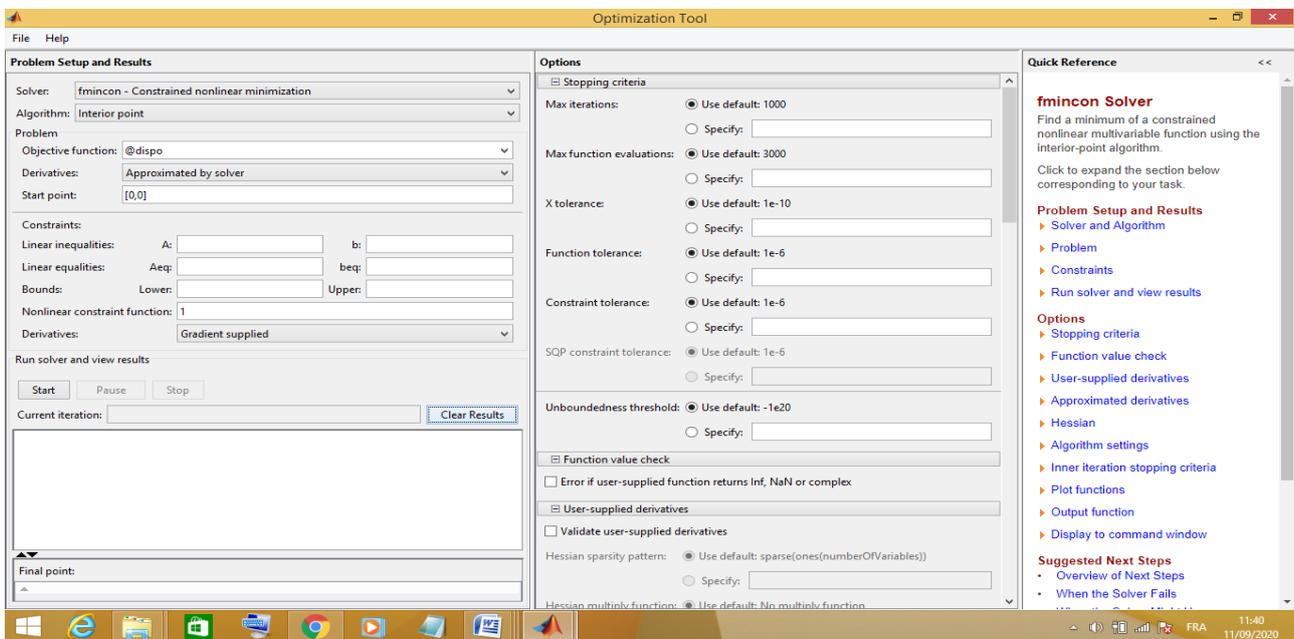


figure 4.1: optimization toolbox

Partie levage		
Exécution	Temps optimal en(h)	Coût optimal en DA
1	1552.0	5794.0
2	1553.7	5794.2
3	1383.2	5837.4
4	1530.7	5792.0
5	1523.2	5791.8
6	1508.7	5792.1

Partie rotation		
Exécution	Temps optimal en(h)	Coût optimal en DA
1	1639.9	4478.4
2	1601.2	4479.4
3	1618.0	4478.8
4	1671.5	4478.6
5	1661.7	4478.4
6	1639.3	4478.4

Tableau 4.5 Temps optimal et coût optimal calculé par la méthode de programmation linéaire

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de coût , les modèles d'optimisation qui on montrent l'importance de l'optimisation de la maintenance préventive en réduisant le coût global de cette dernière et en améliorant les périodicités afin d'éviter de pénaliser les systèmes en terme de disponibilité .

**CONCLUSION
GÉNÉRALE**

Conclusion générale

Au terme de notre étude, nous pouvons conclure que l'optimisation des systèmes de production relève d'une importance majeure pour le maintien et la disponibilité des équipements qui les constituent. La connaissance des indicateurs de fiabilité en l'occurrence de la MTBF et la disponibilité de l'équipement nous permet d'acquérir des éléments de réponse par rapport à la stratégie de maintenance à déployer.

Par ailleurs l'étude des coûts de maintenance de type préventif nous a permis de calculer la périodicité optimale de la maintenance préventive et de pouvoir opter pour une politique de maintenance différente à celle utiliser au paravent.

Les résultats obtenus dans le cas étudié montrent que le remplacement à une période prédéterminée revient moins cher que le remplacement après une défaillance. Ce qui donne la possibilité de réduire les temps d'arrêts et l'indisponibilité à un coût minimal.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Christian Coudre**, [Les différentes formes de maintenance](#), sur le site *TPM Attitude*, consulté le 19 / 08 /2020.
- [2] www.ingexpert.com/maintexpert/php_theorie_maintenance_definitions.php
- [3] **S.Bensaada D.Feliachi** " la maintenance industrielle " **2002**.
- [4] **Wikipedia**, [wikipedia.org/wiki/Optimisation- Mathématique](http://wikipedia.org/wiki/Optimisation-Mathématique), consulté le 20 / 08 /2020.
- [5] **E.Trélat** "contrôle optimal-théorie et applications" 17/05/2005.
- [6] **J.P Demailly** "Analyse numérique et équation différentielles " [Grenoble Sciences](#) - 4^e édition - mai 2016
- [7] **S.P.Sethi,G,L, Thompson**" optimisation control theory Vol. 37, No. 2" ,06/1995
- [8] **A. USHAKOV**, "*Handbook of Reliability Engineering*", John Wiley and Sons", **1994**
- [9] **JEAN-LOUIS BON**, " Optimisation de la maintenance : présentation", Journal de la société française de statistique, tome 141, no 3, p. 3-8, **2000**
- [10] "**D. Jeannel et I. Montagnier** "Journal de la société française de statistique, tome 141, no 3 (2000), p. 3-8.
- [11] **B.S. Dhillon, Ph. D.** "Engineering maintenance" **2000**.
- [12] **LAGGOUNE Radouane1 et HADDAD Cherifa** "optimisation de la maintenance des équipements de manutention du terminal a conteneurs de Bejaia (BMT) " **26 au 28 Novembre 2012**.

Résumé

La maîtrise de la maintenance des installations industrielles, notamment les coûts dus à la mise en œuvre des politiques préventives est très intéressante du fait de l'importance croissante de ce service dans les chaînes de production. L'objectif de notre travail est d'optimiser la maintenance préventive. Pour cela, on a proposé un modèle de coût correspondant à la politique de maintenance périodique avec réparation minimale à la défaillance et on a mobilisé la technique stochastique en vue d'optimiser les périodicités des révisions partielles tout en minimisant le coût global. Le programme réalisé a été validé par un outil d'optimisation fourni par Matlab.

Mot clés : Maintenance , Optimisation, Modélisation , Matlab.

ملخص

يعد التحكم في صيانة المنشآت الصناعية ، ولا سيما التكاليف الناتجة عن تنفيذ السياسات الوقائية ، أمراً مثيراً للاهتمام بسبب الأهمية المتزايدة لهذه الخدمة في سلاسل الإنتاج. الهدف من عملنا هو تحسين الصيانة الوقائية ، ولهذا ، اقترحنا نموذج تكلفة يتوافق مع سياسة الصيانة الدورية مع الحد الأدنى من الإصلاح للفشل وقمنا بتعبئة التقنية العشوائية من أجل تحسين الفترات الزمنية المراجعات الجزئية مع تقليل التكلفة الإجمالية. تم التحقق من صحة البرنامج الذي تم تنفيذه بواسطة أداة تحسين مقدمة من Matlab

الكلمات المفتاحية: الصيانة ، التحسين ، النمذجة ، ماتلاب.

Abstract

The control of the maintenance of industrial installations, in particular the costs due to the implementation of preventive policies is very interesting because of the growing importance of this service in the production chains. The objective of our work is to optimize preventive maintenance. For this, we proposed a cost model corresponding to the policy of periodic maintenance with minimal repair to failure and we mobilized the stochastic technique in order to optimize the intervals partial revisions while minimizing the overall cost. The program carried out was validated by an optimization tool provided by Matlab

Keywords: Maintenance, Optimization, Modeling, Matlab
