



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE DJILLALI LIABES
SIDI BEL ABBES
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



THESE

En vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences

Option : Génie Des Systèmes Industriels

Présenté par :

ABDALLAH MOHAMMED

Thème

« Optimisation de la maintenance préventive des système de production
incorporant la dépendance par les meta-heuristique »

Soutenu en

Devant le jury

Président : Zeblah Abdelkader	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Encadreur : Yamani Massim	maitre de conférences	UDL Sidi Bel Abbès
Co-Encadreur : Benguedieb Mohamed	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Examineur : Ziadi abdelkader	professeur	C .U Ain Temouchent
Examineur : Bourdim Abdelghafour	maitre de conférences	U A B B Tlemcen
Examineur : Rahli Mustapha	Professeur	U S T O Oran

Résumé

Une des préoccupations majeures du monde industriel est d'avoir une exploitation performante permettant de garantir au mieux la qualité des missions réalisées, le respect des délais demandés et la minimisation des coûts d'exploitation. Toutefois, aujourd'hui la concurrence accrue et la complexité des systèmes conduit les industriels à développer des Approches qui permettent la maîtrise de la disponibilité et en particulier à prendre en compte ce paramètre pour l'élaboration de la politique de maintenance.

Cette thèse traite la problématique de l'optimisation de la planification des dates de la maintenance préventive des systèmes de production série-parallèle incorporant la dépendance sous contrainte de disponibilité. Il s'agit de système modélisé comme étant système binaire ou système multi-états avec un nombre fini de niveaux de capacité allant du fonctionnement parfait jusqu'à la défaillance totale. Les composantes du système série-parallèle sont assujetties à des remplacements préventifs et à une réparation minimale en cas de panne.

Ce travail présente des modèles d'optimisation permettant de générer les plans optimaux des instants d'intervention pour des actions de maintenance préventive. Les fonctions des objectifs de ces modèles minimisent la somme des coûts de la maintenance sous contrainte de satisfaire la disponibilité requise du système.

La méthodologie proposée développe des modèles mathématiques, des méthodes d'évaluation des temps de maintenance, les capacités relatives aux systèmes multi- états et des algorithmes de résolution pour obtenir des solutions optimales.

En effet, le problème d'optimisation de la maintenance préventive des systèmes séries-parallèles appartient à la classe des problèmes combinatoire NP-difficile. Il s'agit de problèmes difficiles à résoudre de par le très grand nombre de combinaisons envisageables et le temps de calcul croît de manière exponentielle avec l'augmentation linéaire de la taille du problème. Dans cette optique, nous avons proposé des algorithmes d'optimisation des plans de maintenance préventive basés sur les métaheuristiques notamment les colonies de fourmis et le système immunitaire artificiel. Cette optimisation a été donc réalisée afin de déterminer les composants du système qui doivent être assujettis à la maintenance préventive et de trouver le planning optimal des dates et des actions correspondantes de maintenance. Cette gestion optimale de la maintenance des systèmes industriels permettent à ces installations de répondre d'une part aux contraintes budgétaires et d'autre part de satisfaire au mieux la demande des clients et des usagers.

Abstract

One of the major concerns of the industrial world is to have a successful exploitation of resources allowing to guarantee at best the quality of the fulfilled missions, the respect for deadlines and minimization of operating costs. Today, however, increased competition and the complexity of systems lead manufacturers to develop approaches that allow the control of availability and in particular to take into account this parameter for the elaboration of the maintenance policy.

This thesis addresses the problem of optimizing planning dates for preventive maintenance of series-parallel production systems incorporating dependence under availability constraint. This is modeled as a binary or a multi-state system with a finite number of states from full capacity functioning to total system failure. The series-parallel system components are subject to preventive replacements and minimal repairs in case of failure.

This thesis presents optimization models for generating optimal timing plans for preventive maintenance actions. The objective functions of these models minimize the total costs of the maintenance under constraint to satisfy the required system availability.

The proposed methodology develops mathematical models, evaluation methods of maintenance intervals, capacities relative to the multi-state systems and resolution algorithms for optimal solutions.

Indeed, the problem of optimizing preventive maintenance of series-parallel systems is known as an NP-hard combinatorial problem. It is difficult to exactly solve such a problem given the large number of possible combinations and the computation time increases exponentially with a linear increase in the size of the problem. To this end, we have proposed algorithms for optimizing preventive maintenance plans based on metaheuristics including ant colonies and artificial immune system algorithms. This optimization was thus realized to determine the components of the system which must be subjected to the preventive maintenance and to find the optimal schedule of dates and the corresponding actions of maintenance. This optimal maintenance management of the industrial systems allow these facilities to answer on one hand the budgetary constraints and on the other hand to satisfy at best the demand of the customers and the users.

Liste Des Matières

Chapitre 1

1.1 Introduction.....	17
1.2 Présentation De La Maintenance.....	19
1.2.1 La Maintenance De Ses Débuts A Nos Jours.....	19
1.3 Définition Et Objectifs De La Maintenance.....	21
1.3.1 Définition De La Maintenance.....	21
1.3.2 Les Types De Maintenance	23
1.3.2.1 Maintenance Corrective.....	25
1.3.2.2 La Maintenance Préventive.....	26
1.4 Optimisation De La Maintenance Conditionnelle Prévisionnelle	39
1.5 Eléments De Comparaison	40
1.5.1 Maintenance Corrective	40
1.5.2 Maintenance Préventive Systématique.....	40
1.5.3 Maintenance Préventive Conditionnelle Et Maintenance Prévisionnelle	41
1.6 Modélisation et évaluation de la maintenance.....	42
1.6.1 Modèles de maintenance	42
1.6.2 Modèle De La Maintenance Industrielle Préventive	44
1.7 Conclusion.....	45

Chapitre 2

2.1 Introduction.....	47
2.2 L'optimisation de la maintenance	48
2.2.1 Introduction	48

2.3 Les méthodes d'optimisation de la maintenance.....	48
2.3.1 L'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité	49
2.3.2 Présentation de la méthode	50
2.4 Optimisation De La Maintenance Conditionnelle Prévisionnelle	51
2.5 Comparaison entre les types de maintenance	52
2.5.1 Maintenance Corrective.....	52
2.5.2 Maintenance Préventive Systématique	52
2.5.3 Maintenance Préventive Conditionnelle Et Maintenance Prévisionnelle ...	53
2.6 Choix D'une Politique De Maintenance	54
2.6.1 L'impact D'une Politique De Maintenance.....	58
2.7 Optimisation De La Maintenance.....	59
2.7.1 Classification De L'optimisation De La Maintenance.....	61
2.8 Conclusion.....	63

Chapitre 3

3.1 Introduction.....	64
3.2 Nature D'un Système	65
3.3 La Sûreté De Fonctionnement (SdF)	66
3.4 Identification Des Evénements	68
3.4.1 Événements attendus	68
3.4.2 Evénements Inattendus	69
3.5 Fiabilité.....	69
3.5.1 Fiabilité des composants	70
3.5.2 Fiabilité Des Systèmes.....	71

3.5.2.1 Système Série	71
3.5.2.2 Système Parallèle.....	72
3.5.2.3 Systèmes Série-Parallèles Multi-Etats Sans Stocks	73
3.6 Estimation De La Fiabilité Par La Méthode De L'UMGF	73
3.7 Fiabilité Couple a La Charge.....	76
3.8 Exemple Illustratif De La Méthode	76
3.9 Conclusion	80
 <u>Chapitre 4</u>	
4.1 Introduction.....	81
4.2 Model De Base.....	83
4.3 Modélisation De La Dépendance	85
4.4 Modes De Dépendance	86
4.5 Effet De La Maintenance Corrective Et Leur Nombre.....	86
4.5.1 Le Modèle Propose Pour Le Calcul De β	88
4.5.2 Le Modèle Propose Pour Le Calcul De $p(t)$	88
4.6 Le Calcul De La Fiabilité	89
4.6.1 Calcul De La Fiabilité Individuelle	90
4.6.2 Calcul de la fiabilité du système.....	91
4.7 Exemple.....	91
4.8 Conclusion	94

Chapitre 5

5.1 Introduction	95
5.2 Organisation Générale	97
5.3 L’algorithme A Colonies De Fourmis	100
5.3.1 Origine	101
5.4 Algorithme Du Système Immunitaire Artificiel	104
5.4.1 Introduction.....	104
5.4.2 Le Système Immunitaire	104
5.4.3 Les Cellules B	106
5.4.4 Les Cellules T	106
5.5 Les Processus De Base D’un Système Immunitaire	107
5.5.1 L’identification Dans Le Système Immunitaire Naturel.....	107
5.5.2 L’activation	108
5.6 Le Principe Du Mécanisme De La Sélection Clonale	109
5.7 Système Immunitaire Artificiel (AIS)	110
5.7.1 Algorithme du choix clonal (CLONALG)	111
5.7.2 L’hypermutation Somatique.....	113
5.7.3 La Maturation D’affinité.....	114
5.8 Conclusion	114

Chapitre 6

6.1 Introduction.....	115
6.2 Le Comportement Des Matériels Du Système AGR	116
6.3 Maintenance Préventive « MP »	124

6.4 Les Paramètres Utilisés « La Représentation Des Taches De Maintenance ».....	125
6.5 Optimisation Du Programme De Maintenance Préventive.....	128
6.5.1 Algorithme de colonie des fourmis.....	129
6.5.1.1 Conventions.....	130
6.5.1.2 Choix D'implémentation.....	129
6.5.1.3 Choix Des Transitions.....	130
6.5.1.4 Mise A Jour Des Phéromones.....	130
6.5.2 Fonctionnement De L'algorithme	131
6.6 Résultats Numériques.....	134
6.6.1 Paramétrage De L'algorithme.....	134
6.6.2 Planning Optimale De Maintenance Obtenu Par l'ACA	136
6.7 Optimisation Par L'algorithme Du Système Immunitaire Artificiel.....	138
6.7.1 Algorithme De La Sélection Clonal.....	138
6.7.2 Critère D'arrêt.....	138
6.7.3 Codage Des Solutions.....	139
6.8 Algorithme Immune Artificiel.....	139
6.8.1 Operations Relatives à La Mutation.....	142
6.8.2 Opérations De Croisement.....	142
6.8.3 Planning Optimal Obtenu Par L'AIS	145
6.9 Discussion.....	147

Chapitre 7

Conclusion Générale +Perspectives d'approfondissement.....	149
--	-----

Liste Des Tableaux

Chapitre 3

Tableau 1 : Paramètres Des Unités Multi-Etats.....	77
Tableau 2 : Caractéristiques De La Demande.....	77

Chapitre 4

Tableau 4.1 : les caractéristiques des composants.....	92
Tableau 4.2 : caractéristiques des actions envisagées dans les trois cas étudiées	93

Chapitre 6

Tableau 6.1: base des stratégies de maintenance étudiées. Maintenance préventive des matériels.....	126
Tableau 6.2 : paramètres des actions de la MP	127
Tableau 6.3: paramètres de l'algorithme des fourmis	135
Tableau 6.4 : plan MP optimal pour $R(T, 0.97) \geq 0.9$	136
Tableau 6.5 : plan MP optimal pour $R(T, 0.97) \geq 0.95$	137
Tableau 6.6 : plan MP optimal pour $R(T, 0.97) \geq 0.90$	145
Tableau 6.6 : plan MP optimal pour $R(T, 0.97) \geq 0.95$	146

Listes Des Figures

Chapitre 1

Fig 1.1. Les Différentes Stratégies De la Maintenance	24
Fig.1.2:Taux de défaillance en fonction du temps.....	27
Fig.1.3: Illustration du principe de la maintenance.....	28
Fig.1.4: Dosage optimal de MP et MC	31
Fig. 1.5: Principe de la maintenance conditionnelle	33
Fig.1.6 : Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur La production.....	34
Fig.1.7: Le Chemin Logique De La Mise En Œuvre.....	38
Fig. 1.8 Intensité dans le cas AGAN (As Good As New)	45
Fig.1.9 Intensité dans le cas ABAO	45

Chapitre 2

Fig. 2.1 : La méthode OMF.	51
Fig. 2.2: énoncé de la fonction globale d'une politique de Maintenance préventive conditionnelle.....	54
Fig.2.3: Détermination de la durée de vie optimale.....	55
Fig. 2.4: Choix d'une politique de maintenance.....	56
Fig.2.5: L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF.....	59
Fig.2.6 La nécessité de contrôler l'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective.....	61

Chapitre 3

Fig. 3.1 : Système série parallèle	64
Fig.3.2: Décomposition d'un système mécanique en composants élémentaires.....	71
Fig.3.3: Système Série.....	71
Fig.3.4: Système à structure parallèle.....	72
Fig. 3.5: Système à Structure Série-Parallèle.....	73

Chapitre 4

Fig.4.1 : Modélisation du taux de défaillance.....	83
Fig.4.2 : La structure étudiée	92
Fig. 4.3: La Courbe de fiabilité d'un système (3 2 3)	93

Chapitre 5

Fig.5.1 : Métaheuristiques D'optimisation	98
Fig.5.2: Squelette de principe des métaheuristiques Stochastiques.....	99
Fig.5.3 Optimisation du chemin entre nid et source de nourriture.....	101
Fig.5.4 : Présentation d'une cellule B et une cellule T.....	107
Fig.5.5 : L'identification dans le système immunitaire	108
Fig.3.6 : Le principe de la sélection clonale.....	110
Fig.5.7 : Organigramme de la sélection Clonale.....	112

Chapitre 6

Fig.6.1 : Schéma fonctionnel du système AGR.....	115
Fig.6.2 : Principe de représentation des relations entre les facteurs influents, les mécanismes de dégradations, les modes de défaillance et les symptômes d'un matériel	116

Fig.6.3a : Phénomènes de comportement des pompes pris en compte pour l'étude	117
Fig.6.3b : Phénomènes de comportement des clapets pris en compte pour l'étude.....	118
Fig.6.3c : Phénomènes de comportement des capteurs pris en compte pour l'étude	119
Fig.6.3d : Phénomènes de comportement des filtres pris en compte pour l'étude.....	119
Fig.6.3e : Phénomènes de comportement de l'échangeur thermique pris en compte pour l'étude	120
Fig.6.4a : Arbre d'indisponibilité du système AGR.....	122
Fig.6.4b: Arbre d'indisponibilité du super-composant.....	123
Fig.6.5 : Organigramme de l'algorithme des colonies de fourmis.....	133
Fig. 6.6 Nombre de cycles pour les solutions optimales.....	137
Fig6.7 : Une clef et Une serrure entre l'antigène et l'Anticorps	140
Fig6.8 : Nombre de cycles pour la convergence en fonction des paramètres du répertoire et des clones (cas 1)	146
Fig.6.9 : Nombre de cycles pour la convergence en fonction des paramètres du répertoire et des clones (cas 2)	146

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse le docteur Yamani Massim et le Professeur Benguediab Mohamed, pour leur soutien moral, pour leur confiance, pour les conseils judicieux qu'ils m'ont généreusement donnés et la passion de la recherche qu'ils m'ont transmise. Leur extrême générosité, leur compétence, leur dévouement et leur souci constant de l'excellence susciteront toujours mon respect et mon admiration.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à Monsieur Zeblah Abdelkader, professeur au département D'Electrotechnique de l'Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbas, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et participer à l'examen de cette thèse.

Je suis extrêmement sensible à l'honneur que me fait le Professeur RAHLI Mustapha Université D'USTO, département d'electrotechnique pour l'intérêt qu'il a porté à cette recherche, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer à ce jury. Mes remerciements vont également à messieurs Ziadi Abdelkader docteur à l'université de Ain Temouchent, département de génie mécanique et Bourdim Abdelghafeur docteur au département de Génie mécanique de l'Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, d'avoir accepté de prendre part au jury. Je leur remercie tous pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux.

Cette thèse représente l'aboutissement d'un long parcours qu'il m'aurait sans doute pas été possible sans l'aide du bon dieu bien sûr et ensuite l'amour et le soutien moral et inconditionnel de mes parents, ma femme, mes sœurs et frères.

Un vif merci encore fois à ma famille qui m'a toujours soutenu, réconforté et cru en moi dans cette formidable et unique aventure qui est la thèse.

Ma gratitude va aussi à mes collègues de l'Université Djilali liabes de Sidi Bel Abbas.

Un spécial remerciement est dédié à Mme Chatibi Fouzia, docteur au département de génie Civil de l'Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbas.

Introduction Générale

A l'heure actuelle, la plupart des entreprises ayant une activité de production sont fortement soumises à la concurrence du marché. Pour conforter leur position dans leur domaine d'activités, elles doivent satisfaire au mieux les attentes du client en termes de délais, de qualité des produits et de prix.

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. En effet, l'évolution technologique, l'esprit innovateur des entreprises et leur souci continu de réduire la fréquence des pannes de leurs équipements, font de la maintenance un outil indispensable à la bonne marche d'une entreprise.

De plus, Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation pouvant causer l'apparition des modes de défaillance des matériels, entraînant ainsi leur panne et d'éventuels effets sur le fonctionnement de l'installation [1].

Les mécanismes de dégradation peuvent être de plusieurs types : usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques diverses, etc... Leur cinétique d'évolution (fonction du temps de fonctionnement, du temps calendaire ou encore du nombre de sollicitations) peut dépendre de plusieurs facteurs influents (conditions d'environnement et de fonctionnement, dégradation d'autres matériels, tâche de maintenance défavorable, etc...) [2]. Les modes de défaillance décrivent le dysfonctionnement d'un matériel par la fonction qu'il ne remplit plus. Cinq modes de défaillance génériques sont définis, [3] : perte de la fonction, fonctionnement intempestif, refus de s'arrêter, refus de démarrage, fonctionnement dégradé.

Face à la diversité des matériels d'une installation et de leurs comportements, les responsables de maintenance doivent envisager de véritables stratégies. Ils peuvent décider de pratiquer une maintenance corrective à la suite de la défaillance d'un matériel, mais cela ne permet pas d'éviter les conséquences des pannes sur le fonctionnement du système. Une attitude plus offensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive systématique selon laquelle la décision d'intervenir précède l'apparition du dysfonctionnement. Cela permet de diminuer le nombre de défaillances et induit un gain économique substantiel, conséquence de la différence entre les coûts générés par l'intervention et la disponibilité qu'elle occasionne.

En limitant, voire en empêchant, les défaillances de cette manière, on court toutefois au risque de dépenses excessives et d'indisponibilités pour maintenance inutiles. Il est donc nécessaire de régler les paramètres de la politique de manière adéquate, [4].

La maintenance préventive conditionnelle est de plus en plus utilisée. Elle présente l'avantage de limiter le nombre d'interventions sur les matériels. En effet la remise en état du matériel est réalisée uniquement lorsque celui-ci présente des signes de dysfonctionnement (dégradation, symptômes, panne à la sollicitation) pouvant mettre en cause ses performances à brève échéance.

Enfin, on peut associer à la maintenance préventive les notions de visite et révision qui consistent en un regroupement de tâches de maintenance préventive afin de redonner au matériel un potentiel d'usage pour une durée déterminée tout en limitant le nombre d'interventions sur le matériel et donc son indisponibilité pour maintenance.

La diversité des alternatives fait de la maintenance un processus caractérisé par des choix d'exécution pour la définition des stratégies de maintenance. L'importance de l'impact sur les performances du système considéré rend nécessaire son optimisation [5].

Et Au vu de l'importance du processus maintenance et de son impact sur les performances des installations, des méthodes d'optimisation ont été développées. Elles permettent d'aider les responsables de maintenance à construire ou à modifier les stratégies de maintenance.

L'étude de [6] présente les principales méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance en soulignant les différents objectifs qui ont guidé leur développement.

On peut noter que certaines méthodes d'optimisation de la maintenance ont été initialement développées dans les domaines de l'aéronautique et de la production d'énergie, en particulier pour les centrales nucléaires avant d'être adaptées et appliquées dans d'autres secteurs industriels.

Les démarches d'optimisation de la maintenance consistent généralement à effectuer une analyse des risques ainsi qu'une étude du retour d'expérience de manière à pouvoir sélectionner les tâches de maintenance.

De ce fait, le but de ce travail est d'optimiser la politique de maintenance par le développement raisonné de la maintenance préventive, en garantissant une surveillance du parc machines, et en assurant au système de production, l'augmentation de sa disponibilité instantanée, de sa disponibilité moyenne, de sa maintenabilité, de sa sécurité opérationnelle et de sa qualité, tout en diminuant au maximum les dépenses liées aux achats et opérations d'entretien.

A cet effet, notre travail est scindé en sept chapitres :

Dans le chapitre I, une étude bibliographique détaillée est présentée sur les politiques de maintenance. Elle commence par définir et préciser la typologie générale des politiques de maintenance. Les différentes politiques de maintenance pour des systèmes mono et multi-composants sont ensuite présentées, conditions de mise en place, évolution et optimisation.

Le chapitre 2, aborde également des aspects bibliographiques. Il concerne les méthodes d'optimisation de la maintenance. Les méthodes d'optimisation varient selon les stratégies de maintenance adoptées et les objectifs visés en priorité par le programme de maintenance. Ces objectifs peuvent reposer sur des critères tels que le coût de la maintenance, la disponibilité du système ou encore la sécurité.

Le chapitre 3 aborde la modélisation de la propagation des fautes dans un système comportant plusieurs éléments montés en séries, en parallèles ou en séries-parallèle. Ce chapitre évoque la modélisation de la dynamique d'un système industriel de type markovien où les défaillances sont stochastiques.

Dans le quatrième chapitre nous traitons la modélisation de la fiabilité des systèmes à composants dépendants tout en tenant compte des effets de la maintenance sur le système. La dépendance est habituellement difficile à décrire, même pour les composants identiques, mais il est essentiel d'étudier l'effet de la dépendance pour une meilleure conception et analyse de fiabilité.

Dans le chapitre 5 nous présentons les différentes méthodes d'optimisation appropriées à l'optimisation des politiques de maintenance. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes exactes qui garantissent l'optimalité de la solution et les méthodes basées sur les métaheuristiques qui perdent la complétude pour gagner en efficacité. Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés particulièrement aux algorithmes basés sur les colonies de fourmis et le système immunitaire artificiel.

Le chapitre 6 est consacré à l'étude d'un cas industriel. L'objectif de cette application est de déterminer les programmes optimaux de maintenance préventive d'un système industriel de graissage qui minimisent les coûts et satisfont les contraintes de disponibilité du système. Les résultats obtenus par l'algorithme des colonies de fourmis et celui du système immunitaire artificiel sont comparés.

Finalement le chapitre 7 comporte une conclusion générale et des perspectives de travaux futures.

Chapitre 1

Les stratégies de la maintenance industrielle

1.1 Introduction

Dans le contexte concurrentiel économique actuel, la réduction des coûts de production est devenue la clé du développement et de la survie de l'entreprise. Hormis, le maintien en condition opérationnelle aux meilleurs coûts d'un outil de production, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation des taux de disponibilité des équipements représentent un levier de productivité, voire de compétitivité. C'est l'enjeu vital pour toute entreprise. Les pannes et les incidents des systèmes de production sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie. L'indisponibilité des machines vient amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient, étant donné que la machine industrielle est un équipement complexe, sujet à des multiples modes de défaillances ou les opportunités de pannes ou d'incidents sont multiples. Ces derniers sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie. Un arrêt de machine non-prévu peut avoir de grandes conséquences financières. L'output de la machine suivante n'est plus assuré, voire le produit fini non plus.

Une panne est souvent très difficile à prévoir. Certains mécanismes sont parfois inutilement compliqués, ce qui les rend très fragiles. Il convient de noter aussi que les insuffisances des machines existantes nécessitent rarement leur remplacement par des matériels plus récents et le problème d'accessibilité des éléments des machines peut aussi être une cause dans la longueur de réparation de certaines pannes. De plus l'impact que peut laisser une fonction cachée dont la défaillance n'est pas évidente à l'équipage aux cours des rondes normales des opérateurs. En plus, les techniques d'entretien préventif et d'intervention régulière et systématique bien que coûteuses, ne garantissent pas l'absence de défaillance.

En effet, la gestion optimale d'un système industriel tout au long de sa durée de vie, de la conception au démantèlement, passe par la recherche d'un compromis entre des objectifs souvent conflictuels.

On distingue d'une part les performances économiques, coûts et bénéfices, et d'autre part les aspects de fiabilité, disponibilité, sécurité des personnes et sûreté des installations.

Pour apporter des éléments d'aide à la décision face à ce problème, il est nécessaire de disposer d'outils et méthodes permettant d'analyser les systèmes et d'évaluer quantitativement leurs performances en termes de sûreté de fonctionnement au sens large, c'est-à-dire de fiabilité et de maintenance, tout en respectant les contraintes économiques.

Les études récentes dans l'efficacité de gestion de la maintenance, indiquent que le un tiers de tous les coûts d'entretien est gaspillé pour un entretien inutile ou incorrectement effectué qui affecte de manière significative la capacité de fabriquer les produits de qualité et qui cause les pertes de temps de production. Quand vous considérez que l'industrie des États-Unis dépense plus de 200 milliards dollars tous les ans sur l'entretien de l'équipement, l'impact sur la productivité et le bénéfice représenté par l'opération d'entretien deviennent clairs. Cela fait appel à des philosophies plus avancées de gestion de fabrication et de maintenance.

L'établissement du programme d'entretien a été, et est dans beaucoup de cas, toujours affirmé sur des données statistiques de tendance ou sur l'échec réel de l'équipement d'usine.

Jusqu'à récemment, la gestion a ignoré l'impact de l'opération d'entretien sur la qualité du produit, les coûts de production, et plus important, sur le bénéfice de ligne de fond. L'opinion générale a été: « la maintenance est un mal nécessaire » [7].

La maintenance n'est pas une destination ou bien une fin en soi, mais c'est une des fonctions de l'entreprise. Les décideurs sous-estiment son impact et la considère comme un centre de Coût, pourtant elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise [8].

Comme toute activité industrielle, la maintenance évolue. Elle doit s'adapter aux contraintes de production et de service, elle bénéficie des développements technologiques et se doit d'être productive.

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

1.2 Présentation de la maintenance :

1.2.1 La maintenance de ses débuts à nos jours :

Bien avant la révolution industrielle dans la seconde moitié du dix-huitième (18^{ème}) siècle, la maintenance consistait en des activités des artisans tels que les menuisiers, les forgerons, les soudeurs, les maçons, etc, dans la réparation des bâtiments, des machines primitives, et des moyens de transport de l'époque [9]. Comme il n'y avait pas de concepts tels que « pièces de rechange » ou autre concepts relatifs à la maintenance de jours, les défaillances étaient en général réparées par la fabrication

de nouvelles pièces ou la réparation de l'ancienne. Par ailleurs, la réparation était très à l'ordre du jour et les structures de base étaient elles mêmes soit réparables, soit d'une très grande durabilité, ou les deux à la fois.

En l'absence de méthodes pour le calcul de la fatigue et autres concepts liés à la dégradation, la conception et la réparation était fortement intégrées, en ce sens que pour remplacer une pièce défectueuse jugée pas assez efficace par le propriétaire, ce dernier exigeait une autre beaucoup plus « robuste ». Toutes ces pratiques étaient liées à l'évolution lente et au faible coût de ces services de l'époque.

Ces pratiques ont progressivement évolué à partir de la révolution industrielle. En 1785, Thomas Jefferson a noté que les pièces des canons étaient fabriquées de façon adéquate et assez rapidement pour qu'on envisage de les changer au besoin [9]. Le concept, lent à l'époque, de pièces de rechange, s'est progressivement accéléré. Cette accélération est fortement accentuée par la complexité croissante des machines à « maintenir ». Le travail de l'agent de maintenance s'est alors progressivement dirigé vers plus d'aptitudes au diagnostic. Un autre facteur important de ce changement était le contrôle de qualité, puis l'automatisation dans les systèmes manufacturiers ; ceci a rendu le remplacement des pièces, et plus tard des unités entières, plus rapides et plus faciles que les réparations dans beaucoup de cas.

Les approches pour la gestion de la maintenance ont ainsi considérablement évolué au cours du vingtième siècle. Jusqu'en 1940, seule la maintenance corrective était pratiquée et elle était considérée comme un coût inévitable [10]. Les agents spécialisés de maintenance (réparateurs) sont là pour la remise en état des équipements seulement une fois que ceux-ci sont tombés en panne.

La maintenance n'était pas envisagée à la conception, et ses impacts sur les performances des systèmes n'étaient pas non plus reconnus.

Les applications de la recherche opérationnelle à l'industrie (notamment l'industrie militaire) pendant la deuxième guerre mondiale ont conduit à une large pratique de la maintenance préventive [11], [12].

Les Allemands, dans leurs efforts de guerre étaient de ceux qui ont fortement poussé à l'exigence de plus en plus de fiabilité, et partant accordent de plus en plus d'importance stratégique à la maintenance. La maintenance périodique était initialement destinée à améliorer la sûreté plutôt qu'à accroître la disponibilité ou à réduire les coûts. Depuis les années 1950, les modèles de recherche opérationnelle sont apparus de façon croissante dans l'étude et l'optimisation des politiques de maintenance. Cette évolution peut être observée à travers les nombreux travaux publiés sur la maintenance et qui sont regroupés et analysés dans plusieurs travaux de synthèse et états de l'art tels que [9], [3], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29] et [30]. Ces différents travaux, sur lesquels nous reviendrons, présentent des modèles qui traitent des effets de différentes politiques de maintenance et de la sélection optimale des paramètres de ces politiques.

Mais l'impact réel des actions de maintenance sur la performance des activités n'est abordé que dans les années 1970 [10] où des approches plus intégrées de la maintenance ont évolué aussi bien dans le domaine public que privé. L'acquisition de moyens de défense de plus en plus coûteux conduisit alors les autorités américaines à requérir des approches de « coût globale du cycle de vie » (LCC - life cycle costing), le coût de la maintenance devenant alors un composant très important de ce coût du cycle de vie.

Le lien direct entre la fiabilité et la maintenabilité est alors reconnu et le terme "R&M" (Reliability-Maintenability) devient très largement utilisé en parlant des systèmes de défense. Ce concept est aussi adopté dans les industries et services civiles. La maintenance basée sur la fiabilité (RCM - Reliability Centered Maintenance) apparaît alors dans l'aviation civile aux États-Unis. Au même moment, les japonais développent la maintenance productive totale (TPM - Total Productive Maintenance) [41].

Ces deux pratiques, sur lesquelles nous reviendrons plus tard, considèrent la maintenance dans le contexte plus large des activités économiques et prennent en compte les liens étroits entre les défaillances des composants et leurs impacts sur la performance des activités.

Ces deux pratiques opèrent sur des horizons à court et moyen terme. Les considérations sur ces horizons à court et moyen terme nécessitent des modèles de prédiction efficaces pour accéder aux conditions de divers éléments des systèmes et à leur comportement sous différentes stratégies de maintenance. Comme l'ont relevé dans [10], des insuffisances dans ces pratiques sont devenues apparentes dans les années 1990. Il apparut de plus en plus que la maintenance ne devrait pas être vue que dans un contexte opérationnel en considérant les défaillances des équipements et leurs conséquences. Elle devait tenir compte aussi bien des retombées économiques que des normes nationales et internationales de plus en plus exigeantes.

Ainsi, l'évolution de la maintenance et des outils pour son management ont donné à la maintenance diverses pratiques au sein de l'entreprise.

1.3 Définition et objectifs de la maintenance :

1.3.1 Définition de la maintenance :

D'après la norme française NF EN 13306 X 60-319 [42] [43], la définition de la maintenance est "l'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".

Le management de la maintenance concerne toutes les activités des instances de direction qui, d'une part, déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et, d'autre part, les mettent en application par des moyens

Tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise (y compris dans les aspects économiques).

L'activité actuelle de la maintenance s'inscrit dans un cadre de participation à la réalisation des objectifs de productivité, de rentabilité et de croissance de l'entreprise.

Il est important de s'assurer donc du bon fonctionnement de la fonction maintenance. Toutes les activités d'un cycle d'exploitation doivent être réalisées au mieux de façon à maximiser les effets positifs de la maintenance, tout en minimisant les coûts.

La réalisation des tâches de maintenance requiert à la fois des compétences "métiers" (mécanique, hydraulique, électricité, . . .) et des compétences organisationnelles (planification des tâches, gestion des ressources, soutien logistique intégré, . . .).

Le choix et la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance dépendent donc de nombreux paramètres.

Il est nécessaire de pouvoir mesurer a priori les conséquences de cette stratégie sur les performances globales du système qui peuvent n'apparaître qu'à long terme. En pratique, cependant, il est difficile d'évaluer et de comparer les gains et coûts de décisions de maintenance.

Ainsi définir une approche rationnelle pour la maintenance représente un réel bénéfice. La modélisation des processus de maintenance peut constituer un support intéressant pour l'évaluation et la rationalisation des pratiques de maintenance. Dans la mesure où les activités de maintenance font intervenir une grande diversité de processus (depuis la conception du système jusqu'à la gestion des pièces détachées), une approche de modélisation doit nécessairement être limitée à un sous-ensemble de ces processus.

Dans ce mémoire, on s'intéresse uniquement aux stratégies de maintenance permettant de prévenir, éviter ou corriger les dysfonctionnements de systèmes très divers et souvent complexes (systèmes industriels, systèmes électroniques, réseaux.). Il s'agit de prévoir les dates et la nature des interventions sur ces systèmes.

On s'affranchira de certaines hypothèses. En effet, on ne prendra pas en compte le management des compétences, la disponibilité des ressources liées à l'activité de maintenance, les aspects techniques ni la mutualisation des ressources.

1.3.2 Les types de maintenance :

Les stratégies de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories:

La maintenance corrective et la maintenance préventive.

- ❖ La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance du système alors que la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement. Le recours à l'une ou à l'autre de ces stratégies diffère suivant l'élément considéré mais aussi le type de structure, la politique d'exploitation et de suivi, les coûts, la disponibilité de l'information, etc.

Dans la figure 1.1, nous présentons les différentes stratégies suivant le type de maintenance étudiée. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres.

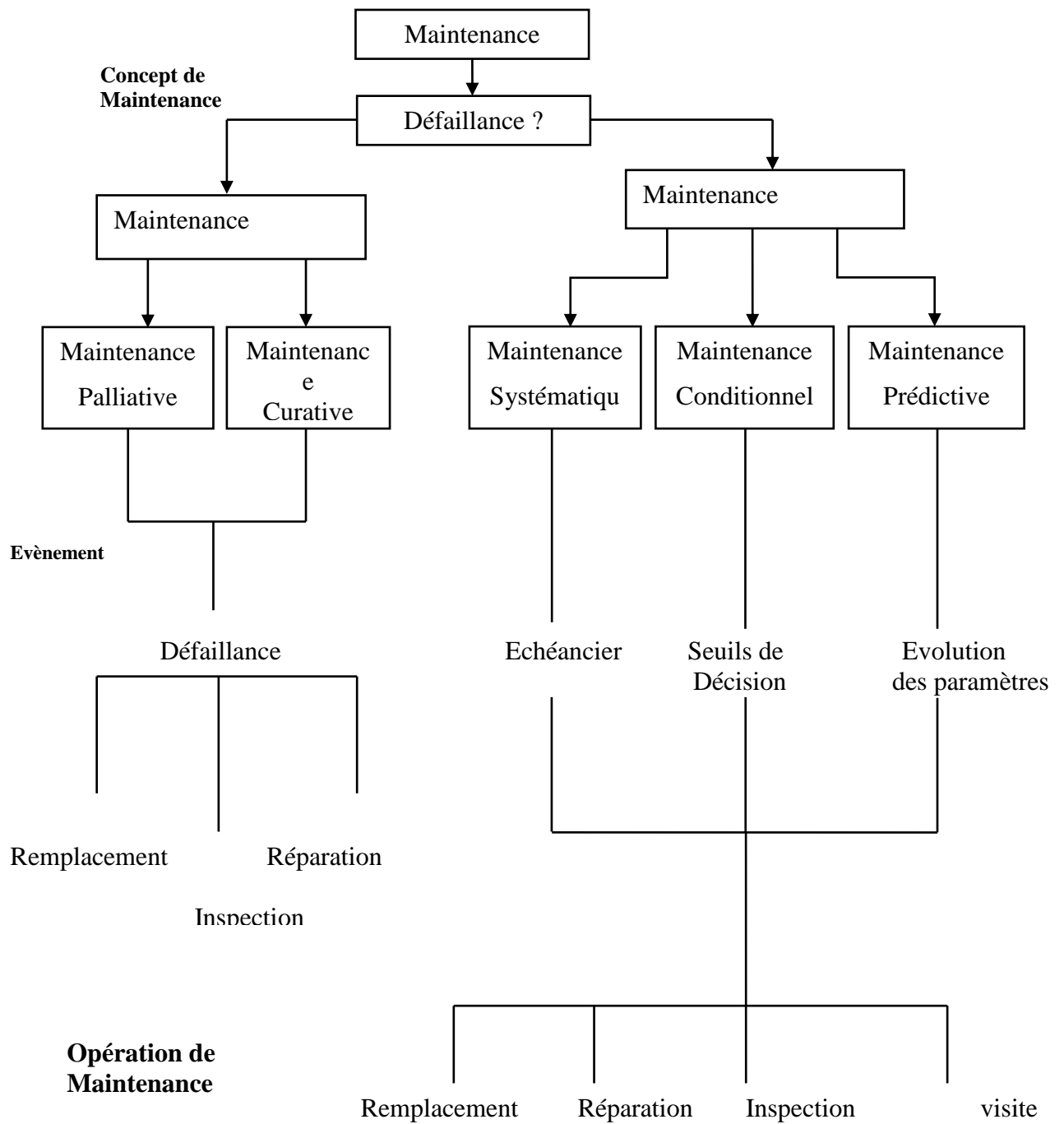


Fig.1.1: Les Différentes Stratégies De la Maintenance

1.3.2.1 Maintenances correctives :

a. Définition :

La norme (NF EN 13306) définit ainsi la maintenance corrective : « Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Ou bien c'est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction, elle a alors pour but de le remettre en état de marche.

C'est une forme de maintenance dont l'attitude consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention.

Il faut distinguer là, deux aspects : la maintenance palliative et la maintenance curative.

Maintenance palliative : appelée dépannage, dont l'objectif est de supprimer les effets de la défaillance et remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal.

Maintenance curative : appelée réparation, dont l'objectif est de ramener le système à un niveau de performance optimal. Son caractère inéluctable ne doit cependant pas faire oublier que cette maintenance doit faire l'objet d'une réflexion approfondie pour être optimisée en mettant tout en œuvre pour intervenir dans les meilleures conditions :

-disponibilité des moyens nécessaires : documentation à jour, pièces de rechange nécessaires, outillages et moyens techniques, etc. ;

-maîtrise par les intervenants d'une méthodologie d'intervention intégrant une méthodologie de diagnostic, etc.

De la même façon, ces défaillances dont on attend l'apparition, seront gérées en amont comme en aval de l'intervention et il sera nécessaire de bien définir la procédure de gestion en ce qui concerne :

1-la rédaction d'un compte rendu d'intervention ;

2-la mise à jour des documents techniques schémas, plans, etc. ;

3-l'optimisation du stock de pièce de rechange.

Cette exploitation de l'événement défaillance sera aussi l'un des points permettant de définir et d'optimiser ultérieurement la maintenance préventive qui pourra être définie quelle qu'en soit la forme [31].

La solution de maintenance corrective, n'intervenant qu'en cas de panne, est abandonnée dès que les exigences de coûts, de qualité et de sécurité deviennent primordiales. La maintenance devient alors préventive, et peut être systématique ou conditionnelle.

1.3.2.2 La maintenance préventive :

a. Définition :

La maintenance préventive a pour objet de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Elle est effectuée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits. Par ailleurs, une maintenance préventive est intéressante, en considérant le coût comme critère d'évaluation, si les coûts induits par la perte de performance sont élevés et si les coûts de réparation et d'inspection sont relativement faibles par rapport aux premiers.

La maintenance préventive est « la maintenance destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien » [31].

Une opération de maintenance préventive est donc une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée.

A partir de cette définition générale, on distingue trois variantes qui peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre:

- ❖ maintenance préventive systématique ;
- ❖ maintenance préventive conditionnelle ;
- ❖ maintenance préventive prévisionnelle.

Des lors que le taux de défaillance $\lambda(t)$ estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), peut être obtenu pour des composants, et des systèmes, à partir des retours d'expériences.

La vie des équipements se présente en trois phases:

phase de jeunesse : $\lambda(t)$ décroît rapidement.

Phase de maturité : $\lambda(t)$ est pratiquement constant.

Phase de vieillesse : $\lambda(t)$ croît rapidement.

Tous les programmes de gestion de maintenance préventive sont basés sur la période écoulée ou les heures de fonctionnement.

La (Fig.1.2) illustre la vie statistique d'une machine (taux de défaillance en fonction du temps, appelée aussi courbe en baignoire. La première phase indique qu'une nouvelle machine a une probabilité élevée de défaillance, en raison des problèmes d'installations pendant les semaines premières de l'opération, on ne pratique que la maintenance corrective.

C'est seulement dans la seconde phase que la maintenance préventive est justifiée, la probabilité de défaillance est relativement basse pendant une période prolongée. Après cette période normale de vie de cette machine, la probabilité de panne augmente brusquement avec le temps écoulé.

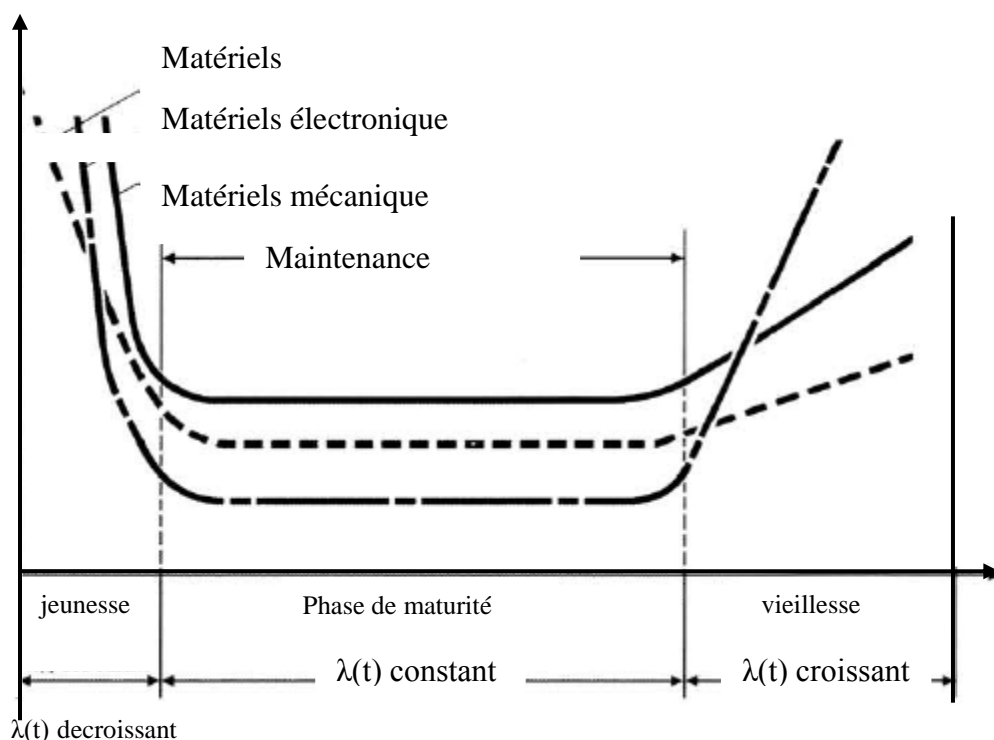


Fig.1.2:Taux de défaillance en fonction du temps [26].

b. La maintenance préventive systématique :

D'après la norme AFNOR X 60-010; la maintenance préventive systématique est une forme de maintenance dont « les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, et ce de façon périodique ».

Cette définition est illustrée dans la (Fig. 1.3) avec :

T : la période d'intervention prédéterminée,

I_{ps} : chaque intervention préventive systématique

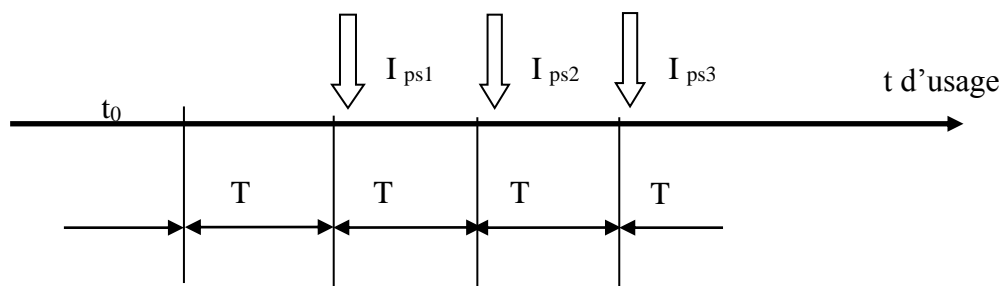


Fig.1.3:Illustration du principe de la maintenance

La période T doit être définie en fonction du risque de panne $MTBF =$ Moyenne des temps de bon fonctionnement.

On a $MTBF = k$. $MTBF$ (k étant < 0)

Si T est court \Rightarrow coût I_{ps} élevé, si T est long \Rightarrow coût I_{mc} élevé.

Elle peut être justifiée par : $C_d > C_{ip}$ (Coût défaillance $>$ Coût intervention préventive), et on peut la déterminer à l'aide des simulations économiques, loi de Weibull et les abaques d'optimisation.

La maintenance préventive systématique est souvent la première stratégie de maintenance préventive qui est mise en place dans un secteur productif car c'est celle qui a priori, paraît la plus simple à mettre en œuvre, mais, elle peut parfois s'avérer onéreuse par le caractère systématique des interventions et des remplacements de pièces sans signe avant-coureur de défaillance.

Cependant, elle se heurte à deux obstacles majeurs qui, s'ils ne sont pas bien identifiés et si on n'y apporte pas de solution satisfaisante, peuvent faire échouer le projet :

c. Détermination précise de l'échéancier d'intervention :

Cette détermination est basée sur l'expérience, essentiellement sur les données de fiabilité expérimentale, des composants et/ou sous-ensembles concernés. Elle nécessite de connaître suffisamment bien le comportement du bien en exploitation.

En effet, intervenir trop tôt conduit rapidement à des coûts prohibitifs qui réduisent à néant les avantages que l'on peut espérer de cette maintenance.

Mais intervenir trop tard rend inopérante la maintenance préventive, et on se retrouve placé dans une stratégie de maintenance corrective.

d. Planification des interventions de maintenance systématique :

La planification est faite en fonction des arrêts de production planifiés : lorsque l'intervention prévue de maintenance systématique nécessite l'arrêt du bien, il est évident que, sauf circonstances particulières (fonctionnement à « feu continu », risques liés à sécurité,...) cet arrêt de coordination indispensable conduit souvent :

1- Soit à anticiper les interventions et dans ce cas on risque de perdre tout ou une partie des avantages de la maintenance systématique, avec en particulier une augmentation des coûts liés à une surconsommation de pièces de rechange par exemple,

2- Soit à retarder la réalisation des interventions avec le risque, difficile à évaluer, d'une défaillance se produisant avant l'intervention. Ce scénario, qui conduit à effectuer de la maintenance corrective subie et non plus gérée, est plus fréquent qu'on ne l'imagine et fait perdre toute crédibilité à la politique de maintenance préventive mise en place [31].

Le systématique s'applique donc, prioritairement, à des matériels à forte valeur ajoutée et/ou vitaux dans le processus de production, à des matériels dont le taux de défaillance est le plus constant, également, aux systèmes dont une défaillance peut présenter un risque aux personnes [33].

e. Enjeux de la maintenance :

Dans le contexte économique et concurrentiel actuel, la réduction des coûts de production est la clé du développement et de la survie de l'entreprise.

La maintenance à un coût et il importe de trouver le niveau optimum qui maintiendra au moindre coût l'installation à niveau sans mettre en danger la sécurité des personnes.

Comme illustré dans la (Fig.1.4), si l'on ne maintient pas l'installation, on aura trop d'incidents et leur coût va croître. À l'inverse, si l'on fait trop de maintenance préventive, le coût total va augmenter.

La maintenance optimale est donc un mélange harmonieux d'entretien préventif et d'entretien correctif, et chaque industrie doit trouver son niveau à atteindre.

La surveillance des matériels permet de diminuer le niveau d'entretien préventif sans prendre de risque supplémentaire car on continue à s'assurer que le matériel ne présente pas d'anomalie. On peut donc diminuer les coûts, si toutefois le coût de la surveillance reste limité.

C'est pourquoi la mise en place d'un programme de maintenance, qui permet de répondre à un tel défi, doit réellement être une volonté de la direction et un projet de l'entreprise.

Elle s'intègre dans la politique de maintenance et doit assurer:

1-la prévention des risques majeurs: arrêt des machines lorsque les conditions de sécurité (pour l'homme ou pour la machine) ne sont pas satisfaisantes;

2-la détection précoce des anomalies: pour éviter au maximum les avaries en remplaçant les composants défectueux si possible avant incident et au meilleur moment ;

3-l'analyse après incident: pour remédier aux défauts constatés, et éviter de les retrouver à l'avenir, ou définir les modifications nécessaires [34].

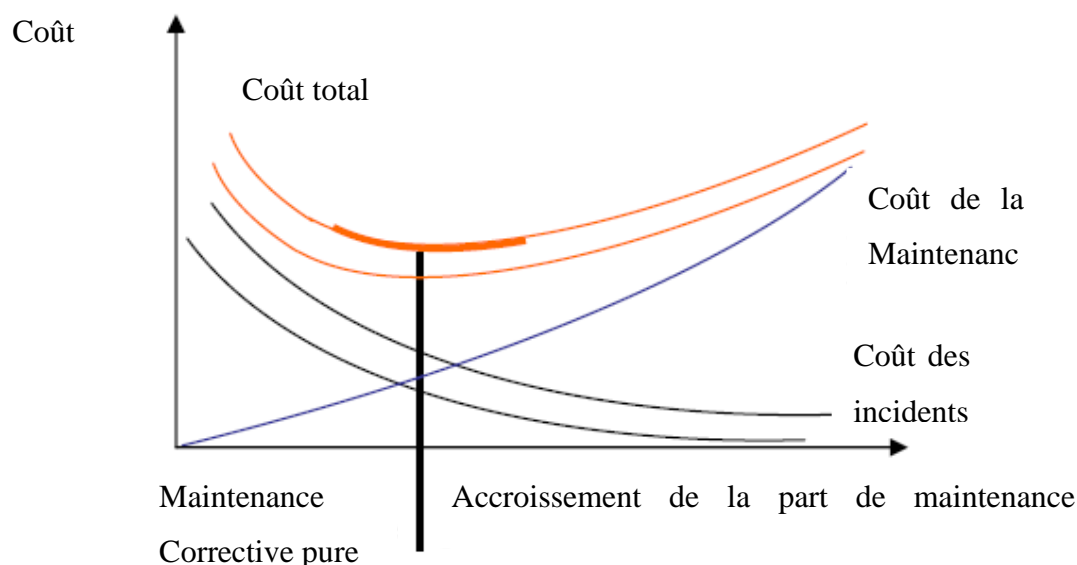


Fig.1.4: Dosage optimal de MP et MC [27-28].

Le défi doit trouver le point optimum d'équilibre, comme représenté sur la (Fig.1.5), il faut mieux considérer une zone satisfaisante que d'essayer de trouver un point optimum précis.

Graphiquement, chaque point sur la courbe du coût total représente la somme des coûts préventifs plus des coûts de maintenance corrective plus des coûts perdus de revenus.

Cependant, la dispersion de géométrie, l'hétérogénéité des matériaux utilisés ou les surcharges d'utilisation peuvent entraîner des défaillances avant la date optimale prévue. C'est pourquoi pour des systèmes mécaniques où la sécurité est un paramètre de grande importance, la maintenance préventive conditionnelle est appliquée.

f. La maintenance préventive conditionnelle :

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance conditionnelle ainsi : « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service ».

Donc il n'y a plus d'échéancier mais plutôt un événement, une condition, le franchissement d'un seuil, qui provoque l'intervention. Le signal peut être donné par un capteur décelant une dérive de comportement (élévation de température, modification du niveau vibratoire, fuite usure, etc.)

À tout type de système pour lequel un capteur sait détecter une anomalie et c'est d'ailleurs grâce au développement de la technologie de ces capteurs que cette forme de maintenance a pu faire de tels progrès ces vingt dernières années.

Comme elle peut être appliquée suite d'une inspection ou d'un contrôle. Ainsi, le système n'est arrêté que lorsqu'il existe une certaine probabilité de défaillance, définie par l'analyse de niveaux d'indicateurs issus de mesures et établis en permanence au cours du fonctionnement.

g. Illustration Du Principe De La Maintenance Conditionnelle :

Puisque la maintenance préventive conditionnelle est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques de surveillance de l'état du bien (fiabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien.

Cette opération nécessite de procéder au préalable au choix d'un certain nombre d'indicateurs de surveillance, issu d'un paramètre ou d'une grandeur plus ou moins élaborée dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement.

Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut ou d'un ensemble de défauts [35].

La (Fig.1.6) illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée I_{pc}).

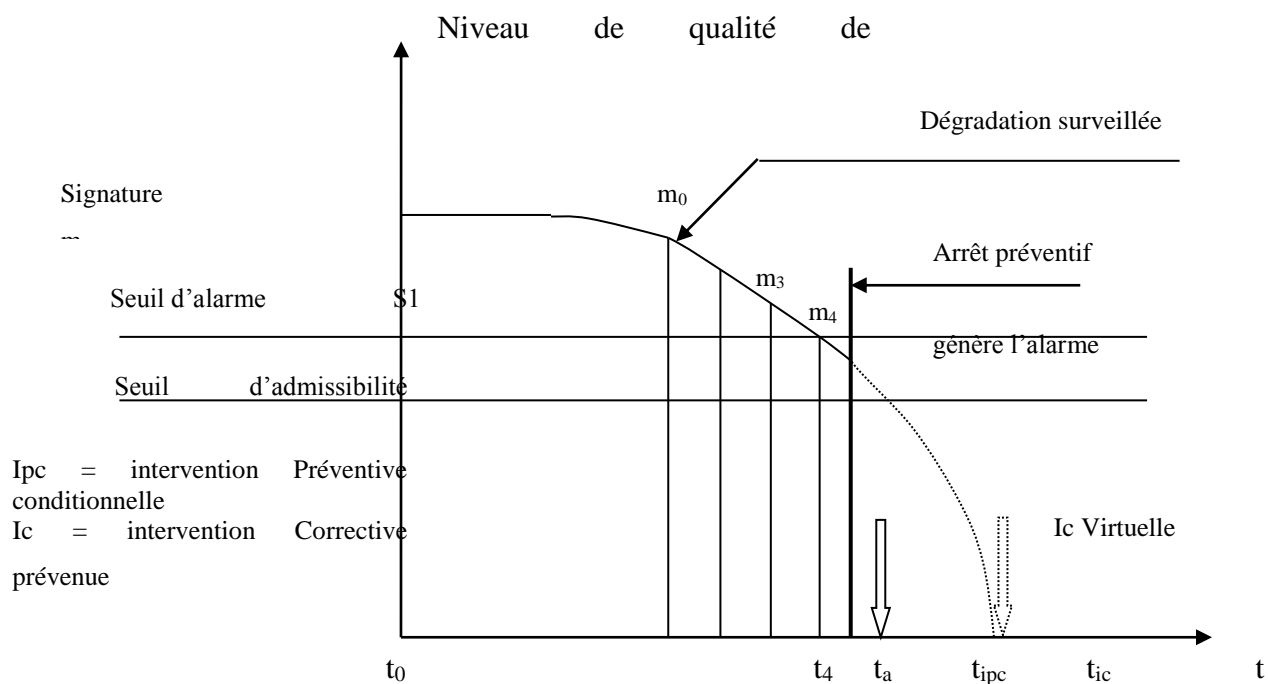


Fig.1.5: Principe de la maintenance conditionnelle [35]

La « signature » est une prise de référence de l'état de « bon fonctionnement » à l'origine. Les mesures peuvent être de simples observations visuelles, des images (spectre...). Elles peuvent être remplacées par des alarmes pré-réglées, ou des inspections, espacées de Δt de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

Les mesures peuvent ne pas être effectuées si $\Delta t < t_{admissibilité} - t_{alarme}$ si l'on connaît la loi de dégradation.

Les mesures peuvent être collectées par rondes ou « monitorisées » au central de surveillance.

1-l'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme, ou différé par décision volontaire jusqu'à l' I_{pc} programmée et organisée.

2-l'intervention I_{pc} sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de « réaction » du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct $C_{I_{pc}}$ sera par nature (choix de la dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée.

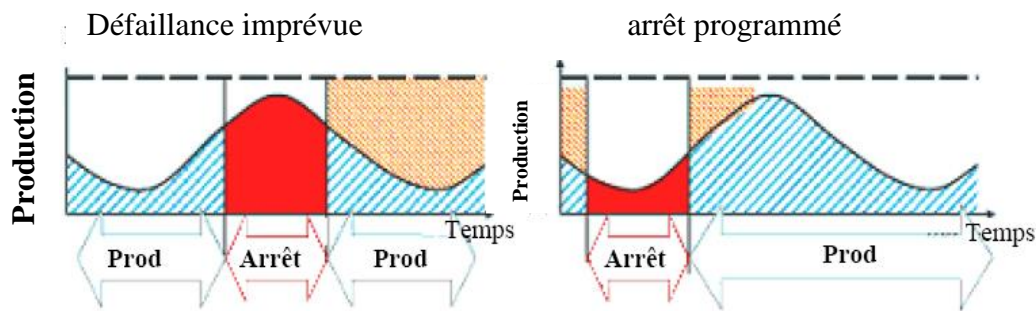


Fig.1.6 : Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production [36].

h. Outils de la maintenance préventive conditionnelle :

Une variété de technologies peuvent, et devraient être utilisées en tant qu'élément d'un programme de maintenance préventive. Puisque les systèmes ou les machines mécaniques occupent la plupart d'équipement d'usine, la surveillance de vibration est généralement la composante clé de la plupart des programmes d'entretien prédictif. Cependant, la surveillance de vibration ne peut pas fournir toutes les informations exigées pour un programme d'entretien préventif réussi.

j. Les objectifs visés par la maintenance conditionnelle [32-33-36] :

1-Améliorer la fiabilité du matériel

La mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle nécessite les analyses techniques du comportement du matériel.

Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.

2-Garantir la qualité des produits

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance, et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés. La qualité des produits est ainsi assurée, et l'augmentation du rendement est plus sensible.

3-Améliorer l'ordonnancement des travaux

Les machines de production étant surveillées en permanence, le risque d'avarie grave et inattendue est pratiquement nul.

Cette garantie de fonctionnement sans interruption lourde permet d'envisager une réduction des en-cours de production, et une diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs.

Cela implique une bonne coordination entre les deux services (production et maintenance) pour la planification des interventions et le respect du planning.

4-Assurer la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning; elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

5-Améliorer la gestion des stocks

La surveillance rapprochée permet le fonctionnement d'organe jusqu'au maximum de leur durée de vie évitant ainsi la dépose et le rebut d'éléments encore capables. Ainsi, il en ressort une diminution sensible des stocks nécessaires de pièces de rechange, avec l'approvisionnement des pièces de rechange selon les besoins réels. La précision des seuils d'alarme et une bonne organisation aident à planifier les interventions et concourent à des commandes de remplacement en juste à temps.

6-Améliorer le climat de relation humaine

Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production.

Certains problèmes, comme par exemple le manque de pièces de rechange, entraîne l'immobilisation de la machine pendant longtemps, ce qui provoque une tension entre la production et la maintenance.

Par l'utilisation de techniques modernes pratiquées avec du matériel de haute technologie qui concoure à des interventions plus ciblées et bien organisées (localisation préalable des pannes).

7-Réduction du coup global de maintenance

La maintenance conditionnelle a pour principal objectif l'amélioration et l'augmentation de la disponibilité des équipements. Pour cette forme de maintenance, les arrêts systématiques sont supprimés et l'augmentation du rendement est plus sensible.

Le coup global de la maintenance est allégé car, la surveillance permet de déceler les petits défauts de conception ou de fonctionnement, de plus, l'observation de l'évolution d'une dégradation évite les destructions d'organes voisins par défaillance secondaire. Le risque de casses importantes et traumatisantes pour l'ensemble d'une machine, étant écarté, la durée de vie des systèmes est allongée.

8-Maintenance prédictive (prévisionnelle) :

La maintenance prévisionnelle est le stade ultime de la maintenance, qui est exécutée « en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » (norme NF EN 13306).

C'est une approche relativement récente qui repose, comme la maintenance conditionnelle, sur la technologie des capteurs mais privilégie l'évolution des informations qu'ils délivrent plutôt que le simple franchissement de seuils prédéterminés.

Elle est en effet, basée sur l'analyse de l'évolution des paramètres techniques qui permettent de qualifier l'état de bien, et de déceler les dégradations potentielles dès leurs apparitions de façon précise, et permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée au mieux des intérêts de la production, notamment en les intégrant, dans la mesure du possible, dans les arrêts techniques de fabrication.

Cette planification se traduit par une réduction sensible des coûts de remise en état, et de la durée d'immobilisation de l'équipement et permet d'optimiser la gestion du stock de pièces de rechange [37].

Elle est particulièrement adaptée aux dégradations progressives dont on ignore les seuils [33].

Les informations fournies par les outils de la maintenance conditionnelle peuvent être utilisées mais doivent être regroupées, ordonnées, corrélées.

Seul un outil informatique tel qu'un système expert permet une gestion efficace tant au niveau de la synthèse de l'information collectée, des interactions entre les différents paramètres, de l'arborescence des causes de défaillances, qu'à l'élaboration d'éléments de décision permettant de limiter les opérations de maintenance au résultat requis [31].

1.La mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle :

La mise en place d'un programme de maintenance prévisionnelle et sa pérennité nécessitent une préparation minutieuse (Fig.1.7) qui peut se scinder en trois phases :

L'étude de faisabilité, le choix des acteurs et le démarrage du programme.

La méthodologie de la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle est proposée, en plusieurs étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l'I_{pc}.

- ◆ Sélection des défaillances à prévenir
- ◆ Sélection d'un (ou n) paramètre physique descriptif de l'évolution du défaut
- ◆ Choix des capteurs
- ◆ Choix du mode de collecte des informations
- ◆ Suivre le paramètre descriptif dans le temps à l'aide de courbes de tendance (maintenance continue ou périodique, périodicité à définir.)
- ◆ Choix du traitement de l'information.
- ◆ Établir des seuils limites d'avertissement (pré- alarme.).
- ◆ Établir le diagnostic de défaut.

- ◆ Prédire la date de bris (extrapolation de courbes.).
- ◆ Commander les pièces de rechange.
- ◆ Organisation de l'intervention conditionnelle Ipc.
- ◆ Bilan d'efficacité et retour d'expérience [38].

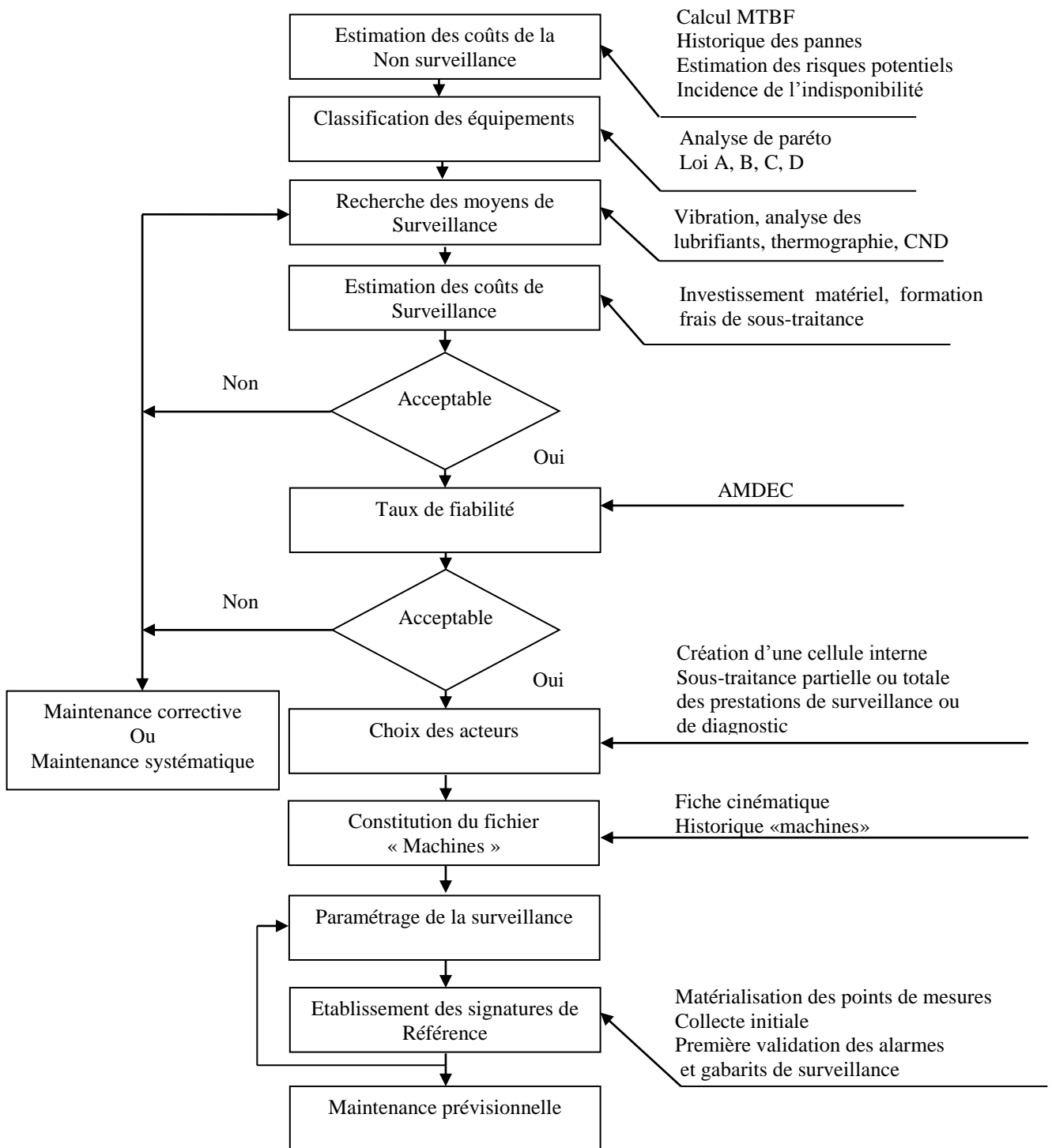


Fig.1.7: Le Chemin Logique De La Mise En Œuvre [37].

1.4 Optimisation de la maintenance conditionnelle prévisionnelle :

Beaucoup de programmes de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances.

Ces résultats quelques peu décevants n'ont pas été provoqués par la limitation de technologie, mais plutôt par deux problèmes importants concernant respectivement, la gestion et le financement notamment:

1. un problème purement organisationnel, logistique et culturel : sa mise en œuvre dans l'entreprise,
2. un problème financier et politique: le financement de l'approfondissement des connaissances sur le comportement aléatoire des machines en phase de vieillissement, le financement du développement des outils de surveillance et de diagnostic et des techniques d'investigation sur lesquelles elles reposent.

Comme minimum vitale, les étapes proactives suivantes peuvent éliminer ces restrictions et en conséquence aider à gagner les avantages maxima du programme de la maintenance prévisionnelle.

1.5 Éléments de comparaison :

1.5.1 Maintenance corrective :

Bien que, la défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants, les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Les contrôles des temps sont délicats, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions (coût de la main-d'œuvre élevés d'heures supplémentaires).

L'analyse des coûts d'entretien a prouvé que dépanner en mode réactif (c.-à-d., après la panne) sont normalement trois fois plus grands que même dépanner sur une base programmée. [33]

Pour pallier à cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance. Le nombre d'interventions reste en revanche faible.

1.5.2 Maintenance préventive systématique :

Le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, mais les défaillances soudaines ne le sont pas. Les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion des personnels et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux :

1-Bonne planification des opérations et des ressources;

2-Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation). Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreurs humaines susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

1.5.3 Maintenance préventive conditionnelle et maintenance prévisionnelle :

Maintenance relativement coûteuse par la technologie qu'elle suppose, et de sa mise en œuvre d'exiger un nombre important de capteurs et de systèmes de traitement de l'information qui sont eux-mêmes des sources de défaillances.

Elle présente néanmoins l'extrême avantage de pouvoir être appliquée à des matériels dont le comportement est peu ou pas connu. Elle offre malgré tout l'intérêt de pouvoir éviter un aléa tout en exploitant les composants au maximum de leur durée de vie'' l'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique'' par le remplaçant des pièces défectueuses uniquement, donc la suppression des défauts de jeunesse lors de la remise en route après un entretien systématique.

De plus, le nombre d'interventions est réduit au strict nécessaire, avec une amélioration de la disponibilité et de la sécurité, pour un taux de défaillance faible [31].

Les moyens de surveillance et de suivi, nous l'avons vu, sont multiples et variés. Si dans la plus part des cas le procédé s'impose de lui-même, souvent la difficulté repose sur le choix le plus judicieux à opérer.

Voire même le recours à plusieurs techniques différentes s'impose parfois pour regrouper les informations.

Ainsi donc la maintenance préventive conditionnelle requiert de solides compétences en technique et analyse et une formation régulièrement actualisée pour des techniciens.

Le choix des moyens doit être judicieusement effectué et présenter un compromis idéal entre investissement et rentabilité attendue.

Lors de la mise en place d'une maintenance préventive conditionnelle, une prise en compte de critères tels que ceux qui suivent doit permettre des choix :

- nombre de points de surveillance ;
- gravité de la dérive d'état ;
- incidence de l'avarie sur la sûreté de fonctionnement ;
- coût de mise en œuvre et coût d'usage;
- formation des techniciens... [31- 33-38]

1.6 Modélisation et évaluation de la maintenance :

1.6.1 Modèles de maintenance :

Lorsqu'on doit faire un choix vis-à-vis d'une politique de maintenance, l'efficacité des décisions qui sont prises va dépendre de la qualité du modèle qui représente le système. La modélisation du système permet en effet d'avoir accès au comportement "a priori" du système en termes de probabilité d'occurrence : probabilité de tomber en panne à chaque instant, probabilité d'être dans un état de dégradation donné en fonction du temps, etc... Cette représentation est indispensable pour pouvoir évaluer les coûts de maintenance sur une période donnée et prévoir les interventions. Mais elle peut être complétée par des informations de données en ligne ou ponctuellement sur l'état réel du système.

C'est le cas par exemple lorsqu'un dispositif de surveillance signale la panne totale du système dès son occurrence, lorsqu'il indique en continu le niveau de dégradation du système ou lorsqu'il rend compte ponctuellement de l'état "courant" d'un système après inspection. On oppose donc à l'état "courant" donné par la surveillance, l'état "probable" donné par le modèle.

Les informations sur l'état courant permettent d'élargir considérablement l'ensemble des actions de maintenance possibles : on peut envisager d'intervenir à un moment précis.

Les actions de maintenance qui s'appuient à la fois sur la modélisation du système et les informations données par le dispositif de surveillance seront dites conditionnelles.

Le terme "conditionnel" indique ici que l'on agit en fonction de la condition, de l'état du système (panne, dépassement d'un seuil de dégradation). Les actions de maintenance qui se fondent uniquement sur le modèle de durée de vie du système seront dites systématiques : elles consistent à prévoir des échéances fixes sur le système indépendamment de l'état d'usure, de marche ou de panne.

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

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

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

Les états menant à la défaillance du système sont généralement modélisés de l'une des manières suivantes [39] :

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

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

- Soit comme une “boîte noire” qui est à l'opposé du modèle conceptuel (“boîte blanche”).

La “boîte noire” est un modèle empirique où on ne cherche pas à comprendre pourquoi le système fonctionne comme on l'observe mais à décrire les relations entre variables de sortie et variables d'entrée, généralement à partir d'une analyse statistique des entrées et des sorties.

Ce modèle correspond à une approche statistique (modèle de durée de vie) ;

- Soit comme une “boîte grise” qui est un bon intermédiaire entre la “boîte blanche” et la “boîte noire”. La “boîte grise” correspond à une approche stochastique : la dégradation du système peut être modélisée par un processus stochastique basé sur des quantités mesurables corrélées au niveau de dégradation.

Lorsque la transparence du modèle dans le cas de la “boîte blanche” devient moins nette à cause des relations masquées par des processus non décrits, on parle alors de “boîte grise”.

Dans la “boîte noire” qui est un modèle déterministe, on cherche à associer une sortie à une entrée, et l'on affecte à cette sortie une probabilité d'occurrence. Alors que dans la “boîte grise” qui est un modèle stochastique, on associe, pour une entrée donnée une distribution de probabilité des sorties. Ce type de modèle est très utile en mode prédictif où l'on peut évaluer l'évolution du système en fonction d'un comportement aléatoire des variables.

Ensuite, il faut déterminer les différentes actions de maintenance disponibles qui peuvent être de deux types : de type surveillance (inspections) ou curative (remplacements, réparations) - et la qualité de ces actions :

1/inspections parfaites ou non ;

2/remplacements et réparations permettant de remettre le système dans un état aussi bon que neuf (**AGAN : As Good As New**) ou non et, dans ce cas, il faut arriver à déterminer l'efficacité des actions de maintenance.

L'étape suivante consiste à définir la classe des règles de décision à étudier (markovienne ou dépendante de l'histoire, déterministe ou stochastique). On s'intéressera au cas où la politique de maintenance peut être décrite au travers d'une structure, il faudra alors chercher les paramètres de décision (des seuils, la période d'inspection, par exemple) correspondants.

Dans ce cas, l'optimisation de la règle de décision se ramène à un problème d'optimisation de paramètres.

1.6.2 Modèle de la maintenance industrielle préventive [40] :

- **Le modèle de maintenance parfaite :**

Le modèle de maintenance parfaite considère que chaque maintenance remet le système à neuf.

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

$$\lambda_t = \lambda (t - TN_i) \quad (1.1)$$

La figure 1.8 représente une trajectoire de l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances AGAN.

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

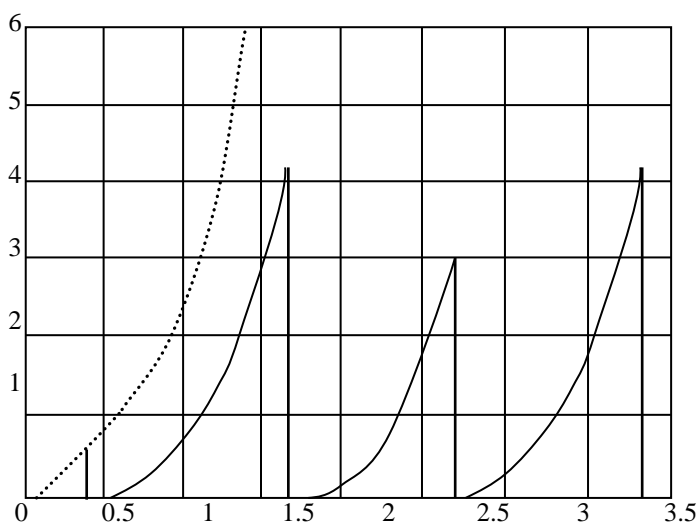


Fig.1.8 : Intensité dans le cas AGAN (As Good As New)

- **Le modèle de maintenance minimale :**

Le modèle de maintenance minimale suppose que l'effet de la maintenance est de remettre le système en fonctionnement dans l'état exact ou il était juste avant la défaillance.

Cela caractérise un effet de maintenance neutre (n'améliore pas et ne dégrade pas le système).

Le système après maintenance est dit aussi mauvais que vieux ou en anglais As Bad As Old (ABAO) (Figure 1.9).

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

$$\lambda_t = \lambda(t) \tag{1.2}$$

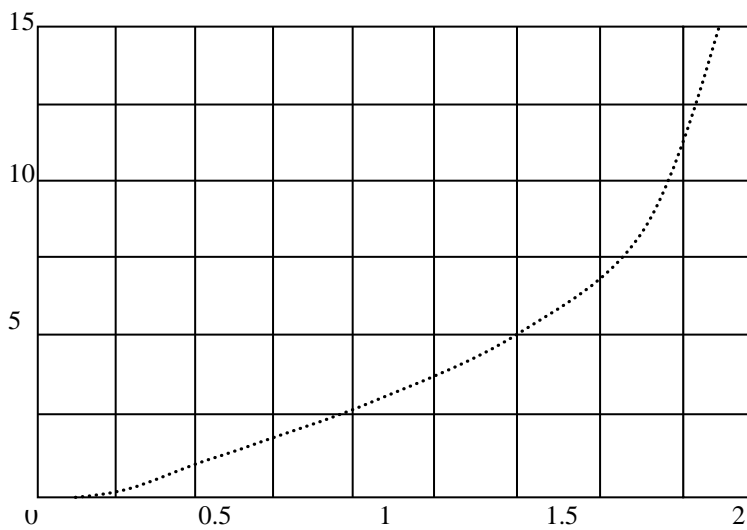


Fig.1.9 : Intensité dans le cas ABAO [34]

1.7 Conclusion

D'une façon générale, ce chapitre souligne l'impact de la maintenance sur les performances d'un système en termes de disponibilité, de sûreté et de coûts. La maîtrise dans la pratique d'une maintenance gérée rationnellement pourra soulager notre industrie. Le problème étant de savoir dans quelle mesure cela est possible et couramment renforcer la gestion dans l'approche d'une fonction maintenance plus adéquate répondant à nos propres conditions industrielles.

Il faudrait oser investir dans une gestion rationnelle de politique de maintenance car la théorie et la pratique le confirment.

Il est vrai également que, dans certaines entreprises, la maintenance préventive a été hypertrophiée, générant plus de dépenses que gains potentiels. Ceci montre que la

maintenance préventive n'est pas une panacée et que le « tout préventif » n'est pas sauf exception, la finalité ultime.

Donc la meilleure stratégie de maintenance sera celle qui, dans un contexte donné, assurera un équilibre entre maintenance corrective et maintenance préventive permettant d'une part, à chacun des critères d'être à son optimum et, d'autre part, d'atteindre les objectifs fixés en termes de disponibilité. Cependant la maintenance ne peut imposer sa vision à long terme que si elle n'est pas en état de dépendance (hiérarchique et budgétaire) par rapport à la production.

Chapitre 2

Le problème d'optimisation de politique de maintenance

2.1 Introduction

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. En effet, l'évolution technologique, l'esprit innovateur des entreprises et leur souci continu de réduire la fréquence des pannes de leurs équipements, font de la maintenance un outil indispensable à la bonne marche d'une entreprise. Tous les secteurs d'activité sont concernés et ceux qui peuvent se payer le luxe de négliger l'état de leur outil de production sont rares. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures actuelles qui sont figées et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels.

Sachant que la réduction des coûts et des temps d'immobilisation n'est possible que si le matériel et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable. Il est donc nécessaire de préparer le travail et d'étudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles, et les dates d'exécution des interventions [44].

L'optimisation de politique de maintenance est un sujet de plus en plus stratégique dans le milieu industriel. D'après [45] l'optimalité d'une politique de maintenance est définie de manière suivante :

Une politique de maintenance π^* est optimale parmi une classe de politique Π si les performances du système soumis à la politique π^* sur un horizon de travail T sont toujours supérieures aux performances du système soumis à toute politique π , avec $\pi \in \Pi$.

Généralement pour les modèles de maintenance, il est difficile de montrer l'existence et donc de surcroît de définir les politiques optimales [45].

On cherchera à optimiser (minimiser la fonction coûts d'une politique de maintenance en améliorant les critères suivants :

- Le critère de choix des instants d'interventions ;
- Les critères de choix des actions à appliquer ;
- L'adaptabilité aux facteurs réagissant sur le système (modéliser : l'influence de la maintenance préventive sur la fiabilité des composants, la dépendance inter-composants...)

2.2 L'optimisation de la maintenance :

2.2.1 Introduction :

La fonction maintenance conditionne fortement le niveau de performance d'une installation. Son optimisation est complexe car elle doit prendre en compte différents critères parfois antagonistes comme par exemple la disponibilité et les coûts [46], [47].

Par ailleurs, il y a une multitude de façons de maintenir une installation. On peut jouer sur le type de maintenance, sur les types de tâches, sur leur fréquence, sur le niveau d'intervention, etc...

Pour effectuer ces choix stratégiques, des méthodes permettant d'optimiser les performances des systèmes sont appliquées, parmi lesquelles l'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité [48]. Les responsables de maintenance en viennent ainsi à envisager de véritables stratégies et ne se contentent plus de surveiller et de réparer. Ils cherchent à prévoir les événements et d'évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à eux pour exploiter au mieux les installations en fonction des contraintes techniques et budgétaires imposées.

Les décisions sont majoritairement prises sur la base d'informations qualitatives fournies par des experts et quelquefois appuyées par des données de retour d'expérience, ou REX. Il serait toutefois utile de pouvoir effectuer des choix sur des critères quantitatifs décrivant les performances des programmes de maintenance [49].

2.3 Les méthodes d'optimisation de la maintenance :

Au vu de l'importance du processus maintenance et de son impact sur les performances des installations, des méthodes d'optimisation ont été développées. Elles permettent d'aider les responsables de maintenance à construire ou à modifier les stratégies de maintenance.

L'étude de [50] présente les principales méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance en soulignant les différents objectifs qui ont guidé leur développement.

On peut noter que certaines méthodes d'optimisation de la maintenance ont été initialement développées dans les domaines de l'aéronautique et de la production d'énergie, en particulier pour les centrales nucléaires avant d'être adaptées et appliquées dans d'autres secteurs industriels. En effet, les risques présentés par ce type

d'installations pour les personnes et l'environnement implique une vraie rigueur dans leur exploitation et leur utilisation. Il existe un réel souci d'appréhension des limites,

pour réduire au maximum les dangers mais aussi diminuer les interventions inutiles. Ainsi, la sûreté et la sécurité ont été à la base des documents [51] établis par le Maintenance Steering Group pour définir et décrire le programme de maintenance préventive du Boeing 747.

Ces objectifs ont également guidé la définition de la Reliability Centred Maintenance, et des méthodes de Risk-Based et Risk-Informed.

Les études [52] de Reliability Centred Maintenance menées par l'Electric Power Research Institute pour l'industrie nucléaire américaine ont été principalement motivées par la maîtrise des coûts. La disponibilité est le facteur prépondérant dans la mise en œuvre des actions Total Productive Management.

Les démarches d'optimisation de la maintenance consistent généralement à effectuer une analyse des risques ainsi qu'une étude du retour d'expérience de manière à pouvoir sélectionner les tâches de maintenance. Dans ce cadre, EDF a mis en œuvre une démarche nommée OMF, aujourd'hui utilisée par d'autres secteurs industriels, et motivée par l'ensemble des critères techniques : sûreté – disponibilité – coûts.

2.3.1 L'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité :

L'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité a été développée par EDF à partir de 1990, [11]. Elle se base sur le MSG-3 [51] et la méthode RCM, Reliability Centred maintenance, de l'Electric Power Research Institute, son homologue américaine en R&D. Après des études pilotes, une première mise en œuvre a été faite des 1993 sur les systèmes considérés comme les plus importants vis-à-vis des critères de sûreté-disponibilité coûts d'exploitation des centrales nucléaires.

A partir de 1995, la méthode a été adaptée et appliquée à d'autres types d'installations (centrales thermiques charbon, turbines à combustion, lignes de transport d'électricité, éoliennes,...), [53].

L'extension à d'autres secteurs industriels (automobile, offshore,...) s'est ensuite faite par l'intermédiaire de sociétés prestataires de services en maintenance.

Une méthode de seconde génération a été développée en 2003 pour permettre notamment la révision des programmes de maintenance préventive établis avec la méthode initiale, et l'analyse des systèmes de moindre importance.

Enfin, les principes de l'OMF ont été utilisés pour considérer la maintenance et le soutien logistique dans la phase de conception des futurs réacteurs nucléaires.

2.3.2 Présentation de la méthode :

La méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité constitue une approche globale d'aide à la décision pour déterminer les actions de maintenance préventive permettant de maîtriser les coûts et le niveau requis de disponibilité d'une installation ou d'un système, et plus largement, pour garantir un niveau de sûreté de fonctionnement, [48].

C'est une démarche rationnelle qui vise à limiter au mieux les conséquences des défaillances d'origine matérielle, sur le fonctionnement de l'installation.

L'étude des systèmes et des matériels permet de déterminer :

- Ou les actions préventives sont nécessaires (sur quels matériels),
- Quelles sont les actions à effectuer,
- Quand (avec quelle fréquence) on doit les réaliser.

La figure 2.1 décrit les trois phases de la méthode OMF :

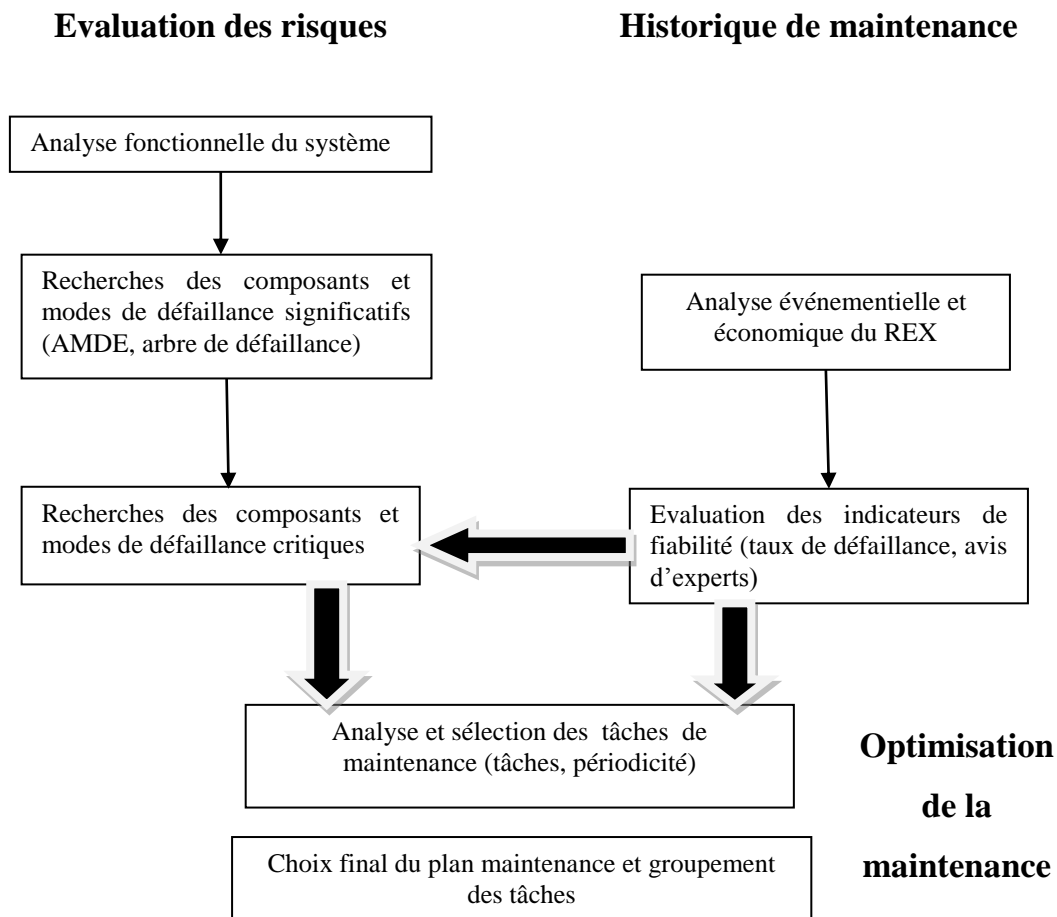


Fig. 2.1 : La méthode OMF.

2.4 Optimisation de la maintenance conditionnelle prévisionnelle :

Beaucoup de programmes de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances.

Ces résultats quelques peu décevants n'ont pas été provoqués par la limitation de technologie, mais plutôt par deux problèmes importants concernant respectivement, la gestion et le financement notamment:

1. un problème purement organisationnel, logistique et culturel : sa mise en œuvre dans l'entreprise,

2. un problème financier et politique: le financement de l'approfondissement des connaissances sur le comportement aléatoire des machines en phase de vieillissement, Le financement du développement des outils de surveillance et de diagnostic et des techniques d'investigation sur lesquelles elles reposent.

Comme minimum vitale, les étapes proactives suivantes peuvent éliminer ces restrictions et en conséquence aider à gagner les avantages maxima du programme de la maintenance prévisionnelle.

2.5 Comparaison entre les types de maintenance :

2.5.1 Maintenance corrective :

Bien que, la défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants, les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Les contrôles des temps sont délicats, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions (coût de la main-d'œuvre élevés d'heures supplémentaires).

L'analyse des coûts d'entretien a prouvé que dépanner en mode réactif (c.-à-d., après la panne) sont normalement trois fois plus grands que même dépanner sur une base programmée [54].

Pour pallier à cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance. Le nombre d'interventions reste en revanche faible.

2.5.2 Maintenance préventive systématique :

Le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, mais les défaillances soudaines ne le sont pas. Les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion des personnels et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux :

- Bonne planification des opérations et des ressources;
- Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation).

Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreurs humaines susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

2.5.3 Maintenance préventive conditionnelle et maintenance prévisionnelle :

Maintenance relativement coûteuse par la technologie qu'elle suppose, et de sa mise en œuvre d'exiger un nombre important de capteurs et de systèmes de traitement de l'information qui sont eux-mêmes des sources de défaillances. Elle présente néanmoins l'extrême avantage de pouvoir être appliquée à des matériels dont le comportement est peu ou pas connu. Elle offre malgré tout l'intérêt de pouvoir éviter un aléa tout en exploitant les composants au maximum de leur durée de vie'' l'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique'' par le remplaçant des pièces défectueuses uniquement, donc la suppression des défauts de jeunesse lors de la remise en route après un entretien systématique. De plus, le nombre d'interventions est réduit au strict nécessaire, avec une amélioration de la disponibilité et de la sécurité, pour un taux de défaillance faible [55].

Les moyens de surveillance et de suivi, nous l'avons vu, sont multiples et variés. Si dans la plus part des cas le procédé s'impose de lui-même, souvent la difficulté repose sur le choix le plus judicieux à opérer. Voire même le recours à plusieurs techniques différentes s'impose parfois pour regrouper les informations.

Ainsi donc la maintenance préventive conditionnelle requiert de solides compétences en technique et analyse et une formation régulièrement actualisée pour des techniciens.

Le choix des moyens doit être judicieusement effectué et présenter un compromis idéal entre investissement et rentabilité attendue.

Lors de la mise en place d'une maintenance préventive conditionnelle, une prise en compte de critères tels que ceux qui suivent doit permettre des choix :

- nombre de points de surveillance ;
- gravité de la dérive d'état ;
- incidence de l'avarie sur la sûreté de fonctionnement ;
- coût de mise en œuvre et coût d'usage;
- formation des techniciens... [54- 55-56]

2.6 Choix d'une politique de maintenance :

Vu que la maintenance exige une combinaison rationnelle des moyens et qu'elle est permanente, elle nécessite une politique d'entretien préalablement établie.

Les travaux de recherche dans le domaine maintenance ont pour objectif de définir une politique de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils adéquats et adaptée à un système mécanique complexe.

Cette politique de maintenance permettra ainsi à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement, et de décider des interventions de réparation (Fig.2.2) [57].

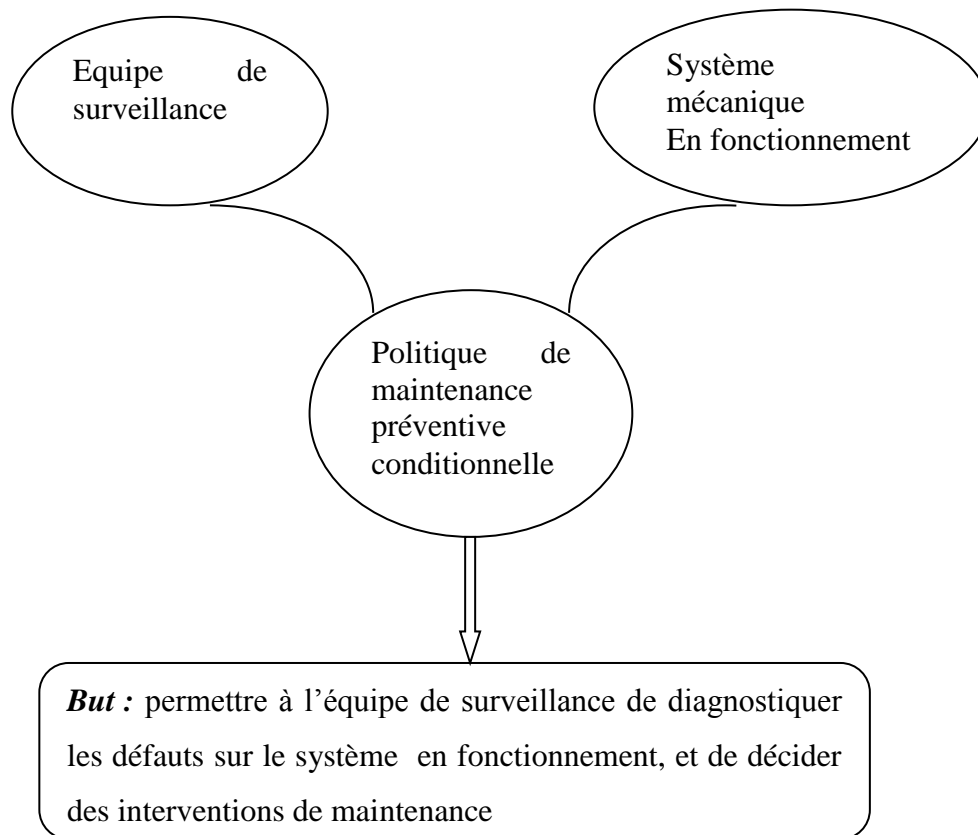


Fig. 2.2: énoncé de la fonction globale d'une politique de Maintenance préventive conditionnelle

En général, la politique c'est « l'art de gouverner », mais la politique de la maintenance c'est de définir au niveau de l'entreprise des objectifs technico-économiques, souvent doublés d'impératifs de sécurités et de contraintes réglementaires (normes anti-pollution par exemple) relatifs à la prise en charge des équipements par le service de maintenance.

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

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

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

Le coût global vaut :

Le coût total de maintenance ayant tendance à augmenter avec l'âge de la machine, et la valeur de revente à diminuer, il est intéressant de déterminer la durée au bout de laquelle on atteint un minimum [55]. Cette durée de vie optimale correspond à l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine (Fig.2.3).

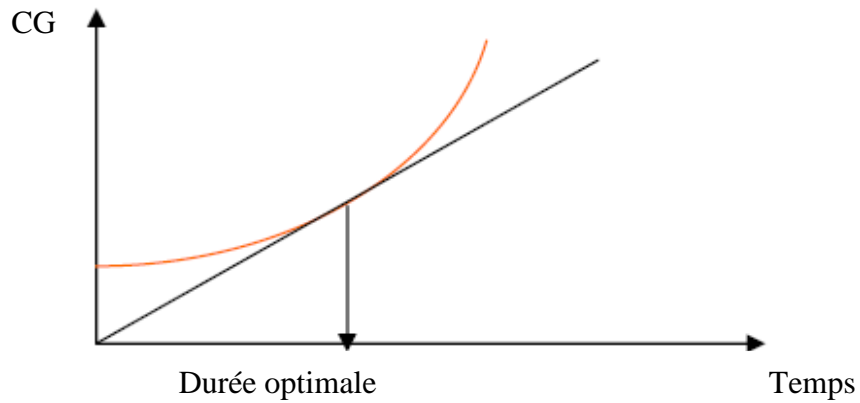


Fig.2.3: Détermination de la durée de vie optimale [55].

Le coût total de maintenance étant réalisé, il faut choisir pour chaque machine ou groupe des machines un type de maintenance appropriée.

On peut utiliser des critères de choix simple, résumés par des arbres (Fig.2.4).

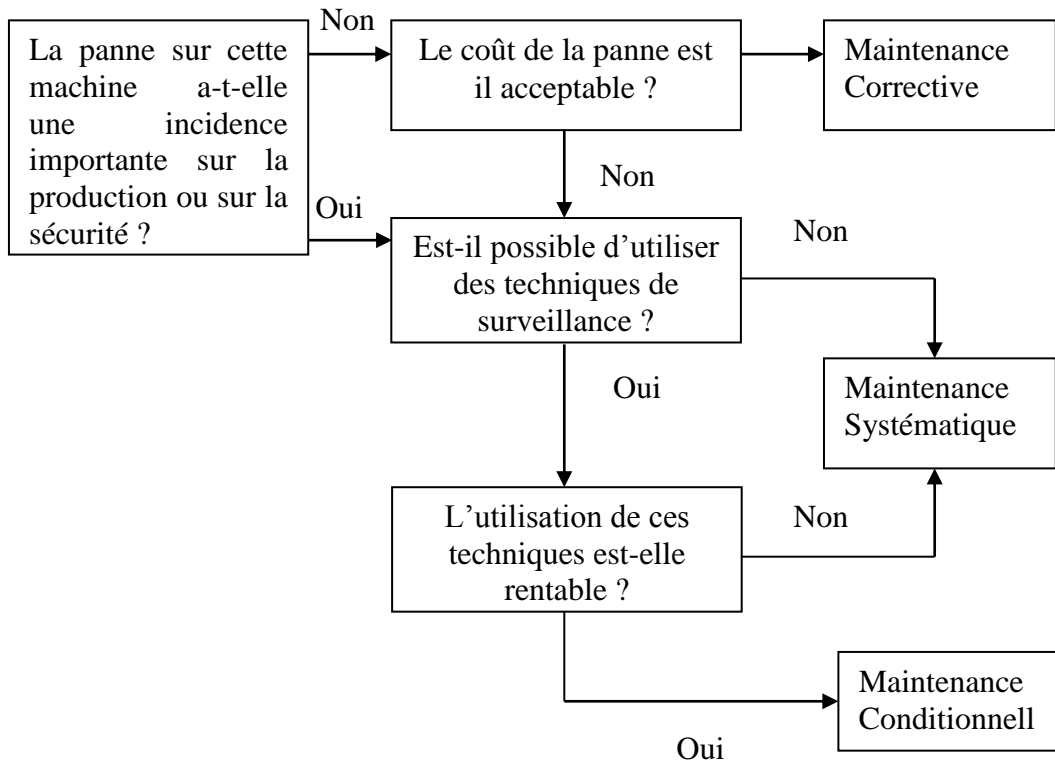


Fig. 2.4: Choix d'une politique de maintenance [55].

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

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

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

Selon que le composant présente des paramètres mesurables (huile dans une boîte à vitesse, éléments tournants, etc.), il faut choisir la maintenance conditionnelle sinon la maintenance systématique est adoptée.

On peut alors classer les éléments de la machine en fonction de la valeur de ce rapport en :

- ✓ vital (C/c élevé) ;
- ✓ important (C/c moyen) ;
- ✓ secondaire (C/c faible).

L'efficacité de la maintenance s'appuie sur une connaissance exhaustive du matériel et de son comportement. Il est utile de connaître l'évolution dans le temps de la fiabilité des éléments vitaux et de pouvoir préciser leurs types de défaillances probables. Ces connaissances proviennent de l'expérience sur le terrain mais aussi de l'exploitation statistique des défaillances constatées.

Le dossier machine, aussi appelé dossier technique d'équipement ou dossier de maintenance, est la référence permettant la connaissance intime d'un équipement, son origine, ses technologies et ses performances. La documentation relative à la connaissance individualisée d'une machine, de ses défaillances, de sa santé, est appelée dossier historique [55]. Ce dernier ne doit pas contenir trop d'informations pour ne pas nuire à son efficacité, mais s'il est trop succinct, il devient inutile, il comprend essentiellement deux parties :

La première concerne le fabricant, appelé dossier constructeur. Cette partie contient tous les documents fournis par ce dernier, la correspondance échangée et les documents contractuels qui lient le constructeur à l'entreprise.

La deuxième partie, appelée fichier interne, correspond à un fichier standard, établi et mis à jour par le bureau de méthodes.

Il doit être bien constitué pour être opérationnel, et il doit adapter les détails descriptifs et les informations aux besoins des agents de maintenance, en préparation ou en intervention. Le deuxième document contient les informations techniques fournies par le constructeur.

Il appartient au service de maintenance, lors des négociations d'achat, d'exiger les documents qui lui seront ultérieurement utiles, tels que :

- les caractéristiques de la machine : capacités, performances en consommation, puissance installée, etc.;
- les plans détaillés de tous les circuits, schémas et plans électriques, électroniques, hydrauliques ou pneumatiques;
- les consignes de sécurité et la notice de maintenance;
- la notice de lubrification qui contient le type de lubrifiant, les points à graisser, les fréquences conseillées, etc.;
- les organigrammes de dépannage, les documents d'aide au diagnostic des défaillances les plus probables, etc. [58].

2.6.1 L'impact d'une politique de maintenance :

Les responsables de maintenance doivent faire face à plusieurs difficultés pour justifier leurs décisions concernant les tâches de maintenance préventive.

Des questions se posent quant aux effets de la politique établie, en termes de coûts et de disponibilité, et quant à la rationalité des choix effectués. Il est souvent plus facile d'évaluer les dépenses relatives aux tâches de maintenance que les bénéfices qui en découlent. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir apporter un outil d'aide à la décision de maintenance à caractère quantitatif.

Comme le décrit la figure 2.5, les performances d'un programme de maintenance défini par le processus OMF peuvent être obtenues après plusieurs années d'application, et entraîner éventuellement des modifications pour la mise en œuvre d'un nouveau programme [50]. S'il est plutôt simple de comparer la différence économique entre l'ancien programme de maintenance préventive et le nouveau, il reste difficile d'évaluer les dépenses de maintenance corrective évitées ainsi que les gains obtenus en termes de disponibilités suite aux modifications d'amélioration. Pour éviter d'attendre à nouveau plusieurs années d'application avant d'obtenir ces informations, il semble nécessaire de pouvoir prédire l'évolution de la fiabilité des matériels et ainsi les conséquences de la mise en place du nouveau programme.

Cette étape passe par la modélisation et simulation du programme, avant son application, pour laisser place à de possibles modifications ultérieures, en gris sur la figure 2.5

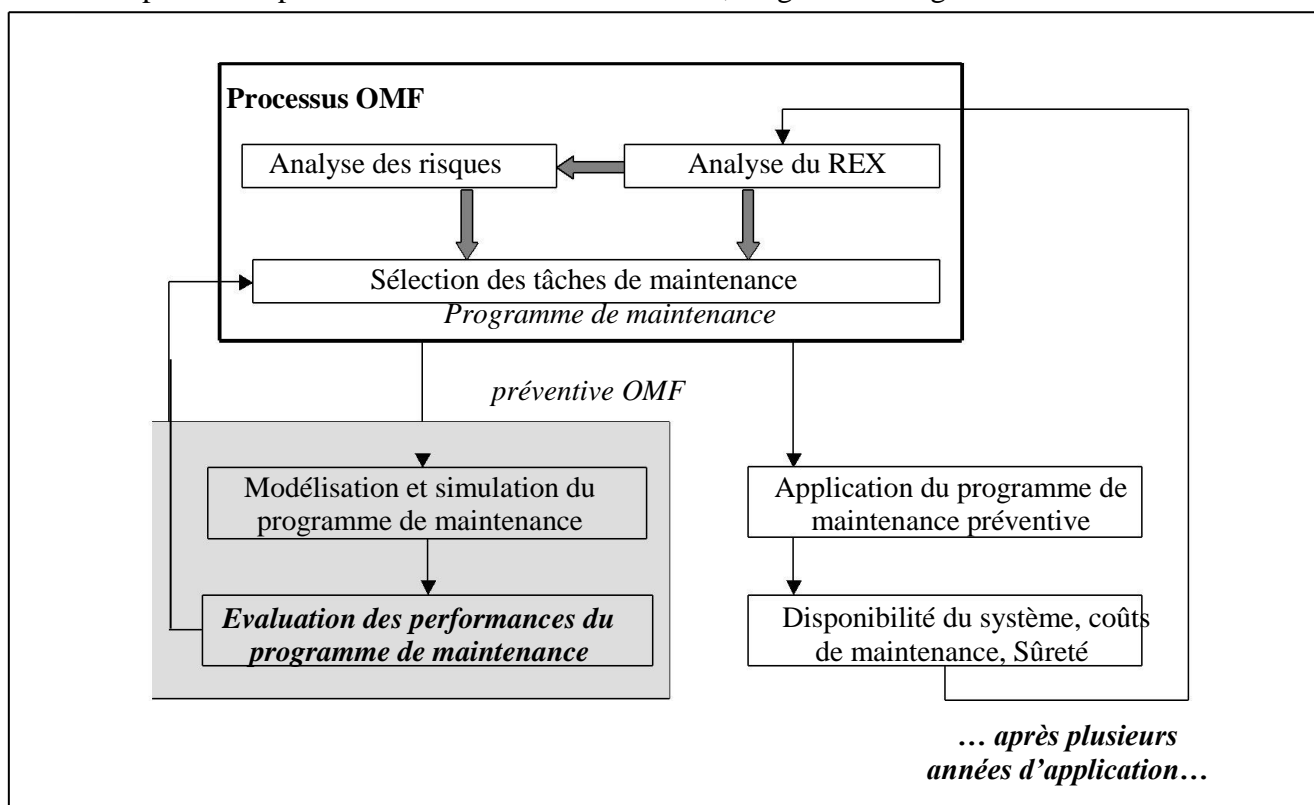


Fig. 2.5: L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF

2.7 Optimisation de la maintenance :

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. Il faut alors déterminer les instants de maintenance et les actions à effectuer de manière à optimiser un critère de décision fixé. Ce critère de décision peut aussi bien reposer sur le coût, par exemple un coût moyen de maintenance à long terme ou le coût

d'opération par unité de temps, que sur la disponibilité du système ou encore la sécurité [54, 59].

L'objectif de la maintenance est de prolonger la vie des équipements, ou du moins le temps moyen jusqu'à la prochaine défaillance dont la réparation peut être assez coûteuse.

Pour un réseau de puissance il est attendu que des politiques de maintenance efficaces diminuent la fréquence d'interruption des clients. La maintenance préventive impacte les composants et la sûreté du système : si on en réalise trop peu, on a beaucoup de défaillances qui coûtent et une diminution des performances du système ; si on en réalise trop souvent, la sûreté est améliorée mais le coût de la maintenance préventive augmente rapidement.

La figure 2.6 est une illustration des effets de la fréquence des opérations de maintenance sur les coûts liés soit à la maintenance corrective, soit à la maintenance préventive.

L'augmentation du nombre d'interventions sur le système permet de réduire les effets indésirables engendrés par une panne mais pénalise le fonctionnement du système et peut entraîner une augmentation du coût global d'exploitation du système dans la mesure où chaque opération de maintenance engendre un coût. De plus, d'une manière générale, les performances d'un système sont fortement liées à la durée d'exploitation qui peut être considérée sur un horizon de temps fini ou infini (dans ce cas on étudie le critère moyen à long terme). L'inconvénient majeur de l'hypothèse d'horizon fini est le manque de robustesse de cette approche vis-à-vis de la longueur de l'intervalle de temps considéré [60]. Par ailleurs, il est à noter que la modélisation asymptotique s'éloigne du problème industriel du fait de l'hypothèse d'une exploitation sur un intervalle de temps infini. De plus, cette approche ne permet pas de tenir compte de phénomènes ponctuels, de possibilité de changement de stratégie au cours de l'exploitation du système qui peut être dû, par exemple, à un changement d'une propriété du système, etc.

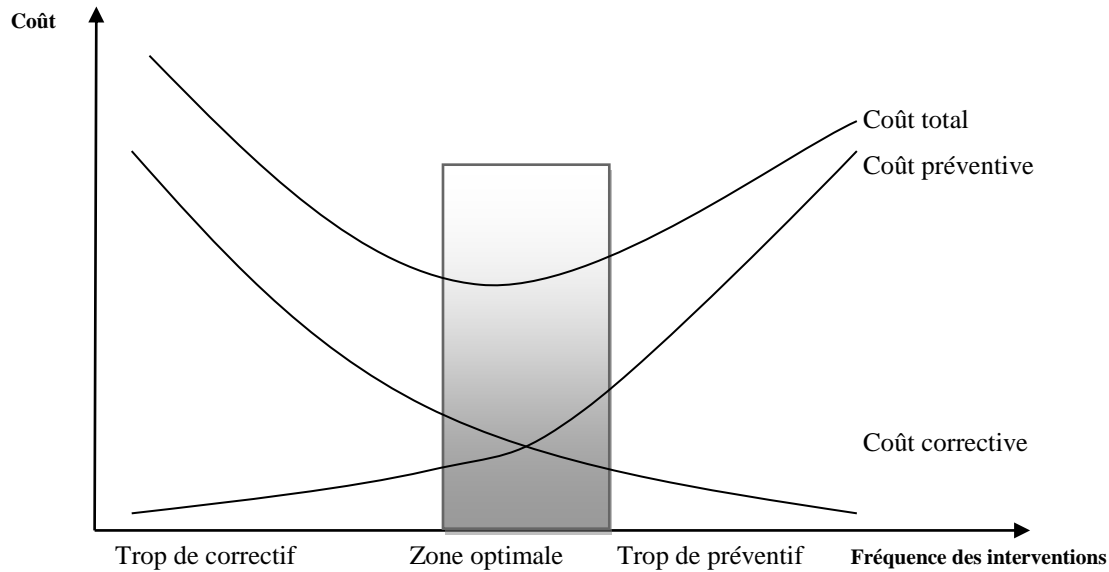


Fig.2.6 : La nécessité de contrôler l'équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective

Cependant la modélisation asymptotique permet d'élaborer des règles de décision stables qui peuvent mettre en évidence des structures de maintenance faciles à implanter. Les paramètres de décision associés sont déterminés pour optimiser un critère moyen de performance à long terme

2.7.1 Classification De L'optimisation De La Maintenance

Il existe plusieurs approches pour l'optimisation de la maintenance préventive, en fonction d'objectifs, de facteurs de décision, de l'horizon de temps, du nombre de composants.

La classification que nous présentons est basée sur [61] qui donne aussi d'autres références sur les méthodes d'optimisation de la maintenance est normalement réalisée avec un des objectifs suivants (au sens mathématique du terme) :

La sureté : maximiser des indices liés à la sureté avec des contraintes données, comme par exemple des contraintes de coût ;

Le coût : minimiser le coût de la maintenance avec différentes contraintes, sur la sureté et/ou des exigences sur la maintenance ;

Le coût total : minimiser le coût total (maintenance et interruptions).

En ce qui concerne l'horizon de temps, il existe deux concepts utilisés pour l'optimisation de la maintenance.

La première démarche conduit à des intervalles fixes pendant les maintenances.

Cette approche est normalement appliquée quand le coût n'est pas l'objectif principal.

Lorsque l'on vise des objectifs de coût, et lorsque l'on utilise la valeur actualisée, les intervalles de maintenance deviennent généralement variables. Les coûts de toutes les actions et leurs effets sont recalculés à la valeur présente.

En fonction des données disponibles et des aspects d'organisation des activités de maintenance, nous pouvons avoir plusieurs objectifs (au sens technique du terme).

En voici quelques uns :

L'intervalle : maintenance optimisée et/ou remplacement et/ou intervalle d'inspection ;

La redondance : identifier ou il est le plus rentable (de point de vue sûreté) de placer des composants redondants ;

Pièces de rechange : identifier l'allocation et le nombre de pièces de rechange ;

Adaptative : sur une base de données prélevées pendant le processus de maintenance, des méthodes peuvent l'ajuster ;

La main d'œuvre : identifier comment les effectifs devraient se répartir ;

L'opportunité : pour des équipements coûteux en termes d'interruption ou difficilement accessibles, une optimisation d'opportunité est nécessaire pour décider ce qu'il faut faire pendant la maintenance.

Le nombre de composants introduits dans les modèles d'optimisation varie. Pour cette classification, les modèles d'optimisation sont divisés en deux groupes : composant seul et multi composants.

Le modèle d'un seul composant est basé sur un composant générique (par exemple un générateur). Le modèle multi composants contient des sub-composants du même système.

Une optimisation complète devrait impliquer tous les facteurs mentionnés ci-dessus. En pratique, la plupart des méthodes d'optimisation de la maintenance impliquent un ou quelques facteurs même si la solution résultante est du coup sous optimale.

Néanmoins, c'est tout à fait raisonnable puisqu'il est extrêmement difficile de construire un modèle d'optimisation qui implique tous les facteurs. D'où il est très important de choisir ce qui devrait être inclus dans une chaîne d'optimisation, afin d'obtenir un résultat qui soit le plus proche possible du vrai optimum.

2.8 Conclusion

La méthode d'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité, associées aux démarches de maintenance conditionnelle et de durabilité sont en voie d'intégration au sein d'une approche d'asset management. Toute fois, les stratégies de maintenance sont majoritairement établies sur la base d'avis d'experts et non sur un critère quantifié, défini par exemple en termes de coûts et de disponibilité. L'intérêt d'une représentation complète et détaillée du comportement d'un système maintenu est certain au niveau industriel. Les décisions pour la définition des stratégies de maintenance se font actuellement sur la base des avis d'experts. Ces informations qualitatives s'appuient sur des données de REX qui sont souvent trop faibles pour constituer en elles-mêmes des outils d'aide à la décision. En prenant en compte le comportement des différents matériels d'un système et les effets des actions de maintenance réalisées dans le cadre d'une stratégie établie suite à une démarche du type OMF, il devient possible d'évaluer de manière quantitative des programmes de maintenance. Alors, on pourra effectuer des comparaisons entre plusieurs stratégies ou encore se rendre compte de l'impact d'une modification de la politique actuelle.

Chapitre 3

Modélisation de dysfonctionnement dans les systèmes de séries parallèles

3.1 Introduction

Le but de notre travail est de modéliser la propagation des fautes dans un système comportant plusieurs éléments montés en séries, en parallèle en assemblage séries parallèles.

Figure 3.1 représente un système séries parallèles avec stocks tampons. Chacune des machines puise des produits à usiner dans un stock d'entrée et dépose les produits finis dans un stock de sortie. Chaque stock de sortie correspond au stock d'entrée de la machine suivante et ainsi de suite.

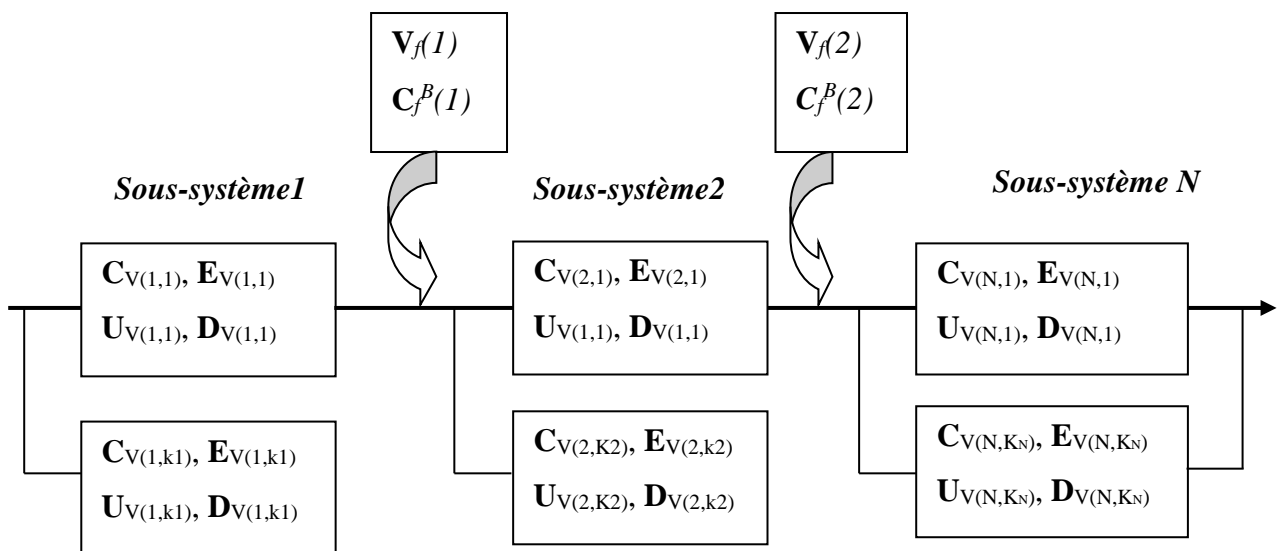


Fig. 3.1 : Système Série Parallèle

Ainsi, chaque produit doit passer dans un ordre bien défini par différentes machines entre lesquelles il reste en attente dans les zones de stockages. Tout Système de Production Automatisé (SAP) étant séquentiel, une machine ne peut commencer à exécuter une opération que si le produit est présent dans le stock d'entrée et qu'il y a de la place disponible pour entreposer le produit une fois usiné dans le stock de sortie.

Ce processus est modélisé suivant la modélisation SADT (System Analysis and Design Technic).

Cette modélisation, représente le système sous forme d'Actigramme (boîte noire) à l'intérieur duquel se déroule le processus. L'entrée du système correspond à la matière d'œuvre à l'état brut, les sorties des cellules élémentaires correspondent à la matière d'œuvre dotée de la valeur ajoutée issue de l'action du processus à l'intérieur de la boîte. La sortie du système représente la matière d'œuvre à l'état final à laquelle sont ajoutés les rebuts. Ainsi, chaque produit doit passer dans un ordre bien défini par différentes machines entre lesquelles il reste en attente dans les zones de stockages. La dynamique du système (prise en compte des synchronisations, des valeurs d'échelle etc.) est modélisée par SADT+ [62] et [63] qui consiste à intégrer les contraintes de temps sur l'enclenchement ou le déclenchement d'activité interconnectées [64].

3.2 Nature d'un système :

Les caractéristiques et les contenus d'un modèle appelé à décrire le comportement dynamique des systèmes réels varient selon les objectifs de l'étude et le degré de finesse de représentation recherché [65]. Selon le but de la modélisation et la logique de changement d'états, le modèle développé est de nature différente [66] et peut être :

Continu : Lorsque l'état du système est caractérisé par des paramètres dont la valeur évolue de façon continue dans le temps. La loi d'évolution de ces variables est alors généralement décrite par un système d'équations algébriques ou différentielles ;

Discret : Lorsque l'espace d'état est discret (les systèmes évoluent de façon discrète dans le temps), c'est-à-dire qu'il existe une suite strictement croissante de nombres réels positifs $t(i)$, $i = 0, 1, 2, \dots$, nommés instants, telle que durant la quantité $d(i) = t(i+1) - t(i)$ unité de temps, l'état d'un tel système n'évolue pas.

Devant la complexité des nouvelles générations de systèmes à concevoir, plusieurs techniques de modélisation ont été développées. Toutes sont basées sur le même principe, consistant à définir successivement :

- 1/les **états** du système (on suppose que les systèmes étudiés ont un nombre fini d'états) ;
- 2/les **transitions** entre chaque état (dynamique du système) ;
- 3/la **temporisation** des transitions (temps mis dans un état donné).

Ainsi, les modèles permettent d'analyser le comportement dynamique d'un système en spécifiant l'ensemble de toutes les transitions possibles entre les différents états du système.

Les systèmes étudiés s'exécutent dans un environnement aléatoire.

Lors de la modélisation d'un tel système, la principale difficulté consiste à modéliser les transitions, à savoir le temps que l'on passe dans chaque état en fonction des statistiques sur l'environnement et le comportement du système lui même.

Dans la plupart des cas, le système est considéré markovien, donc sans mémoire. L'état futur ne dépend alors que de l'état présent, et non du passé. Les chaînes de Markov, que ce soit à temps continu ou à temps discret, facilitent donc l'analyse des performances des systèmes dynamiques dans de nombreux domaines d'application.

Les hypothèses suivantes sont posées :

- ✦ le stock d'entrée et le stock de sortie ont des capacités infinies, alors que les stocks intermédiaires sont supposés de capacité unitaire ;
- ✦ on suppose que les systèmes sont réparables, et que la distribution des temps entre défaillances (ou les arrêts), et la distribution des durées de réparation suit une loi exponentielle de paramètres respectivement taux de défaillance λ et de réparation μ constants ;
- ✦ on suppose aussi que les taux de chargement et de service sont des paramètres de loi de probabilités distribuées exponentiellement.

3.3 La sûreté de fonctionnement (SdF) :

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) d'un système permet d'établir le degré de fonctionnement que l'on peut lui attribuer dans le cadre de la mission qu'il doit assurer [67].

C'est une notion générique qui mesure la qualité de service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée [68].

Les objectifs fixés actuellement par la production industrielle intégrée visent à optimiser un site de production au sens de la productivité, de manière à ce qu'il assure convenablement le service pour lequel il est conçu (produire en qualité, au moindre coût et dans un temps limité).

Cette notion d'assurance et de confiance accordée au service délivré définit le concept de Sûreté de Fonctionnement [64].

Appelée également « Science des Défaillances » [69], elle est liée à tout le cycle de vie du système de production, à sa Disponibilité, à sa Fiabilité et la Maintenabilité de ses machines, etc. Elle consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes technologiques et les défaillances humaines [70]. Elle est l'étude structurelle (statique) et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, mais aussi opérationnel et expérimental en tenant compte des aspects probabilités et conséquences des défaillances.

Les principales techniques d'analyse de la SdF et leur adéquation possible aux différentes étapes de développement d'un système de production préconisent l'enchaînement des étapes suivantes :

- ◆ *L'analyse préliminaire* : basée sur une approche causale (exemple : Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'Arbre de Défaillance (AdD), l'objectif étant de constituer un répertoire des différents types de scénarios de pannes possibles. Ces méthodes sont considérées comme statiques ;
- ◆ *L'analyse qualitative* : basée aussi sur une approche causale, consiste à exploiter tous les cheminements possibles entre les événements initiateurs et les événements redoutés (objectif de sûreté) ;
- ◆ *L'analyse quantitative* : basée sur une approche causale ou une approche d'état (exemple : les graphes de Markov, les réseaux de Petri stochastiques (RdPS)) dont le but est la quantification probabiliste de l'occurrence des événements redoutés.

La SdF est un concept générique, généralisant et englobant plusieurs composantes définies par rapport à une certaine perception du service délivré par le système, telle que la Maintenance, la Disponibilité, la Fiabilité et la Sécurité.

Une défaillance d'un système est observée lorsque le service délivré dévie du service spécifié. La défaillance est la conséquence d'un comportement erroné du (ou d'une partie du) système.

3.4 Identification des événements :

A chaque instant, l'état d'un système de production est constitué d'opérations à exécuter (un produit peut être à l'état disponible, en cours, etc.), et des ressources qui doivent les exécuter (une ressource peut être en état de veille, active ou en arrêt).

Les événements seront de deux types :

les événements attendus, dont on sait qu'ils doivent normalement se produire dès que le système de production est dans un certain état ;

les événements inattendus, qui correspondent à une perturbation associée à une ressource ou à une opération.

3.4.1 Événements attendus :

Les événements attendus qui déclenchent le processus de prise de décision sont généralement les fins d'exécution d'opération, les fins de panne et les fins de blocage d'opération :

- la fin d'exécution d'opération libère une ou plusieurs ressources et rend disponible l'opération suivante ;
- compte tenu de l'état du système de production et des objectifs de production, lorsqu'une ressource est libérée, il faut décider à quelle opération elle doit être affectée ;
- lorsqu'une opération devient disponible, il faut décider avec quelle(s) ressource(s) elle peut être exécutée ;
- lors d'une fin de panne, une ressource peut de nouveau exécuter une opération.

Deux cas se présentent :

Soit cette ressource reprend l'exécution de l'opération arrêtée si celle-ci attend la fin de la panne ;

Ou alors, si aucune opération n'est affectée, une décision d'affectation est à prendre.

3.4.2 Événements inattendus :

Un système de production est un milieu extrêmement exposé à des perturbations. Ces perturbations peuvent être liés tant aux ressources, aux opérations qu'aux événements extérieurs au système de production.

Notre intérêt porte essentiellement sur les événements de type défaillance machine.

[69] montre que la complexité des systèmes de production actuels, leurs nombreuses interactions et les redondances fonctionnelles existantes, rendent difficiles les tâches d'élaboration et d'évaluation des séquences d'événements.

Une approche systématique est donc nécessaire pour comprendre et mettre en évidence les nombreux facteurs qui peuvent influencer de telles séquences.

L'arbre des conséquences se présente donc comme étant l'outil le plus approprié pour la caractérisation et la détermination des événements potentiels pouvant entraîner le dysfonctionnement voire la mise hors d'usage d'un système

3.5 Fiabilité :

La fiabilité d'une entité est son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné, sachant qu'elle était en état d'accomplir cette fonction au début de l'intervalle de temps donné. En pratique, la fiabilité se traduit souvent comme l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance [71].

La fiabilité d'un groupe d'éléments à un instant t est donc la probabilité de fonctionnement sans défaillance pendant la période $[0, t]$, donc la probabilité que l'instant de première défaillance T soit supérieur à t :

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

Elle se calcule aisément :

$$R(t) = \frac{\text{Nombre d'éléments en vie à l'instant } t}{\text{Nombre d'éléments en essai}}$$

a/Défaillance :

C'est la cessation d'une aptitude à accomplir une fonction requise, c'est le passage de l'état de fonctionnement à l'état de panne. On distinguera sa cause (circonstances ayant entraîné la défaillance), son mécanisme (processus ayant entraîné la défaillance) et son taux $\lambda(t)$ qui représente la proportion de dispositifs qui, ayant vécu un temps t , ne sont plus en vie à $t + dt$.

Le taux de défaillance s'exprime de la façon suivante:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\text{Nbre de défaillants au cours de } dt}{\text{Nombre d'éléments en essai à } t} \right) \times \left(\frac{1}{dt} \right)$$

b/Temps moyen de fonctionnement entre défaillances (MTBF)

C'est le temps moyen qui s'écoule entre deux défaillances consécutives.

$$\text{MTBF} = \left(\frac{\text{Temps total de fonctionnement pour l'ensemble des Produits}}{\text{nombre total de défaillants}} \right)$$

3.5.1 Fiabilité des composants :

La fiabilité des composants élémentaires peut être estimée à partir d'essais en considérant les dates d'apparition des défaillances.

On teste alors l'adéquation des défaillances constatées avec les lois de statistique connues et on identifie, quand c'est possible, la fiabilité du composant élémentaire (représentée par la fonction de densité de probabilité de défaillance au cours du temps) à une loi connue caractérisée par ses paramètres propres. Cette démarche n'est possible que si tous les essais ont été menés exactement dans les mêmes conditions.

On peut alors, en utilisant la fonction cumulée de défaillance, prévoir à un instant t la probabilité de défaillance d'un composant élémentaire. Cette estimation nécessite cependant des précautions: il convient de vérifier que les conditions de fonctionnement concernées par l'estimation sont les mêmes que celles ayant été utilisées pour déterminer la "loi de fiabilité" du composant.

On peut appréhender dès cette étape les problèmes liés à l'environnement dans lequel fonctionne le composant et donc la nécessité de caractériser l'influence de cet environnement sur le comportement du composant élémentaire.

3.5.2 Fiabilité Des Systèmes :

Généralement, les industriels s'intéressent à la fiabilité de systèmes complexes, formés de plusieurs composants élémentaires comme les joints, arbres, carters, pistons... L'étude d'un tel système passe par sa décomposition en composants élémentaires (figure 3.2)

On étudie ensuite la fiabilité de chaque composant élémentaire et on en déduit la fiabilité du système.

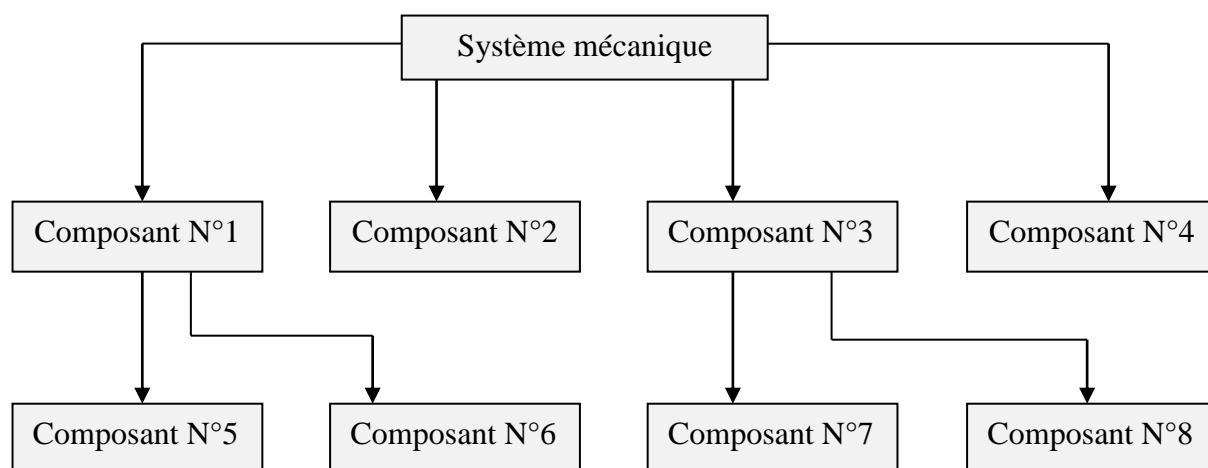


Fig.3.2: décomposition d'un système mécanique en composants élémentaires

3.5.2.1 Système Série :

C'est le cas le plus simple. Chaque composant est indispensable au fonctionnement du système, la défaillance de n'importe lequel entraîne la défaillance de tout le système.

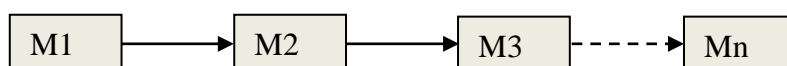


Fig.3.3: Système Série

On peut alors exprimer la fiabilité du système de la manière suivante:

$$R_{\text{système}} = \prod_i R_{\text{composant}_i}$$

On démontre aisément à partir de la formule précédente l'expression du taux de défaillance instantané du système en fonction de ceux des composants élémentaires:

$$\lambda(t)_s = \sum_i^n \lambda(t)_i$$

Où $\lambda(t)_s$ est le taux de défaillance instantané du système,

$\lambda(t)_i$ est le taux de défaillance instantané du composant élémentaire i .

3.5.2.2 Système Parallèle :

C'est un système comprenant i sous-ensembles ou composants élémentaires A équivalents, c'est-à-dire que la défaillance du système n'a lieu que si tous les composants A_i sont défaillants.

Le système présente alors une ou plusieurs redondances.

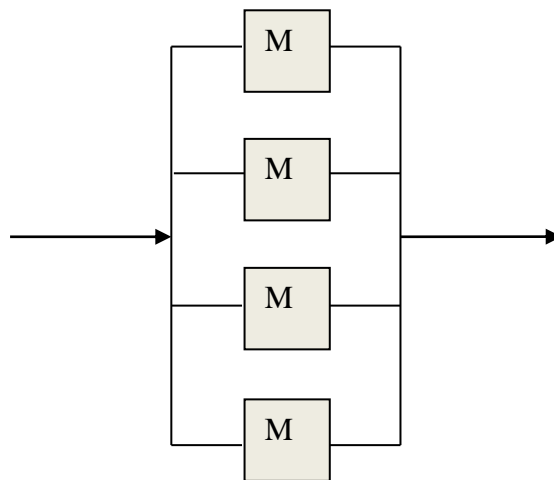


Fig.3.4:système à structure parallèle

La fonction cumulée de défaillance du système s'exprime alors en fonction des fonctions cumulées de défaillance des composants A_i :

$$F_{\text{système}} = \prod_i F_{\text{composant}_i}$$

On en déduit la fiabilité de l'ensemble du système :

$$R_{\text{système}} = 1 - \prod_i (1 - R_{\text{composant}_i})$$

3.5.2.3 Systèmes Série-Parallèles Multi-Etats Sans Stocks :

Le système série-parallèle est constitué de n sous- systèmes connectés en série. Chaque sous- système est composé de i éléments placés en parallèle (Fig 3.5).

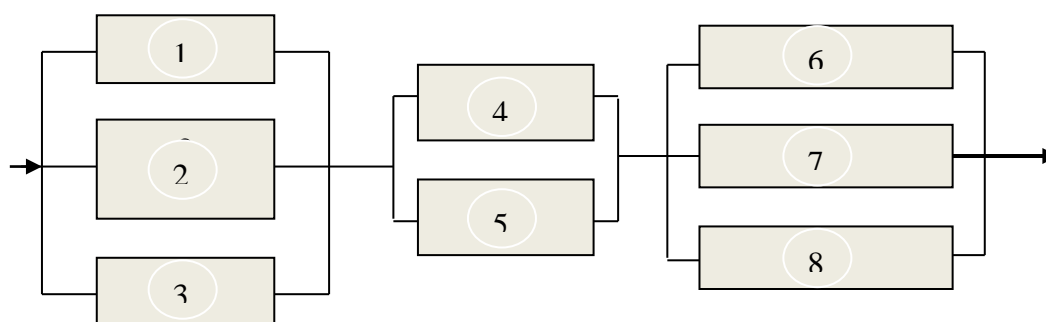


Fig. 3.5: Système à Structure Série-Parallèle

Aucun système producteur n'est à l'abri de défaillances. Un système à deux états (binaire) peut être soit opérationnel soit en défaillance totale. Cependant pour un système multi- états (Multi –state system ; MSS) il existe deux types de pannes :

- a) Pannes qui causent l'arrêt total du système.
- b) Pannes qui causent une dégradation de la performance du système

Les système à défaillance partielles peuvent avoir plusieurs niveaux de performance [72], ces système sont appelés Multi State system MSS (Système Multi-Etats).

3.6 Estimation De La Fiabilité Par La Méthode De L'UMGF :

Dans cette section nous étudions la fiabilité couplée à la demande des systèmes séries-parallèles multi- états.

Les méthodes classiques sont inappropriées pour évaluer la fiabilité des systèmes MSS. La procédure utilisée dans ce chapitre est basée sur une nouvelle technique introduite par Ushakov (1986) [73] [74], connu sous le nom de l'UMGF (Universal Moment generating Function).

Par définition l'UMGF d'une variable aléatoire G est défini par le polynôme :

$$u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j} \quad (1)$$

Où la variable G représente la performance et peut prendre J états possibles.

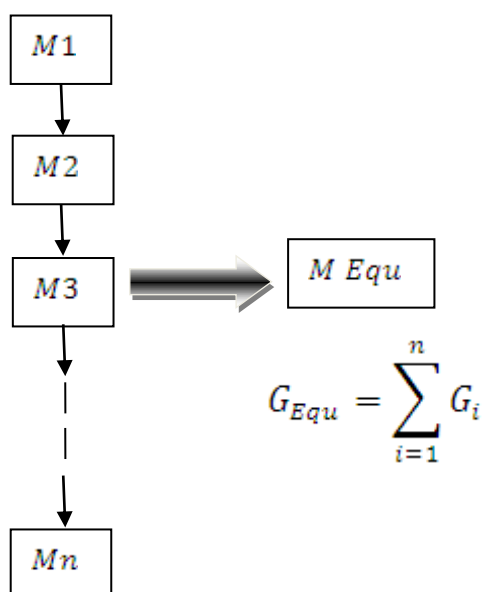
P_j Est la probabilité de l'état G_j .

Exemple : considérons un élément i à défaillance totale ayant une performance nominale G_i et une fiabilité A_i , l'UMGF d'un tel élément peut s'écrire :

$$u_i(z) = (1 - A_i)z^0 + A_i z^{G_i} = (1 - A_i) + A_i z^{G_i} \quad (2)$$

Pour implémenter cette technique à un système série parallèle deux opérateurs de composition sont utilisés. Ces opérateurs déterminent le polynôme UMGF pour un groupe d'éléments.

1. Opérateurs Pour Éléments En Parallèle :



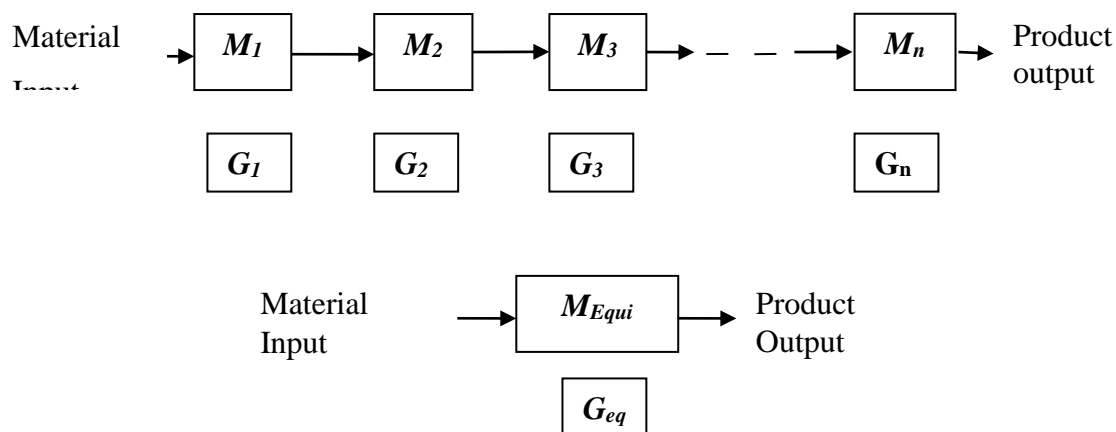
L'UMGF d'un système MSS contenant J_m éléments en parallèle peut être calculer par l'opérateur π :

$$u_p(Sy) = \pi(u_1(z), u_2(z), \dots, u_{j_m}(z)) \quad (3)$$

Pour un système de deux éléments en parallèle L'UMGF est donnée par :

$$\pi(u_1(z), u_2(z)) = \pi \left\{ \sum_{i=1}^n P_i z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j} \right\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{a_i + b_j} \quad (4)$$

2. Operateurs Pour Eléments En Série



L'UMGF d'un système MSS contenant m éléments en série peut être obtenue par l'opérateur σ :

$$u_s(z) = \sigma(u_1(z), u_2(z), \dots, u_m(z))$$

(5)

Pour un système de deux éléments en série L'UMGF est donnée par :

$$\sigma(u_1(z), u_2(z)) = \sigma \left\{ \sum_{i=1}^n P_i z^{a_i} \left| \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j} \right. \right\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{\min\{a_i, b_j\}} \quad (6)$$

On obtient L'UMGF d'un système série parallèle en appliquant consécutivement les opérateurs π et σ .

3.7 Fiabilité couple à la charge :

Généralement les modèles de charge sont bien connus pour chaque type de production (courbe de charge). Ces modèles sont de types à niveau discret et chaque niveau à sa propre durée ou probabilité.

La disponibilité A d'un système MSS par rapport à la demande peut être évaluée par : Probab (production \geq demande) pendant différents états du système et pour chaque niveau de demande D .

$$\text{Probab}(G \geq D) = \Psi(u(z)z^{-D})$$

Ψ Est un opérateur distributive définit par :

$$\Psi(Pz^{\sigma-D}) = \begin{cases} P, & \text{if } \sigma \geq D \\ 0, & \text{if } \sigma < D \end{cases}$$

$$\Psi \left\{ \sum_{j=1}^j P_j z^{G_j - D} \right\} = \sum_{j=1}^j \Psi \{ P_j z^{G_j - D} \} \quad (7)$$

3.8 Exemple illustratif de la méthode :

Considérons par exemple un système de production d'énergie composé de deux sous-systèmes reliés en série. Le premier sous-système est composé à son tour par deux générateurs d'énergie connectés en parallèle et le second sous-système consiste d'une unité de transformation.

Les capacités des unités et leurs probabilités correspondantes sont présentées dans le tableau 1.

Les capacités sont données comme pourcentages du niveau maximum de la demande. Comme présentée dans le tableau 2.

La demande est caractérisée par deux niveaux, un niveau maximum de 100 MW pour 75% du temps et un niveau de 70 MW pour 25% du temps.

	<i>Sous-système N°1</i>							<i>Sous-système N°2</i>		
	<i>Unité N°1</i>			<i>Unité N°2</i>				<i>Unité N°3</i>		
<i>ETAT</i>	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
<i>Probabilité de l'état</i>	0.10	0.60	0.30	0.05	0.25	0.30	0.40	0.05	0.30	0.65
<i>Capacité G(%)</i>	0.0	30	60	0.0	30	50	80	0.0	100	150

Tableau 1 : Paramètres Des Unités Multi-Etats

<i>Charge (MW)</i>	100	70
<i>Durée(h) (%)</i>	6570	2190
	75	25

Tableau 2 : Caractéristiques De La Demande

L'UMGF de chacun de trois unités sont par définition de l'UMGF

$$u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j} \quad (8)$$

Donc nous avons :

Pour l'unité 1 du sous-système 1 :

$$U_1^1(z) = p_{11}^1 Z^{G_{i1}^1} + p_{12}^1 Z^{G_{i2}^1} + p_{13}^1 Z^{G_{i3}^1} = 0.1Z^0 + 0.3Z^{30} + 0.6Z^{60}$$

Pour l'unité 2 du sous-système 1 :

$$\begin{aligned} U_2^1(z) &= p_{21}^1 Z^{G_{i1}^1} + p_{22}^1 Z^{G_{i2}^1} + p_{23}^1 Z^{G_{i3}^1} + p_{24}^1 Z^{G_{i4}^1} \\ &= 0.05Z^0 + 0.25Z^{30} + 0.3Z^{50} + 0.4Z^{80} \end{aligned}$$

Pour l'unité du sous-système 2 :

$$U_1^2(z) = p_{11}^2 Z^{G_{i1}^2} + p_{12}^2 Z^{G_{i2}^2} + p_{13}^2 Z^{G_{i3}^2} = 0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150}$$

L'UMGF du système est obtenue par l'application des opérateurs π et σ
 π pour les éléments en parallèles et σ pour les éléments en série.

$$U_{sys} = \sigma[\Pi(U_1^1(z), U_2^1(z)), U_1^2(z)]$$

$$U_{sys} = \sigma[(0.1Z^0 + 0.3Z^{30} + 0.6Z^{60})(0.05Z^0 + 0.25Z^{30} + 0.3Z^{50} + 0.4Z^{80})(0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150})]$$

$$U_{sys} = \sigma[0.005Z^0 + 0.04Z^{30} + 0.03Z^{50} + 0.105Z^{60} + 0.13Z^{80} + 0.15Z^{90} + 0.3Z^{110} + 0.24Z^{140})(0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150})]$$

$$U_{sys} =$$

$$0.0547Z^0 + 0.038Z^{30} + 0.0285Z^{50} + 0.0949Z^{60} + 0.123Z^{80} + 0.1245Z^{90} + 0.162Z^{100} + 0.195Z^{110} + 0.156Z^{140}$$

Pour évalué la probabilité $\text{Proba}(G_m \geq W_s)$ que la capacité totale du système multi-états n'est pas inférieure aux différents niveaux requis de la demande W_s , nous appliquons l'opérateur Ψ définie par les équations (2-8) et (2-9)

$$\text{Proba}(G_m \geq W_s) = \Psi(U_{sys}(Z)Z^{-W_s})$$

Donc la disponibilité pour chaque niveau de demande est calculée par :

$$A(W_1) = \text{Prob}(G_m \geq W_1)$$

$$= \Psi\{0.05475Z^{(0-70)} + 0.038Z^{(30-70)} + 0.0285Z^{(50-70)} + 0.0949Z^{(60-70)} + 0.1235Z^{(80-70)} + 0.1425Z^{(90-70)} + 0.162Z^{(100-70)} + 0.195Z^{(110-70)} + 0.156Z^{(140-70)}\}$$

$$\begin{aligned}
A(W_1) &= \text{proba}(G_m \geq W_1) = \text{Proba}(G_m \geq 70) \\
&= \sum_{G_m - W_1 \geq 0} \text{Proba} = 0.1235 + 0.1425 + 0.162 + 0.195 + 0.156 \\
&= 0.799
\end{aligned}$$

$$A(W_2) = \text{Prob}(G_m \geq W_2)$$

$$\begin{aligned}
&= \Psi[0.05475Z^{(0-100)} + 0.038Z^{(30-100)} + 0.0285Z^{(50-100)} + 0.0949Z^{(60-100)} \\
&\quad + 0.1235Z^{(80-100)} + 0.1425Z^{(90-100)} + 0.162Z^{(100-100)} \\
&\quad + 0.1951Z^{(110-100)} + 0.156Z^{(140-100)}]
\end{aligned}$$

$$A(W_2) = \text{Proba}(G_m \geq W_2) = \text{Proba}(G_m \geq 100)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{G_m - W_2 \geq 0} \text{Prob} = 0.162 + 0.1951 + 0.156 \\
&= 0.5131
\end{aligned}$$

La disponibilité totale du système est calculée par :

$$A = \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M P_m q_s \left\{ G_m \geq W_s \right\} = \sum_{s=1}^S \left\{ q_s \sum_{m=1}^M P_m \left\{ G_m \geq W_s \right\} \right\} = \sum_{s=1}^S q_s A(W_s)$$

Ou S représente les différents niveaux de la demande et M les différents états du système.

p_m C'est la probabilité que la production du système satisfait chaque niveau demande W_s ,

q_s , étant la probabilité de cette demande.

Donc la disponibilité totale du système par rapport à la demande c'est :

$$\begin{aligned}
A &= 0.25 \cdot (0.779) + 0.75 \cdot (0.5131) \\
&= 0.5795
\end{aligned}$$

On constate que le système considéré dans cet exemple satisfait la demande de 70MW avec une probabilité de 77.9% et la demande de 100MW avec une probabilité de 51.31%. La disponibilité moyenne du système est de 57.97%.

Cette méthode nous permet de calculer la disponibilité d'un système série- parallèle par rapport à n'importe quelle courbe de demande.

Un programme a été conçu pour l'optimisation du système séries parallèles basé sur la combinaison de la méthode d'Ushakov et les colonies de fourmis.

3.9 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous tenons à préciser qu'a travers l'exemple illustré ci-dessus et l'analyse de la redondance on confirme que :

- L'estimation de la fiabilité des systèmes est un outil précieux qui aide à mieux définir une stratégie de maintenance.
- La redondance passive ou active est un moyen d'augmenter la disponibilité de l'équipement dans la mesure où la disposition des composants et leurs coûts soient optimisés en fonction des besoins et de la spécificité de l'outil de production.
- L'exemple a montré comment un nombre croissant de composants en séries diminue la fiabilité du système, alors qu'un nombre décroissant de composants en parallèle et en redondance contribue à l'augmentation de la fiabilité des systèmes. Notre contribution s'inscrit dans cette logique afin d'améliorer la disponibilité des différents systèmes de productions.

Chapitre 4

Modélisation de la fiabilité d'un système à composants dépendants en tenant compte de la maintenance

4.1 Introduction

Le concept de la dépendance est très présent dans notre monde. Beaucoup d'exemples de la dépendance existent en médecine, en économie, en génie industriel, en génie de fiabilité...

Dans la littérature de la fiabilité, il est souvent considéré que les composants des systèmes sont indépendants. Cependant, les composants dans un même système partagent au moins une mission commune dont ils ont la charge, et par conséquent l'échec d'un composant affecte l'activité des autres. La dépendance est habituellement difficile à décrire, même pour les composants identiques, mais il est essentiel d'étudier l'effet de la dépendance pour une meilleure conception et analyse de fiabilité.

[75] ont présenté une classification de dépendance entre les défaillances, où les causes communes de ces dernières sont décrites. Afin d'identifier les causes communes de défaillance, [76] ont présenté le concept du 'quart de cercle' pour mesurer l'effet d'ajouter un composant sur une structure donnée. [77] a traité un système de deux composants parallèles, dans lequel le taux de défaillance du composant augmentera suite à la croissance de charge induite par l'échec de l'autre composant. Dans une étude récente [78], le taux de défaillance du composant dans un système à plusieurs éléments est proportionnel à sa charge. Par conséquent, la dépendance est explicitement modélisée. Dans cet article nous nous concentrons sur la modélisation de la dépendance sur la fiabilité d'un système multi-état. En fait, les systèmes techniques modernes sont distingués par leur complexité structurale. Un bon nombre d'entre eux peut exécuter une mission à différents niveaux ; quelques échecs de composants peuvent mener à la diminution de la capacité du système mais non pas à sa défaillance totale. Quand un système et ses composants peuvent avoir un nombre fini d'états différents, il est alors nommé un système multi-état (MSS) [79] [80].

Cependant et malgré la tentative de Levitin [81], la technique d'UGF a toujours besoin d'un travail préparatoire afin de prendre en considération la dépendance lors du calcul de la fiabilité. En fait, Levitin [81] suggère une extension de l'UGF où la performance des composants influence le système et est influencé par les états d'autres composants.

Cette approche est seulement valide dans le cas de dépendances unilatérales entre les composants. Bien entendu, un modèle markovien permet de mieux rendre compte de ce phénomène (même pour le cas multi-latéral), mais il reste limité par le nombre d'états qui croît rapidement dès que le MSS est de taille importante et si l'on prend en compte les différents états dégradés des composants.

[82] présentent une autre approche pour modéliser ce genre de dépendance qui reste adaptée pour exploiter les propriétés de l'UGF. Quand un composant A échoue, les autres composants qui en sont dépendants sont considérés comme s'ils avaient été sujets à une mauvaise maintenance. Nous proposons d'employer le taux de défaillance proportionnel (PHM) comme outil de modélisation en se basant sur les travaux fait par [82].

[83] ont fait un état d'art sur le taux de défaillance proportionnel. Les caractéristiques de cette méthode sont expliquées et son importance dans l'analyse de fiabilité est présentée. Afin de déterminer des intervalles économiques de maintenance. [84] étudient deux modèles généraux, qui ont une large applicabilité. Le premier considère des intervalles fixes de maintenance préventive et est basé sur le concept de renouvellement ; alors que le second est plus adaptatif permettant ainsi des intervalles variables de maintenance et est basée sur le PHM.

[85] proposent un modèle de maintenance qui prend en compte les deux types de facteurs ci-dessus.

Cette étude a pour but d'optimiser le modèle de maintenance d'une centrale nucléaire. Les modèles de taux de défaillance proportionnel sont utilisés comme outils d'optimisation.

Ces différents travaux montrent l'intérêt et l'utilisation potentielle du PHM en fiabilité et optimisation de la maintenance.

4.2 Model de base :

Le taux de défaillance proportionnel, « proportional hazard model » (PHM) est introduit pour la première fois en 1972 par D. R. Cox [80] dans le but d'estimer les effets de différents covariants (sources diverses agissant sur le processus de défaillance) qui influencent les instants de défaillance du composant. Au début, ce modèle a été utilisé extensivement dans le domaine de la biomédecine. Récemment, l'application de ce modèle a fait l'objet de développements dans le domaine de la fiabilité. Généralement, l'application des PHM était limité par le cas où le remplacement du composant est le seul choix lors de la réparation (as good as new).

Soit t l'instant de défaillance d'un composant avec une fonction de densité $f(t)$ et une fonction de fiabilité $R(t)$.

La « nature » de la défaillance peut être modélisée par le taux de défaillance $\lambda(t)$ qui est égal à :

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

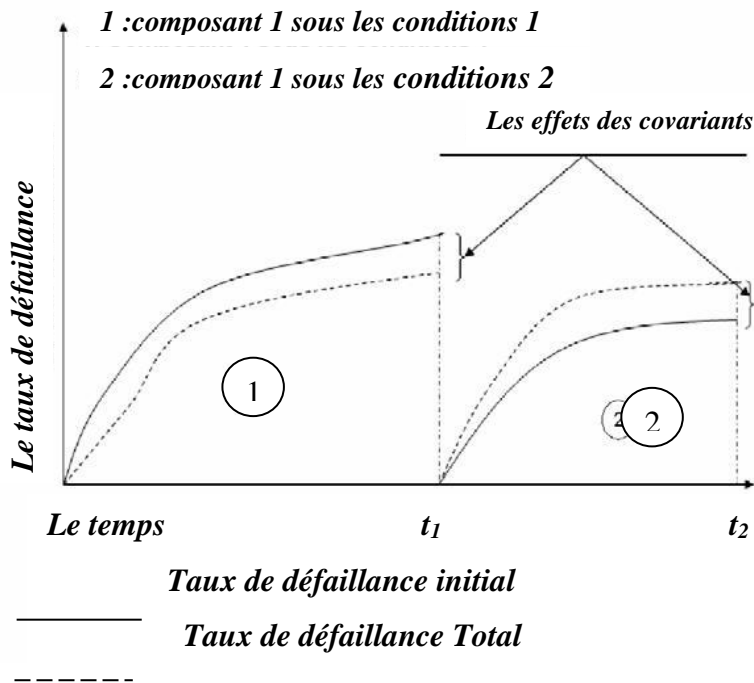


Fig.4.1 : Modélisation du taux de défaillance

Le taux de défaillance, généralement, n'est pas dépendant seulement du temps mais d'autres facteurs qui influencent le fonctionnement du composant.

Le PHM peut être utilisé pour estimer l'influence de ces derniers, permettant ainsi de prévoir le comportement vis-à-vis de défaillances.

On suppose, dans le PHM, que le taux de défaillance d'un composant est le produit d'un taux de défaillance initial dépendant seulement du temps et d'une fonction positive $\varphi(z : \beta)$. Cette fonction reflète l'influence des facteurs agissant sur le composant en incorporant des covariants qui les représentent.

Alors :

$$h(t,z) = h_0(t) * \varphi(z : \beta)$$

Figure.4.1 Taux de défaillance initial et final pour deux composants dans les conditions de fonctionnement différent (bonnes, difficiles)

Le taux total de défaillance est écrit alors comme suit :

$$h(t; z) = h_0(t) \exp(z\beta) = h_0(t) \exp \left[\sum_{j=1}^n \beta_j z_j \right]$$

$Z_j, j=1,2,\dots,q$ sont les covariants considérés ;

$\beta_j, j=1,2,\dots,q$ définit l'influence de chaque covariant.

La fiabilité sera alors égale à [7] [83]

$$r(t, z) = [r_0(t)]^{\exp [\sum_{j=1}^n \beta_j z_j]} \quad (5)$$

$$r_0(t) = \exp \left[- \int_0^t h_0(x) dx \right]$$

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, le PHM nous permet d'intégrer le ou les facteurs qui influencent le taux de défaillance, la maintenance corrective étant considérée comme l'un de ces facteurs.

Soit Z_{MC} le covariant qui représente la maintenance corrective et β_{MC} le nombre qui définit l'importance de cette influence.

Contrairement à ce qui est connu à propos de l'estimation de β , on ne va pas définir un β global pour tout le système, mais un β local pour chaque composant.

Cette estimation se base sur le nombre de maintenances correctives effectuées et la qualité de l'action effectuée (remplacement, action mineure) pour chaque composant.

4.3 Modélisation de la dépendance :

Dans cette étude, nous sommes intéressés par les systèmes multi-états. Chaque composant est caractérisé par une gamme de performances possibles. Dans les cas normaux, les composants donnent leur productivité nominale. Quand un composant A échoue au temps t_{dep} , l'autre composant i dépendant est alors soumis à des charges plus élevées. Sa performance changera selon la nature de la dépendance qui le joint les à A . La nouvelle performance serait f ($Per(i)$), où f est une fonction qui définit la dépendance.

Normalement, cette modification de performance influencera le taux de défaillance du composant et ainsi sa fiabilité.

Nous considérons que cette situation est comme si le composant i était sujet à une maintenance corrective à t_{dep} . Sa fiabilité au temps $t > t_{dep}$ serait alors le produit de la fiabilité du système original fonctionnant jusqu'à t_{dep} et de la fiabilité du système qui a subi une action

de maintenance au temps t_{dep} et qui est modifiée pour la durée $(t - t_{dep})$ [85] restante :

$$r(t) = r(t_{dep}) * r(t - t_{dep})$$

$r(t)$: la fiabilité du composant à t_{dep} ;

$r(t - t_{dep})$: la fiabilité du composant après t_{dep} , elle est ainsi donnée par :

$$r(t - t_{dep}, z) = [r_0(t - t_{dep})]^{\exp(z_{dep} \beta_{dep})} \quad (6)$$

$Z=1$ (la dépendance est considérée comme une mauvaise maintenance corrective) ;

β_{dep} est le facteur qui reflète l'amplitude de l'influence de la dépendance sur le taux de défaillance du composant.

Dans cette recherche, le concept de dépendance est relié aux modifications des performances,

β_{dep} peut ainsi être égal à :

$$\beta_{dep} = \frac{per(i) - f(per(i))}{per(i)} \quad (7)$$

4.4 Modes de dépendance :

S'il y a seulement un composant fonctionnant dans le système, la performance du composant reste à son niveau nominal. S'il y a plusieurs composants fonctionnant dans le système, la performance de chaque composant sera influencée par la dépendance entre les composants.

Nous supposons que la dépendance apparaît dans une fonction f . Nous supposons qu'il y a un composant A et N_A autres composants qui dépendent de A .

Quand le composant A échoue, la performance du composant i deviendrait :

➤ **Indépendance :**

$$f(per_i) = 1 * per_i = per_i$$

La performance de chaque composant demeure à son niveau nominal.

1/Dépendance : (cas de répartition uniforme des dépendances) :

$$f(per_i) = per_i + (1 - \mu) * per_A$$

$$\mu = \frac{N_A}{N_t}$$

N_A = nombre de composants qui dépendent du même composant que i

Nt = nombre total des composants

Cela montre qu'un tel modèle permet de définir des stratégies de répartition de charges qui pourraient optimiser les performances du système sur un horizon donné en prenant en compte les dépendances.

4.5 Effet de la maintenance corrective et leur nombre :

Soit T_p le temps entre deux actions préventives. Dans cet intervalle et au départ, seulement deux types de défaillances sont considérés, un type 1 qui est la défaillance totale (catastrophique) et un type 2 qui est une défaillance simple à réparer. Quand une défaillance aura lieu, elle sera de type 1 avec une probabilité conditionnelle à l'échec $p(t)$ (i.e. probabilité de défaillance de type 1 sachant que le composant est (défaillant) et de type 2 avec une probabilité :

$$q(t) = 1 - p(t).$$

En d'autres termes, la probabilité que la défaillance soit du type 1 est $p_{e,1}(t) = p(t)$. $p_e(t)$ et $q_{e,2}(t) = (1 - p(t)) \cdot p_e(t)$ sera alors la probabilité que la défaillance soit du type 2, avec $p_e(t)$ la probabilité de défaillance du composant.

Comme la défaillance du type 1 est réparée par un remplacement et celle de type 2 est réparée par une simple action, on peut simplement conclure que le remplacement aura lieu avec une probabilité égale à $p(t)$. $p_e(t)$ alors que la simple réparation est faite avec une probabilité égale à $(1 - p(t)) \cdot p_e(t)$.

Ces actions rajeunissent les composants grâce à un facteur d'amélioration qui leur est associé. Ce facteur est appelé encore le facteur de rajeunissement d'âge.

Soient m_{imp} et m_{par} les facteurs de rajeunissement associés respectivement à une réparation simple et à un remplacement. Ils peuvent prendre les valeurs 1 et 0.

Soit $m_{MC}(t)$ le facteur d'amélioration attendu de la maintenance corrective à l'instant t , il est calculé comme suit :

$$P_e(t) \cdot [p(t) \cdot 1 - p(t)] \cdot [m_{par} m_{imp}]^T = P_e(t) \cdot (P(t) \cdot m_{par} + (1 - p(t)) \cdot m_{imp}) \quad (8)$$

$$X_{j+1} = \frac{\int_{t_0(j)}^{\infty} r(t)}{r(t_0(j))} \quad (9)$$

$r(t)$: la fiabilité du composant;

$t_0(j)$: l'âge du composant après la $j^{\text{ème}}$ action corrective

Lors d'une MC, on suppose que l'âge effectif est X_j , pour la première réparation corrective, est réduit à $t_0(j) = m_{MC}(j) \cdot X_j$. A partir de la MC suivante, la partie de l'âge sera donc réduite ainsi :

$$t_0(j) = m_{MC}(j) \cdot \left(\sum_{i=1}^j x_i - \sum_{i=1}^{j-1} x_i \right) \quad (10)$$

4.5.1 Le modèle proposé pour le calcul de β :

Le facteur β est par définition le facteur qui reflète l'influence du covariant auquel il est associé. Dans cet article, le covariant n'est autre que la maintenance corrective. L'influence de la maintenance corrective peut se traduire par le facteur de rajeunissement m_{MC} .

Cependant, l'instant auquel cette action corrective est faite a une grande importance puisqu'il situe l'action corrective par rapport au temps où on a choisi de faire la maintenance préventive. Soit :

t_j : l'instant où l'action corrective j est effectuée depuis T_i .

T_i : l'instant choisi pour faire la maintenance préventive pour le composant i depuis la maintenance préventive précédente ;

N : le nombre total de la maintenance corrective ;

Ainsi, nous serons non seulement capable de savoir le nombre de MC pendant T_p mais également leur efficacité. Ces deux paramètres sont fondamentaux pour déterminer le β associé à la MC.

4.5.2 Le modèle proposé pour le calcul de $p(t)$:

Généralement, la décision lors de l'exécution d'une action de maintenance, dépend de :

- la criticité du composant (mesurée par un facteur d'importance par exemple et/ou le gain de productivité potentiel);
- le coût de cette action.

En se basant sur ces deux critères nous proposons que $p(t)$ caractérise une pondération plutôt qu'une probabilité. $p(t)$ pourrait être une fonction du type $f(C_i(t), IF_i(t))$.

La fonction f doit satisfaire quelques propriétés:

- ◆ $p(t)$ doit être comprise entre 0 et 1 ;
- ◆ $p(t)$ doit s'approcher de la valeur 1 si l'importance du composant augmente et diminue si son importance décroît, tout en tenant compte du coût des actions de maintenance.

La fonction $f(C_i(t), IF_i(t))$ peut donc prendre la forme suivante :

$$P(t) = e^{-\frac{C_j \cdot C_{max}^{-1}}{IF_j(t)}} \quad (11)$$

C_j : est le coût qu'engendre le processus de la maintenance du composant j .

Ce coût ne tient pas en compte uniquement le coût de l'action à réaliser mais encore celui engendré par l'indisponibilité du système lors de cette action. On choisit pour $IF_j(t)$, le facteur d'importance de Birnbaum du composant j à l'instant t . En fait, on a besoin de mesurer l'importance de chaque composant de la structure afin de pouvoir estimer l'action préventive appliquée (ici on ne fait pas intervenir le gain de productivité potentiel mais il pourrait l'être grâce à l'UGF).

Plusieurs recherches sont faites pour estimer l'importance des composants ou groupes de composants, cependant celui de Birnbaum reste simple à calculer.

Afin d'équilibrer l'influence relative de C_j et $IF_j(t)$, on normalise le coût par rapport à une valeur maximale C_{max} .

Elle prend la valeur maximale du coût que prend les actions de maintenance à appliquer (éventuellement le remplacement).

Cette expression de $p(t)$ favorise le changement d'un composant assez critique si son prix est modéré et favorise les réparations simples tant que la criticité du composant ne justifie pas son remplacement. A noter ici que la forme exponentielle n'est pas la seule à satisfaire ces conditions; il existe d'autres fonctions.

On peut citer par exemple la fonction logarithmique $\log_{(1+p(t))}$ ou bien $\frac{1}{(1+p(t))}$

4.6 Le calcul de la fiabilité :

4.6.1 Calcul de la fiabilité individuelle :

La fiabilité d'un composant est donc :

$$R(t; z) = [r_0(t)]^{\exp \beta_{CM} z_{CM}} \quad \text{Avec}$$

$$r_0(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_0(x) d(x) \right] \quad (12)$$

λ_0 : Le taux de défaillance du composant (sans influence) ;

Z_{CM} : désigne les covariants, dans notre cas on ne prend en compte que la maintenance corrective.

β_{CM} : Le facteur de régression correspondant à l'influence de la maintenance corrective.

4.6.2 Calcul de la fiabilité du système :

La fonction génératrice associée à un composant a seulement deux termes et peut être définie à l'instant t comme suit :

$$U_j(z) = r_j(t)z^{G_j} + (1 - r_j(t))z^0 \quad (13)$$

Pour obtenir la fonction génératrice d'un sous-ensemble contenant un certain nombre de composants, des opérateurs de composition sont nécessaires. Ces opérateurs déterminent la fonction polynômiale $U(z)$ pour un groupe de composants de structure série-parallèle en utilisant des opérations algébriques simples. Tous les opérateurs de composition prennent la forme :

$$\Omega(U_1(z), U_2(z)) = \Omega \left[\sum_{i=1}^I \alpha_i z^{a_i} \sum_{j=1}^J \beta_j z^{b_j} \right] = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_i \beta_j z^{w(a_i, b_j)} \quad (14)$$

La fonction w exprime la productivité totale d'un sous-système constitué de deux composants en parallèle ou en série à partir de la productivité individuelle de chaque composant.

La définition de la fonction w dépend strictement du moyen de mesure de la performance du système et des interactions qui peuvent exister entre les composants du système.

Dans ce chapitre, nous considérons que la capacité totale des composants en parallèle est égale à la somme des capacités des composants. Cela sous-entend que quand un composant est en panne, la charge reste identique pour chaque composant : nous ne prenons donc pas en compte une éventuelle actualisation de la répartition de charge. Par conséquent :

$$W(a, b) = a + b$$

Quand les composants sont en séries, le composant de moindre capacité devient le composant critique (bottleneck) du système. Par conséquent pour une paire de composant en série :

$$W(a, b) = \min(a, b)$$

En conséquence, et après l'application des opérateurs de composition, nous pouvons obtenir la fonction U du système tout entier. Elle est de la forme

$$U(z) = \sum_{K=1}^K q_k z^{x_k} \quad (15)$$

A noter que la performance (productivité) du système peut avoir K valeurs possibles (discrètes) dans ce modèle. Généralement, la fiabilité d'un système multi-composant est définie comme suit :

$$R(t, W) = pr\{G_{sys}(t) \geq w\} \text{ quel que soit } t' \leq t \quad (16)$$

Où $G_{sys}(t)$ est la productivité du système à l'instant t et W est la productivité exigée c.à.d. la demande [16,17]. Par conséquent, la fiabilité peut être calculée comme suit :

$$R(t, w) = pr(X \geq X) = \sum_{x_k > w} q_k(t) \quad (17)$$

4.7 Exemple:

Pour évaluer l'impact de l'intégration des effets de la dépendance et de la maintenance corrective sur la fiabilité du système on propose une comparaison entre les courbes de fiabilité tout en considérant :

- les composants du système sont indépendants et les actions de maintenance corrective sont considérées en tenant que réparations minimales.
- les composants du système sont indépendants mais nous tenons compte de l'effet des actions de maintenance corrective.
- les composants du système sont dépendants et nous tenons compte de l'effet des actions de maintenance corrective.

Pour établir ces comparaisons, une structure constituée de 8 composants (voir la figure 4.1) est considérée. Ce système est constitué des composants en série-parallèle. Chaque composant est caractérisé par son état binaire c.-à-d. que le composant fonctionne ou tombe en panne. la fiabilité de chaque composant est définie par loi de Weibull :

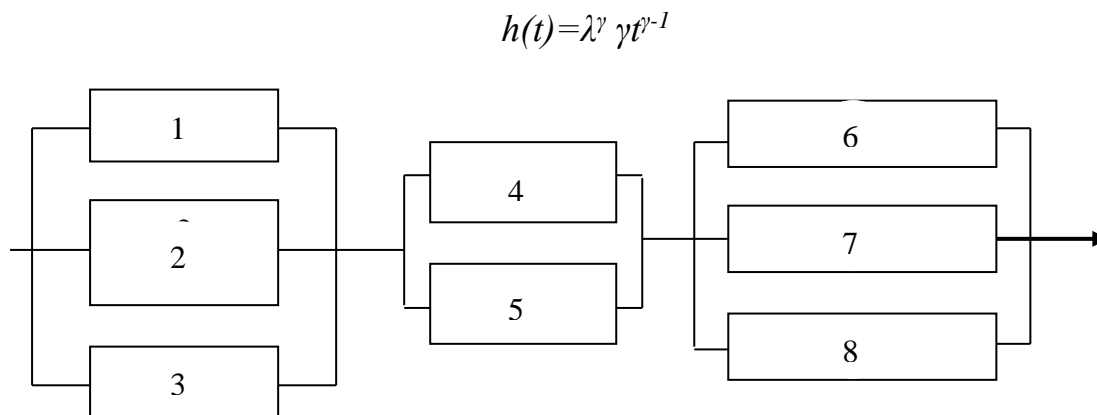


Fig.4.2 : La structure étudiée

Leurs caractéristiques sont citées dans le tableau 4-1, l'action de maintenance corrective est caractérisé par un facteur de réduction d'âge. les diverses valeurs de ce facteur sont citées dans le tableau 4-2

Numéro du composant	λ	γ	Performance
1	0.05	1.8	8
2	0.05	1.8	8
3	0.05	1.8	9
4	0.07	1.2	8
5	0.01	1.5	9
6	0.01	1.8	8
7	0.01	1.8	5
8	0.02	2	8

Tableau 4.1 : Les caractéristiques des composants

Facteur de réduction d'âge (action)
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
Remplacement (Rep)

Tableau4.2 : Caractéristiques des Actions Envisagées dans les trois cas étudiés

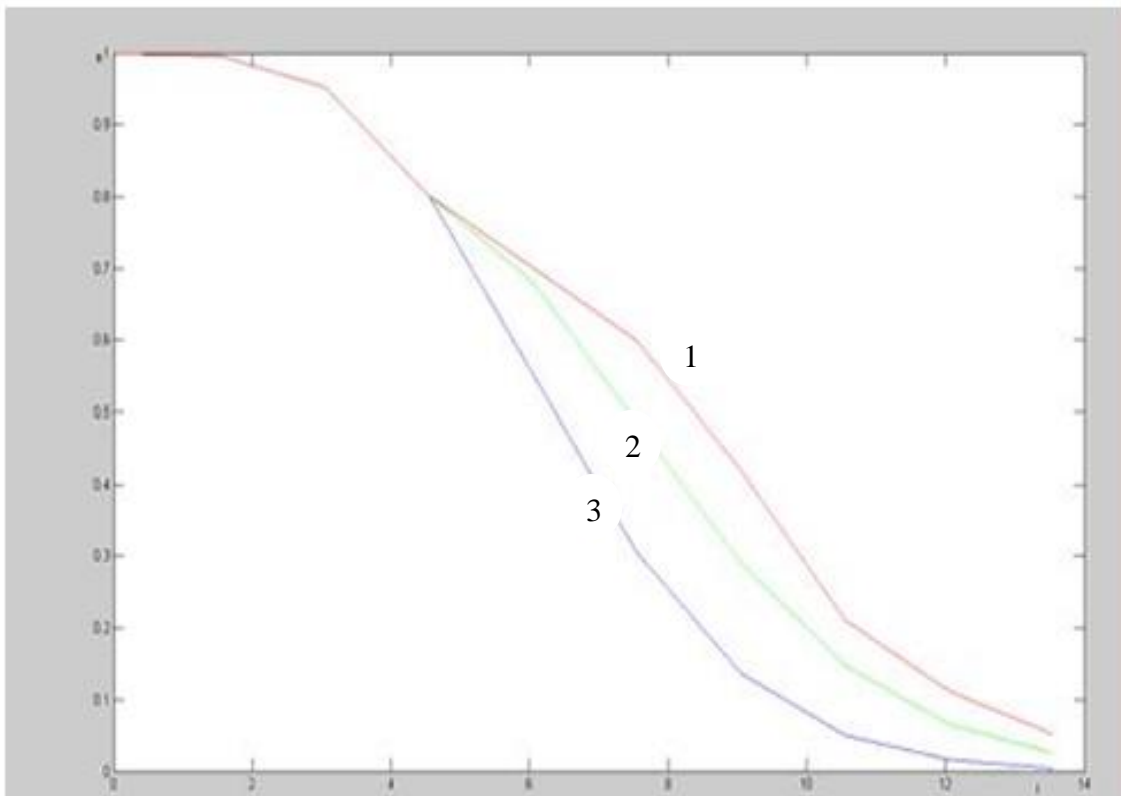


Fig. 4.3: La courbe de fiabilité d'un système (3 2 3)

La courbe 1 représente la fiabilité du système tout en tenant compte de la dépendance aussi bien que de l'effet de maintenance corrective, La courbe 2 représente la fiabilité d'un système

avec les composants indépendants en tenant compte de l'effet de maintenance corrective. La courbe 3 représente la fiabilité du système avec les composants indépendants et la considération de la maintenance corrective comme réparation minimale.

Nous pouvons noter que la meilleure courbe de fiabilité est obtenue pour le cas 1. Une première conclusion peut nous indiquer que la dépendance a un effet positif sur la fiabilité du système. Cependant, cet effet positif peut être expliqué par le fait que le nombre de maintenances correctives appliquées a été augmenté ce qui signifie que le coût de maintenance du système va augmenter ; un facteur qui n'est pas visible sur la figure 2.

Cette conclusion converge avec [97] qui a démontré que la dépendance dans quelques structures est un bon facteur s'il est bien exploité, en particulier en conception.

4.8 Conclusion

Ce chapitre propose une nouvelle méthode qui permet de prendre en compte les effets de la dépendance et de la maintenance corrective sur la fiabilité d'un système multi-états. Cette méthode est basée sur le changement de la charge à laquelle est soumis le composant ainsi qu'au nombre d'actions correctives appliquées. Les facteurs de réduction d'âge ont été employés pour déterminer le nombre "*dynamique*" des actions correctives. Deux modèles linéaires sont plus tard employés pour estimer un β convenant pour des changements des charges et des effets de maintenances correctives effectuées. Les résultats obtenus sont également cohérents avec ceux de [90].

Généralement, le facteur β est estimé en maximisant des fonctions de vraisemblance. Dans cet article, nous avons proposé une autre méthode pour déterminer ce coefficient tout en prenant en compte son rôle qui consiste à refléter l'importance de l'influence du covariant associé. Cette méthode est basée sur les informations recueillies de chaque composant individuellement permettant ainsi de calculer un β individuel pour chaque composant. La fonction génératrice universelle est ensuite utilisée pour refléter l'impact global de la totalité de ces facteurs sur le système entier. L'optimisation de cette technique paraît un sujet intéressant de recherches futures. Pendant cette recherche, nous étions seulement intéressés par l'évaluation de fiabilité. Employer ce modèle dans une étude d'optimisation de maintenance préventive s'est avéré primordial pour réduire le coût de la politique de maintenance.

Chapitre 5

Méthodes d'optimisation

5.1 Introduction

La plupart des problèmes d'optimisation combinatoire appartiennent à la classe des problèmes NP-difficiles et ne possèdent donc pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données [98]. Etant donnée l'importance de ces problèmes, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes exactes qui garantissent l'optimalité de la solution et les méthodes approchées (incomplètes) qui perdent la complétude pour gagner en efficacité.

Parmi les méthodes exactes, on trouve :

- La programmation dynamique [99] consistant à placer le problème dans une famille de problèmes de même nature mais de difficulté différente puis à trouver une relation de récurrence liant les solutions optimales de ces problèmes.
- Le Branch & Bound [100] consistant à faire une énumération implicite en séparant le problème en sous-problèmes et en évaluant ceux-ci à l'aide d'une relaxation (continue ou lagrangienne) jusqu'à ne plus avoir que des problèmes faciles à résoudre ou dont on sait avec certitude qu'ils ne peuvent pas contenir de solution optimale.

Les méthodes exactes ont permis de trouver des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Malgré les progrès réalisés en matière de la programmation linéaire en nombres entiers, le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution optimale risque d'augmenter exponentiellement avec la taille du problème, ce qui rend les méthodes exactes inefficaces face aux applications de taille importante.

Les méthodes approchées constituent une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale. Parmi ces méthodes, il faut distinguer les heuristiques ciblées sur un problème particulier et les métaheuristiques plus puissantes et adaptables pour résoudre un grand nombre de problèmes.

Les métaheuristiques sont apparues dans les années 1980 et forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé. Grâce à ces métaheuristiques, on peut proposer aujourd'hui des solutions approchées pour des problèmes d'optimisation classiques de plus grande taille et pour de très nombreuses applications qu'il était impossible de traiter auparavant [101] [102]. On constate, depuis ces dernières années, que l'intérêt porté aux métaheuristiques augmente continuellement en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle. L'engouement pour les métaheuristiques est attribuable à plusieurs explications. Une des premières motivations pour ce champ de recherche provient de la pratique [103]. En effet, les contextes réels présentent des problèmes de gestion complexes devenant difficiles à traiter et les ressources disponibles sont souvent limitées. Le développement de ce domaine est également attribuable à la théorie de la complexité qui fournit une base rationnelle à l'utilisation de ces méthodes [104].

Enfin, les nouvelles possibilités informatiques expliquent aussi ce phénomène.

Les métaheuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire.

En plus de cette base stochastique, les métaheuristiques sont généralement itératives, c'est-à-dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes, c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas l'information du gradient de la fonction objectif. Elles tirent en particulier leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche.

Les métaheuristiques, du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions [105].

Pour illustrer cette caractéristique, citons notamment :

- L'optimisation multi objectif (dites aussi multicritère) [106], ou il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise alors non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima «au sens de Pareto» formant la «surface de compromis» du problème.
- L'optimisation dynamique, ou la fonction objective varie dans le temps. Il faut alors approcher au mieux l'optimum à chaque pas de temps.

La parallélisations, ou l'on cherche à accélérer la vitesse de l'optimisation en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les méta- heuristiques pour qu'elles soient distribuées.

L'hybridation, qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta- heuristiques différentes en les combinant [107].

Enfin, la grande vitalité de ce domaine de recherche ne doit pas faire oublier qu'un des intérêts majeurs des méta- heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes concrets. L'utilisateur est généralement demandeur de méthodes efficaces permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable. Un des enjeux de la conception des méta-heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter à un problème donné.

5.2 Organisation Générale :

Les méta- heuristiques sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (les méthodes de voisinage comme le recuit simulé et la recherche tabou), en biologie de l'évolution (les algorithmes évolutifs comme les algorithmes génétiques [108,109]. les algorithmes immunitaire et les stratégies d'évolution) [110] ou encore en éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis).

On propose une présentation non exhaustive des méta-heuristiques les plus utilisées

Fig 5.1

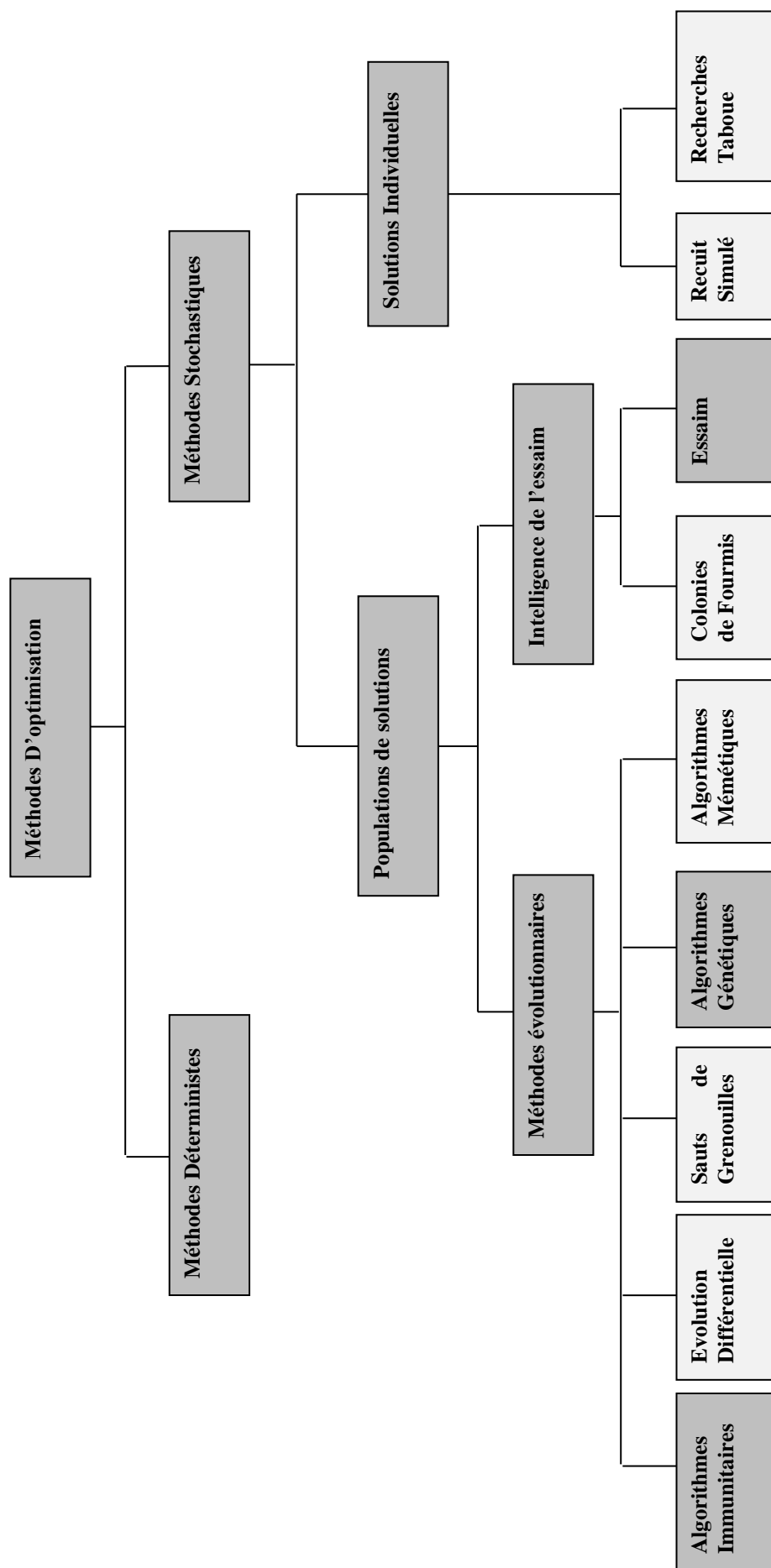


Fig.5.1 : Métaheuristiques d'optimisation

Les métaheuristiques stochastiques les plus efficaces sont ainsi subdivisées en deux grandes catégories : les algorithmes évolutionnaires et l'intelligence de l'essaim [111]. Les premières sont basées sur un principe de modifications progressives de l'ensemble de solutions candidates, tandis que les secondes exploitent un système de communication et de coopération entre solutions candidates.

D'une manière générale, les méta-heuristiques sont basées sur un même principe de base [112] : une démarche itérative.

Ces itérations reproduisent deux phases : une phase évaluative et une phase opérative.

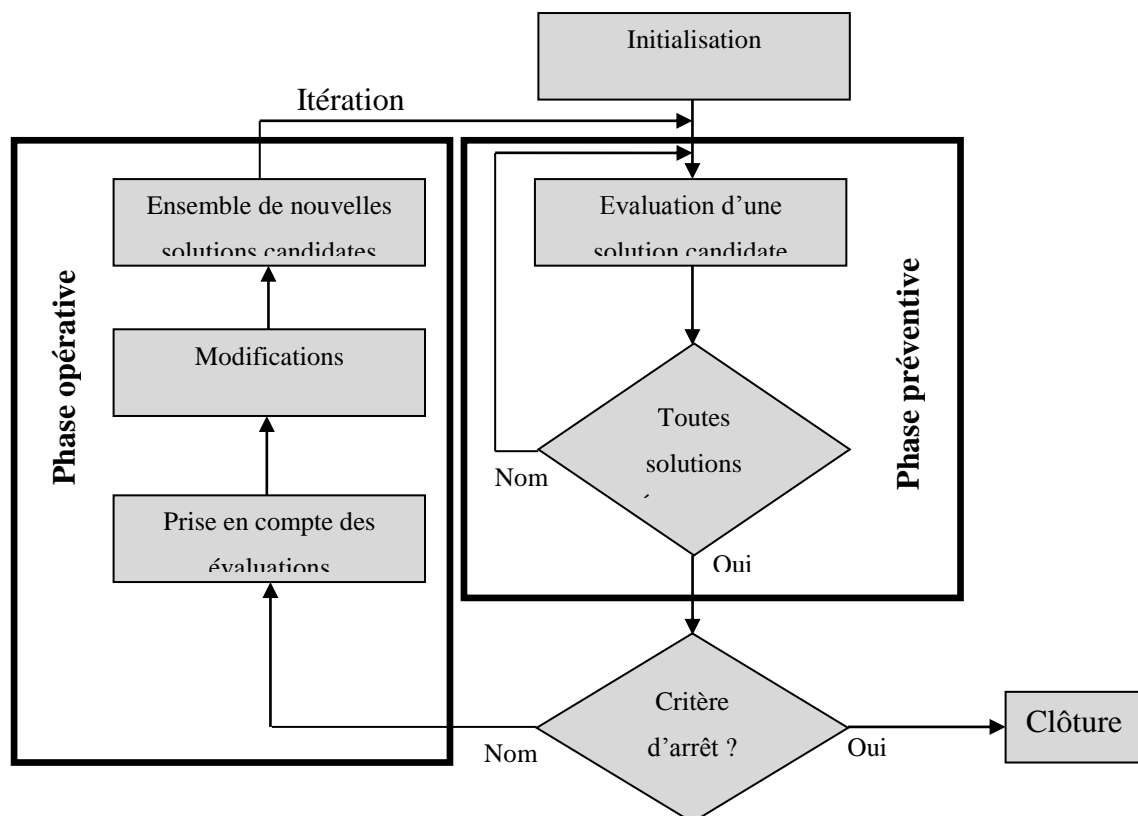


Fig.5.2: Squelette de principe des métaheuristiques stochastiques

La Figure 5-2 illustre le squelette des métaheuristiques stochastiques. Les deux phases sur lesquelles sont effectuées les itérations, sont précédées d'une étape d'initialisation, durant laquelle est généré aléatoirement un premier ensemble de solutions. La phase évaluative consiste à attribuer une évaluation à chaque solution candidate au moyen de la fonction objectif.

Cette évaluation est directement égale à la valeur de la fonction objectif pour la solution considérée. La phase opérative vise à générer un nouvel ensemble de solutions candidates à partir de l'ensemble des solutions évaluées.

Nous insistons sur les notions suivantes pour l'ensemble de ce travail :

- ✓ Solution (ou solution candidate) : vecteur de variables de conception instanciées ;
- ✓ Population : ensemble de solutions candidates pour une itération donnée ;
- ✓ Evaluation : exécution de la fonction objectif pour une solution donnée afin d'y associer la valeur fournie par ladite fonction ;
- ✓ Itération : Processus regroupant les phases évaluative et opérative.

Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement à deux méthodes stochastiques d'optimisation :

- ✓ L'algorithme à colonies de fourmis.
- ✓ L'algorithme du système immunitaire artificiel

5.3 L'algorithme à colonies de fourmis :

Cet algorithme est basé essentiellement sur l'observation des fourmis qui construisent des chemins entre une source de nourriture et leur nid. Les fourmis sont capables de déposer sur leur chemin une certaine quantité de substance chimique volatiles, appelé phéromone, qu'elles peuvent détecter ensuite. Les fourmis se déplacent au hasard mais sont attirées par les chemins de phéromones déposées par d'autres fourmis. Ainsi plus les fourmis empruntent un chemin, plus il y aura de fourmis attirées par cet itinéraire.

Le principe de l'optimisation par colonies de fourmis est apparu au début des années 90. Il est dû aux chercheurs M. Dorigo, V. Maniezzo et A. Colomi qui expliquent leur théorie dans un article fondateur [113]. Article dans lequel ils proposent une nouvelle approche pour l'optimisation stochastique combinatoire et mettent en avant la rapidité de leur nouvelle méthode à trouver des solutions acceptables tout en évitant des convergences prématurées. Ils qualifient leur méthode de versatile (elle peut s'appliquer à des versions similaires d'un même problème), robuste et bien sûr basée sur une population d'individus [113, 114, 115].

Les algorithmes de colonies de fourmis sont nés à la suite d'une constatation : les insectes sociaux en général, et les fourmis en particulier, résolvent naturellement des problèmes relativement complexes.

Les biologistes ont étudié comment les fourmis arrivent à résoudre collectivement des problèmes trop complexes pour un seul individu, notamment les problèmes de choix lors de l'exploitation de sources de nourriture.

L'optimisation par colonies de fourmis s'inspire du comportement des fourmis lorsque celles-ci sont à la recherche de nourriture. Les fourmis en se déplaçant déposent des phéromones, substances olfactives et volatiles. Chaque fourmi se dirige en tenant compte des phéromones qui sont déposées par les autres membres de la colonie. Les fourmis choisissent leur chemin de manière probabiliste.

Comme les phéromones s'évaporent progressivement, le choix probabiliste que prend une fourmi pour choisir son chemin évolue continuellement.

5.3.1 Origine :

L'idée originale provient de l'observation de l'exploitation des ressources alimentaires chez les fourmis [116]. En effet, celles-ci, bien qu'ayant individuellement des capacités cognitives limitées, sont capables collectivement de trouver le chemin le plus court entre une source de nourriture et leur nid.

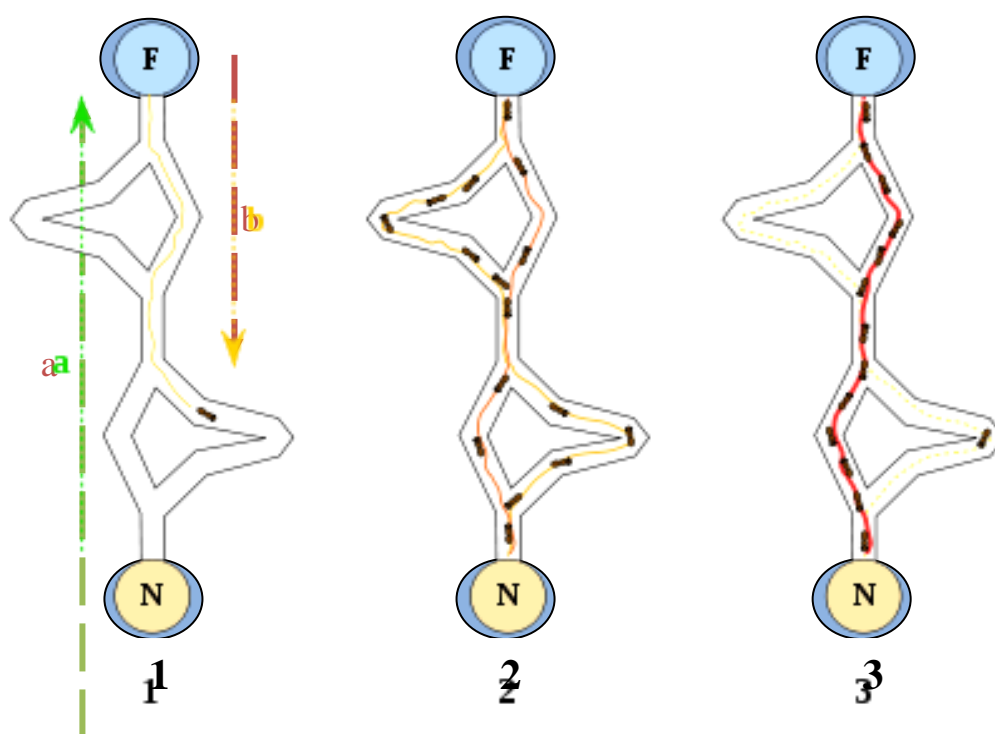


Fig.5.3 : Optimisation du chemin entre nid et source de nourriture

1) la première fourmi trouve la source de nourriture (F), via un chemin quelconque (a), puis revient au nid (N) en laissant derrière elle une piste de phéromone (b). 2) les fourmis empruntent indifféremment les quatre chemins possibles, mais le renforcement de la piste rend plus attractif le chemin le plus court. 3) les fourmis empruntent le chemin le plus court, les portions longues des autres chemins perdent leur piste de phéromones.

Des biologistes ont ainsi observé, dans une série d'expériences menées à partir de 1989, qu'une colonie de fourmis ayant le choix entre deux chemins d'inégale longueur menant à une source de nourriture avait tendance à utiliser le chemin le plus court.

Un modèle expliquant ce comportement est le suivant :

1. une fourmi (appelée « éclaireuse ») parcourt plus ou moins au hasard l'environnement autour de la colonie ;
2. si celle-ci découvre une source de nourriture, elle rentre plus ou moins directement au nid, en laissant sur son chemin une piste de phéromones ;
3. ces phéromones étant attractives, les fourmis passant à proximité vont avoir tendance à suivre, de façon plus ou moins directe, cette piste ;
4. en revenant au nid, ces mêmes fourmis vont renforcer la piste ;
5. si deux pistes sont possibles pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera, dans le même temps, parcourue par plus de fourmis que la longue piste ;
6. la piste courte sera donc de plus en plus renforcée, et donc de plus en plus attractive ;
7. la longue piste, elle, finira par disparaître, les phéromones étant volatiles ;
8. à terme, l'ensemble des fourmis a donc déterminé et « choisi » la piste la plus courte.

Les fourmis utilisent l'environnement comme support de communication : elles échangent indirectement de l'information en déposant des phéromones, le tout décrivant l'état de leur « travail ». L'information échangée a une portée locale, seule une fourmi située à l'endroit où les phéromones ont été déposées y a accès. Ce système porte le nom de « stigmergie », et se retrouve chez plusieurs animaux sociaux (il a notamment été étudié dans le cas de la construction de piliers dans les nids de termites).

Le mécanisme permettant de résoudre un problème trop complexe pour être abordé par des fourmis seules est un bon exemple de système auto-organisé.

Ce système repose sur des rétroactions positives (le dépôt de phéromone attire d'autres fourmis qui vont la renforcer à leur tour) et négatives (la dissipation de la piste par évaporation empêche le système de s'emballer). Théoriquement, si la quantité de phéromone restait identique au cours du temps sur toutes les branches, aucune piste ne serait choisie. Or, du fait des rétroactions, une faible variation sur une branche va être amplifiée et permettre alors le choix d'une branche. L'algorithme va permettre de passer d'un état instable où aucune branche n'est plus marquée qu'une autre, vers un état stable où l'itinéraire est formé des « meilleures » branches.

Les méthodes de recherche par colonie de fourmis ont une particularité :

la recherche de solutions s'effectue sur base de la totalité de la population et non plus à partir de quelques meilleurs individus (comme c'est le cas dans les algorithmes évolutionnaires). Cette particularité non négligeable a donné naissance à la création de nombreux types d'algorithmes de recherche, nous en découvrirons ici les grandes lignes.

Le concept général est de simuler le comportement de plusieurs agents collaborants dans la recherche d'une meilleure solution en utilisant un moyen de communication simple : la phéromone.

Dans le cadre de la métaheuristique d'optimisation par colonie de fourmi, les agents sont des fourmis. Bien entendu, il y aura quelques différences entre les fourmis naturelles et celles utilisées dans le domaine informatique que nous nommerons désormais fourmis artificielles. Ainsi, une fourmi artificielle :

1. n'est pas totalement aveugle et peut donc voir plus loin que son entourage direct ;
2. évolue dans un univers où le temps est discret ;
3. dispose d'une certaine mémoire lui permettant de retenir la solution qu'elle a construite ;
4. gère la quantité de phéromone déposée en fonction de la qualité de la solution et peut procéder à différents types de dépôts phéromonaux.

Ces quelques améliorations ne sont pas sans conséquences, nous allons le découvrir ci-dessous.

Pour commencer, découvrons l'impact engendré par l'acuité visuelle de nos fourmis artificielles. Très clairement, cela permet à la fourmi de se guider autrement que par son seul environnement direct. Ce guide est en fait une valeur que nous appellerons valeur heuristique, c'est-à-dire une valeur pouvant influencer le choix fait par notre fourmi.

Par exemple, dans le cadre de la recherche d'un plus court chemin, lorsqu'une fourmi devra faire un choix sur le chemin à suivre, une valeur heuristique pouvant lui simplifier la tâche serait, par exemple, la longueur des chemins accessibles. Cette valeur heuristique est donc une donnée propre au problème qui permet de spécialiser la métaheuristique. Il s'agit là d'un atout important car, utiliser une métaheuristique comme méthode de recherche universelle n'est pas une bonne idée et conduirait certainement à de médiocres résultats. C'est par l'inclusion de connaissances propres au problème étudié que la méthode de recherche fournira les meilleurs résultats.

5.4 Algorithme du système immunitaire artificiel :

5.4.1 Introduction :

Dans le but de résoudre des problèmes complexes, des idées inspirées à partir de mécanismes naturels ont été exploitées pour développer des heuristiques inspirées de la nature. Le système immunitaire artificiel (AIS) est un paradigme récent qui tente de capturer des caractéristiques intéressantes des systèmes immunitaires naturels (NIS), comme la mémorisation, la reconnaissance de formes, l'apprentissage, et les capacités d'adaptation [117,118].

Les systèmes immunitaires artificiels sont bien adaptés à l'extraction de connaissance et donnent des résultats intéressants [119]. Une application intuitive de l'AIS a été menée par Forrest [120], Hofmeyer [121] et Kim [122] dans le domaine de la sécurité informatique et la détection d'intrusion dans les réseaux. Dans le cadre du clustering, on peut citer les travaux de De Castro [123,124] qui a réalisé un clustering des flux de données sur le web et le travail de Nasraoui [125] qui propose les concepts de bases pour l'extraction de profils d'utilisateurs sur le web. Les AIS ont été également utilisés dans le cadre de l'extraction de règles et de nombreux auteurs les ont utilisés pour extraire des règles d'association dans le cadre de la détection de fraudes [126]. L'AIS a été également appliqué dans le cadre de l'analyse de données [127], et la classification des objets [128].

5.4.2 Le système immunitaire :

Le système immunitaire sert à protéger l'organisme contre les « agressions » d'organismes extérieurs. Pour ce faire, il existe plusieurs cellules qui contribuent à éliminer ces intrus nommé antigènes.

En effet, lorsqu'une bactérie ou un corps étranger envahit l'organisme, une collection de cellules, de molécules et d'organes collaborent pour ingérer et digérer l'antigène rencontré. La cellule qui a reconnu la cellule du non-soi va être stimulée à proliférer (en produisant des clones de lui-même) et à se différencier en cellule permettant de garder en mémoire l'antigène, ou en cellule permettant de combattre les agressions.

A. Le Système Immunitaire Inné :

Le système immunitaire inné est composé d'un ensemble de cellules spécialisées dont le rôle principal est la liaison avec des modèles moléculaires trouvés dans des micro-organismes.

Cependant, ce système ne peut pas assurer la protection complète du corps. Il est caractérisé par [129] :

Ø Les mécanismes de détection des organismes étrangers sont constants, aussi bien pour les infections répétées.

Ø La réponse du système immunitaire inné est non spécifique à un type particulier d'intrus mais elle est identique contre tous les pathogènes qui envahissent le corps.

Ø Il joue un rôle vital pour l'initialisation et la régularisation de la réponse immunitaire adaptative.

B. Le Système Immunitaire Adaptatif :

Le système immunitaire adaptatif est constitué de types différents de cellules dont chacun joue un rôle important. Le rôle central est assuré par les lymphocytes qui sont composés de deux types de cellules :

- **cellule B**
- **cellule T.**

Le système immunitaire adaptatif est caractérisé par [129] :

Ø Le système immunitaire adaptatif s'occupe des intrus qui ne sont pas détectés par le système immunitaire inné.

Ø Le système immunitaire adaptatif est généré dynamiquement contre les organismes étrangers pendant sa durée de vie. Il fournit des mécanismes plus efficaces qui seront adaptés aux changements antigéniques.

Ø La présence d'une mémoire immunologique qui permet aux cellules de se souvenir des intrus déjà rencontrés lors des prochaines rencontres.

C. La physiologie du système immunitaire :

Le processus de génération et de développement de cellules immunitaires est assuré principalement par deux organes [123] : *la moelle osseuse* et *le thymus*. La moelle osseuse est l'endroit de production de toutes les cellules sanguines et où certaines classes de cellules se développent. Le thymus est l'organe où une autre classe de cellules immunitaires migre pour passer l'étape de maturation.

Le système immunitaire possède d'autres types de cellules immunitaires, mais cette étude sera focalisée principalement sur les *lymphocytes*. Les lymphocytes sont des globules blancs produits dans la moelle osseuse spécialisés dans l'identification de pathogènes qui sont composés de deux types [123, 127] : les cellules B et les cellules T.

Les lymphocytes qui se développent dans la moelle osseuse sont nommés des *cellules B* et ceux qui migrent et se développent dans le thymus sont nommés des *cellules T*. Ces lymphocytes possèdent des récepteurs qui sont localisés sur leur surface responsable de la reconnaissance des modèles antigéniques.

5.4.3 Les cellules B :

La fonction principale des cellules B consiste à produire et à sécréter des molécules appelées *anticorps* comme une réponse aux corps étrangers [117]. Chaque cellule B produit un anticorps spécifique. Les anticorps sont des protéines spécifiques qui reconnaissent et lient avec d'autre protéine particulière. Le récepteur de cellule B est *anticorps (Antibody) (Ab)* (Figure 5.4 (a)).

5.4.4 Les cellules T :

Les cellules T peuvent être classées selon deux types : les cellules T d'aide (T helper) et les cellules T cytotoxiques (T killer). Les cellules T d'aide assurent des fonctions essentielles pour la régularisation de la réponse immunitaire par exemple l'activation ou la suppression du développement de certain type de réponse immunitaire. Par contre, les cellules T cytotoxiques assurent des fonctions de suppression des envahisseurs microbiens, des virus ou les cellules cancéreuses. Ainsi, les cellules T présentent des récepteurs sur leur surface (Figure 5.4 (b)).

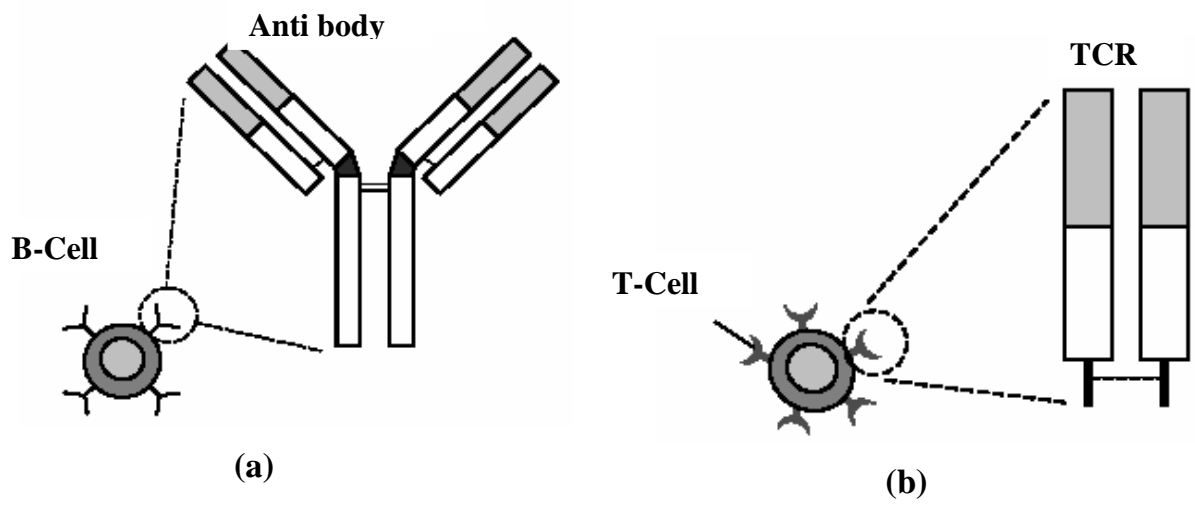


Fig.5.4 : Présentation d'une cellule B et une cellule T

5.5 Les processus de base d'un système immunitaire :

5.5.1 L'identification dans le système immunitaire naturel :

La reconnaissance d'un antigène est assurée par les lymphocytes. La réaction de chaque lymphocyte est limitée au nombre de cellules étrangères connues comme *antigènes*². En effet, chaque lymphocyte (cellules B et T) possède un ensemble de récepteur spécifique sur sa surface et ces récepteurs ont une forme complémentaire aux déterminants spécifiques connus comme *épitopes* présents sur la surface des antigènes. Un antigène est identifié s'il y'a une correspondance entre les récepteurs des cellules et l'épitope de l'antigène [123].

Les cellules B et T ont une structure semblable mais elles ont une manière de reconnaissance différente [123,127]. Les cellules B sont capables de reconnaître les antigènes libres (Figure 5.5 (a)), tandis que les cellules T ont la possibilité de reconnaître l'antigène qui est présenté par les molécules MHC3 (Figure 5.5 (b)).

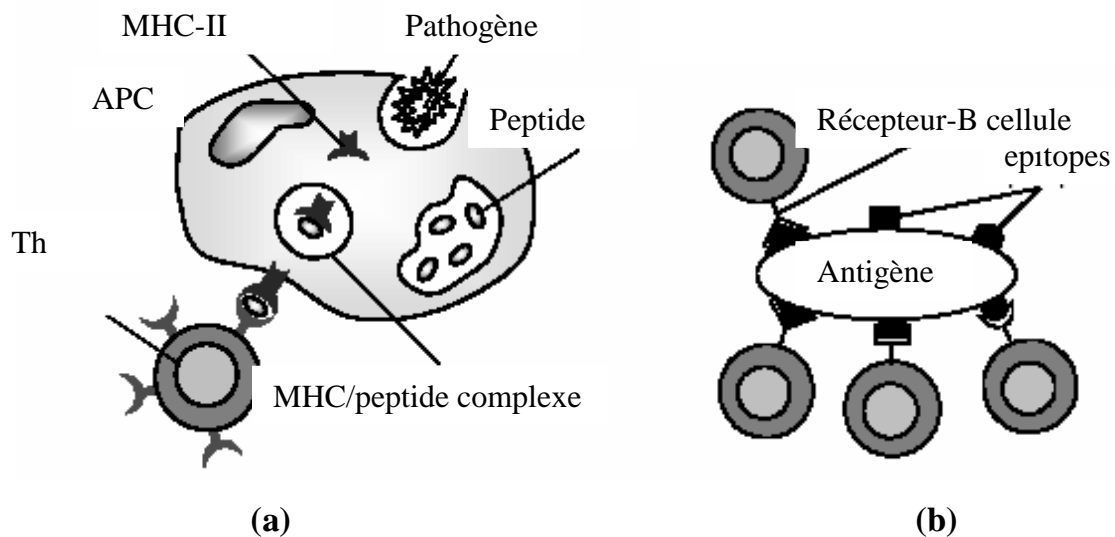


Fig.5.5 : L'identification dans le système immunitaire

5.5.2 L'activation :

L'identification de l'antigène est l'étape préalable pour déclencher une réponse immunitaire pour détruire l'antigène reconnu. Le système immunitaire humain emploie l'*appariement approximatif* pour déclencher la réponse immunitaire. Grâce à l'appariement approximatif, le système immunitaire est capable de détecter de nombreux antigènes.

L'appariement entre un récepteur d'un lymphocyte et un épitope de l'antigène détermine *l'affinité* entre un lymphocyte et un antigène [119]. Si l'appariement entre un récepteur et l'épitope est fort alors l'affinité est grande sinon elle est petite.

Les anticorps de cellules B matures seront activés d'une manière directe ou indirecte, le type d'activation est déterminé en fonction d'un *seuil d'affinité*. Quand une cellule B correspond à un antigène avec une affinité forte au-dessus du seuil d'affinité, alors elle sera activée directement pour se développer et se différencier. Sinon, si une cellule B correspond à l'antigène avec une affinité faible au-dessous du seuil d'affinité, elle a besoin de l'aide de cellule T d'aide (T helper) pour qu'elle puisse être activée (l'activation indirecte). Pour le cas des cellules T, l'activation aura lieu s'il y a un appariement entre une cellule T et une molécule MHC qui contient un fragment de l'antigène [130].

Après l'apparition d'une réponse immunitaire suite à un stimulus antigénique. Les cellules ayant identifiées l'antigène prolifèrent et différencient, ainsi elles constitueront des cellules mémoires [130].

5.6 Le principe du mécanisme de la sélection clonale :

En effet, les modèles antigéniques changent constamment, l'efficacité de la détection est maintenue par l'apprentissage dynamique de ces changements qui est assuré par la sélection clonale [123]. La théorie de la sélection clonale décrit les conséquences de la réponse immunitaire suite à un stimulus antigénique en assurant que seules les cellules qui reconnaissent l'antigène subissent aux proliférations et différenciations.

Quand un antigène envahit le corps, des cellules immunitaires reconnaissent cet antigène avec des degrés d'affinité différents. La réponse des cellules B est la production des anticorps dont chaque cellule sécrète un seul type d'anticorps qui est relativement spécifique à l'antigène. L'appariement fort entre les récepteurs des anticorps et l'antigène produit la stimulation des cellules B c'est-à-dire la prolifération (clone) et la maturation en des cellules de plasma. Le taux de prolifération d'une cellule est directement proportionnel à son affinité avec l'antigène [123, 130], les cellules qui ont les plus grandes affinités seront les plus proliférées et réciproquement. En plus, les lymphocytes qui ont une forte affinité peuvent se différencier en des cellules mémoires. (Figure 5.6).

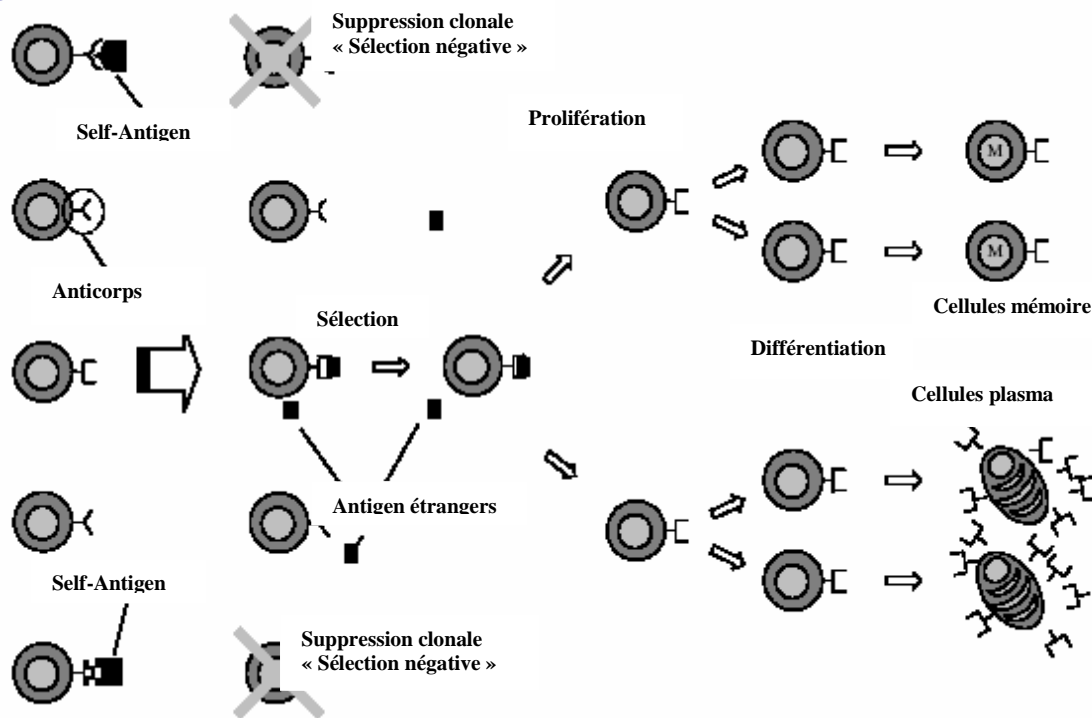


Fig.5.6 : Le principe de la sélection clonale

5.7 Système immunitaire artificiel (AIS) :

Les principales idées utilisées pour la conception de la métaheuristique immunitaire, sont les sélections opérées sur les lymphocytes, accompagnées par les rétroactions positives permettant la multiplication, et la mémoire du système. En effet, ces particularités sont capitales pour maintenir les caractéristiques auto-organisées du système immunitaire. L'approche utilisée dans les algorithmes AIS est très proche de celle des algorithmes évolutionnaires, mais a également été comparée à celle des réseaux de neurones [131]. On peut, dans le cadre de l'optimisation difficile, considérer les AIS comme une forme d'algorithme évolutionnaire présentant des opérateurs particuliers.

En effet, pour opérer la sélection, on se fonde par exemple, sur une mesure d'affinité entre le récepteur d'un lymphocyte et un antigène, la mutation s'opère quant à elle via un opérateur d'hyper mutation directement issu de la métaphore [128,132]. En se basant sur ce principe, l'algorithme CLONALG a été proposé par [123].

5.7.1 Algorithme du choix clonal (CLONALG)

En prenant comme base, la théorie du choix clonal du système immunitaire naturel, l'algorithme CLONALG peut être décrit comme suit :

1. Initialiser aléatoirement une population de M éléments.
2. Déterminer l'affinité d'un Ag avec chaque élément de la population M
3. Choisir n éléments de la population M , ayant la plus haute affinité et produire les copies de ces éléments proportionnellement à leur affinité avec l'Ag ; on en produit plus de copies tant que l'affinité est haute.
4. Faire subir une mutation à toutes ces copies avec un taux inversement proportionnel à leur affinité, plus l'affinité est élevée, plus le taux de mutation est faible.
5. Ajouter les éléments ayant subi une mutation à la population M , puis faire la sélection de m parmi ces éléments mûrs afin d'être retenus comme les cellules mémoires du système.
6. Répéter les étapes (2) à (5) jusqu'à ce qu'un certain critère soit satisfait.

On peut alors schématiser l'algorithme du choix clonal par l'organigramme de la fig. 5.7.

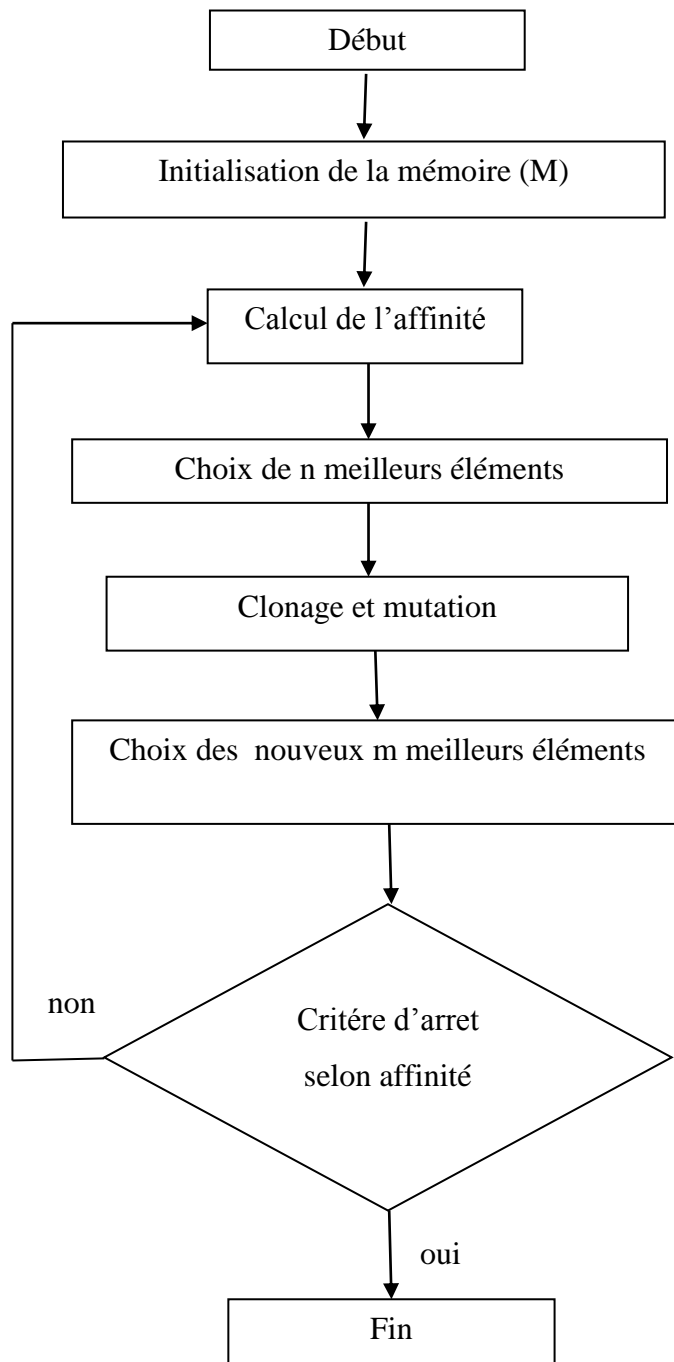


Fig.5.7 : Organigramme de la sélection Clonale

5.7.2 L'hypermutation Somatique :

Le résultat du processus de la sélection clonale est la reproduction de nouvelles cellules qui sont des sosies de leurs parents. Ces clones seront soumis à un mécanisme de mutation avec des taux très élevés (plus haut que des taux de mutation de cellules ordinaires). Ce mécanisme est appelé *l'hypermutation somatique* [123,125]. Le résultat est des filles de la cellule B initiale qui ont des récepteurs différents du parent et par conséquent des affinités différentes aux pathogènes. L'hypermutation somatique est inversement proportionnelle à l'affinité d'une cellule c'est-à-dire les cellules qui ont les plus hautes affinités seront les moins mutées et réciproquement. Le mécanisme de l'hypermutation somatique permet au système immunitaire d'augmenter la capacité d'identification des anticorps par rapport à un antigène sélectif.

5.7.3 La maturation d'affinité :

La maturation d'affinité est le processus qui garantit que le système immunitaire possède de plus en plus des cellules immunitaires spécialisées pour la reconnaissance des modèles antigéniques [123]. Ce processus est le résultat du mécanisme de l'hypermutation somatique suivi par une sélection. La mutation qui affecte les parties des récepteurs qui lient avec l'antigène suivi par une sélection qui garantit la préservation des solutions candidates de hautes qualités. Le récepteur qui possède la plus haute affinité permet d'avoir le plus fort appariement et ainsi la meilleure identification, ce qui permet d'avoir une réponse immunitaire exacte et efficace.

La réponse immunitaire est adaptative parce que l'opération de mutation suivie par une sélection permet aux récepteurs de cellules de s'y adapter à l'antigène. Cela garantit que les rencontres suivantes avec un certain type d'antigène mènent aux réponses plus puissantes.

5.8 Conclusion

Nous avons vu que les systèmes immunitaires possèdent un grand nombre de caractéristiques cognitives comme la mémoire, la reconnaissance des nouvelles formes, l'adaptabilité et le traitement distribué de l'information donc on peut dire que les systèmes immunitaires forment un excellent outil pour la création des contrôleurs adaptatifs, l'apprentissage et la détection des fautes.

Finalement, on peut dire que l'AIS est des méthodes puissantes dans la classification. L'intégration des AIS avec d'autres méthodes d'optimisation pourra peut être porté de meilleurs résultats en faisant le choix sur les meilleurs paramètres de d'apprentissage, prenant l'exemple des algorithmes génétiques et les algorithmes des colonies de fourm

Chapitre 6

Etude d'un exemple industriel

6.1 Introduction

Nous étudions dans ce chapitre le système de graissage d'une turbo-pompe alimentaire d'une centrale nucléaire 900MW présente sur la figure 5.1 et étudié par [133] et [134].

Le système AGR à pour fonction principale de lubrifier les paliers de la turbo-pompe du circuit secondaire d'une centrale nucléaire, aussi bien en conditions de fonctionnement normal que lors des arrêts intempestifs. Il doit donc assurer le maintien de la pression de l'huile en sortie de système alimentant les paliers de la turbo-pompe.

Son fonctionnement peut être précisé par le schéma fonctionnel de la figure 6.1 et décrit à partir des matériels qui le composent :

- Les pompes à courant alternatif 03PO et 05PO fonctionnent en redondance passive et servent à pomper l'huile de graissage pour l'acheminer vers les paliers de la turbo-pompe,
- L'échangeur thermique 01RF est utilisé pour la régulation de la température de l'huile,
- Les filtres 01FI et 02FI servent à épurer l'huile et leur basculement se fait à l'aide d'un système de deux vannes 3 voies à commande manuelle commune,
- La pompe 01PO à courant continu est une pompe de secours utilisée pour assurer la lubrification des paliers en cas d'arrêt intempestif de la turbo-pompe.

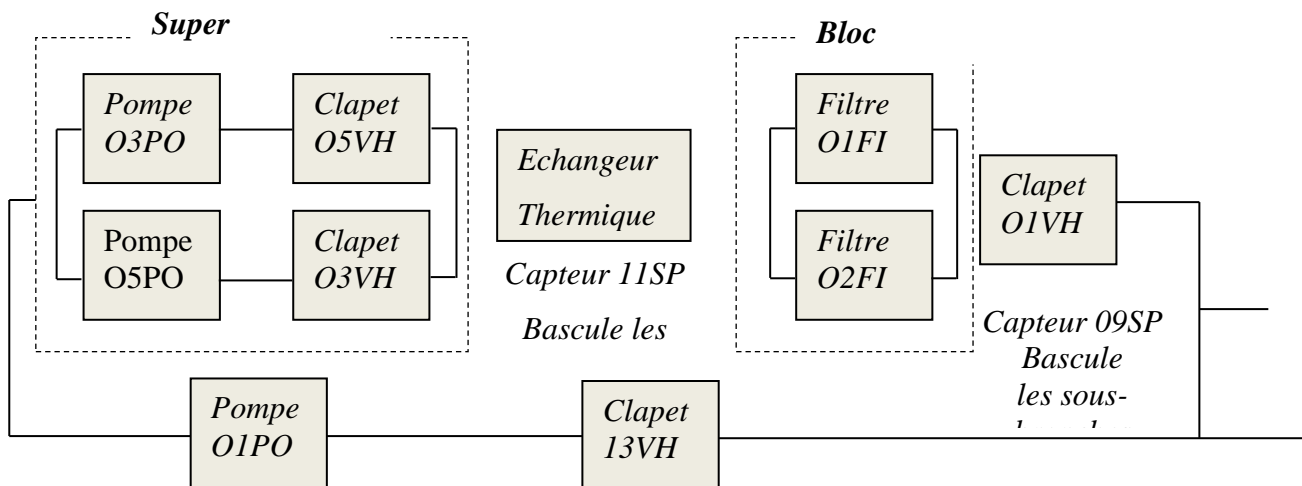


Fig.6.1 : Schéma fonctionnel du système AGR.

Le schéma fonctionnel de la figure 6.1 permet de distinguer les deux branches du système: les éléments de la branche I sont présentes en blanc, ceux de la branche II sont grises. Il fait également apparaître les notions de super-composant et de bloc filtrage, qui seront utilisées par la suite :

- Le super-composant est compose de deux branches en parallèles, chacune construite d'une pompe et d'un clapet, et d'un capteur permettant le basculement d'une branche a l'autre,
- Le bloc de filtrage est quant a lui compose de deux filtres en parallèle.

Les deux branches du système AGR fonctionnent en redondance passive :

- Le fonctionnement nominal se fait sur la branche I, composée du super-composant, de l'échangeur thermique, du bloc de filtrage et du clapet 01VH,
- L'alternance sur la branche II, composée de la pompe 01PO et du clapet 13VH, a lieu si une panne de la branche I est détectée par le capteur 09SP, afin de ne pas perdre le fonctionnement du système.

6.2 Le comportement des matériels du systeme AGR :

A l'aide des documents et données concernant le système AGR et ses matériels, nous identifions, pour chaque matériel les modes de défaillance critiques ainsi que les mécanismes de dégradation les plus importants et les symptômes associés.

Nous présentons sur les figures 6.3a à 6.3e le comportement possible de chaque matériel, sous la forme de schémas identiques à celui de la figure 6.3 :

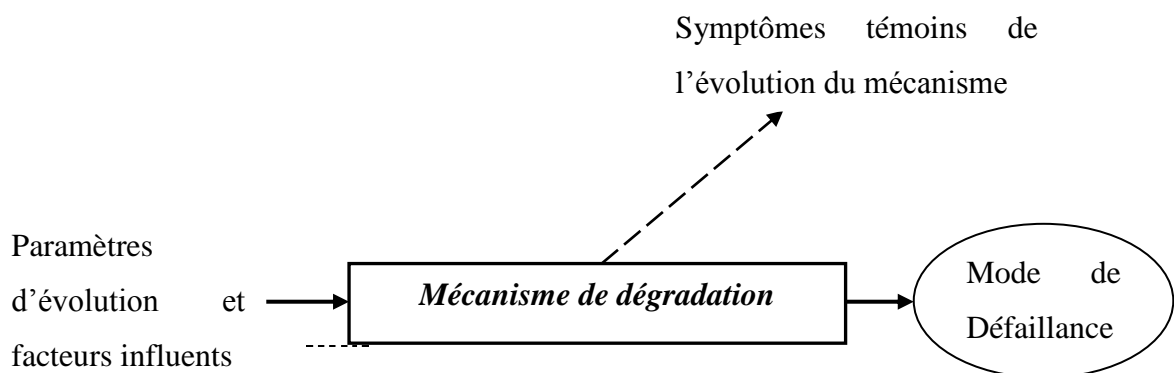


Fig.6.2 : Principe de représentation des relations entre les facteurs influents, les mécanismes de dégradations, les modes de défaillance et les symptômes d'un matériel.

Un mécanisme de dégradation évolue selon des paramètres nominaux et l'impact de facteurs influents. Il peut causer l'apparition d'un mode de défaillance et entraîner la présence de symptômes.

Comportement des pompes : matériels 03PO, 05PO et 01PO

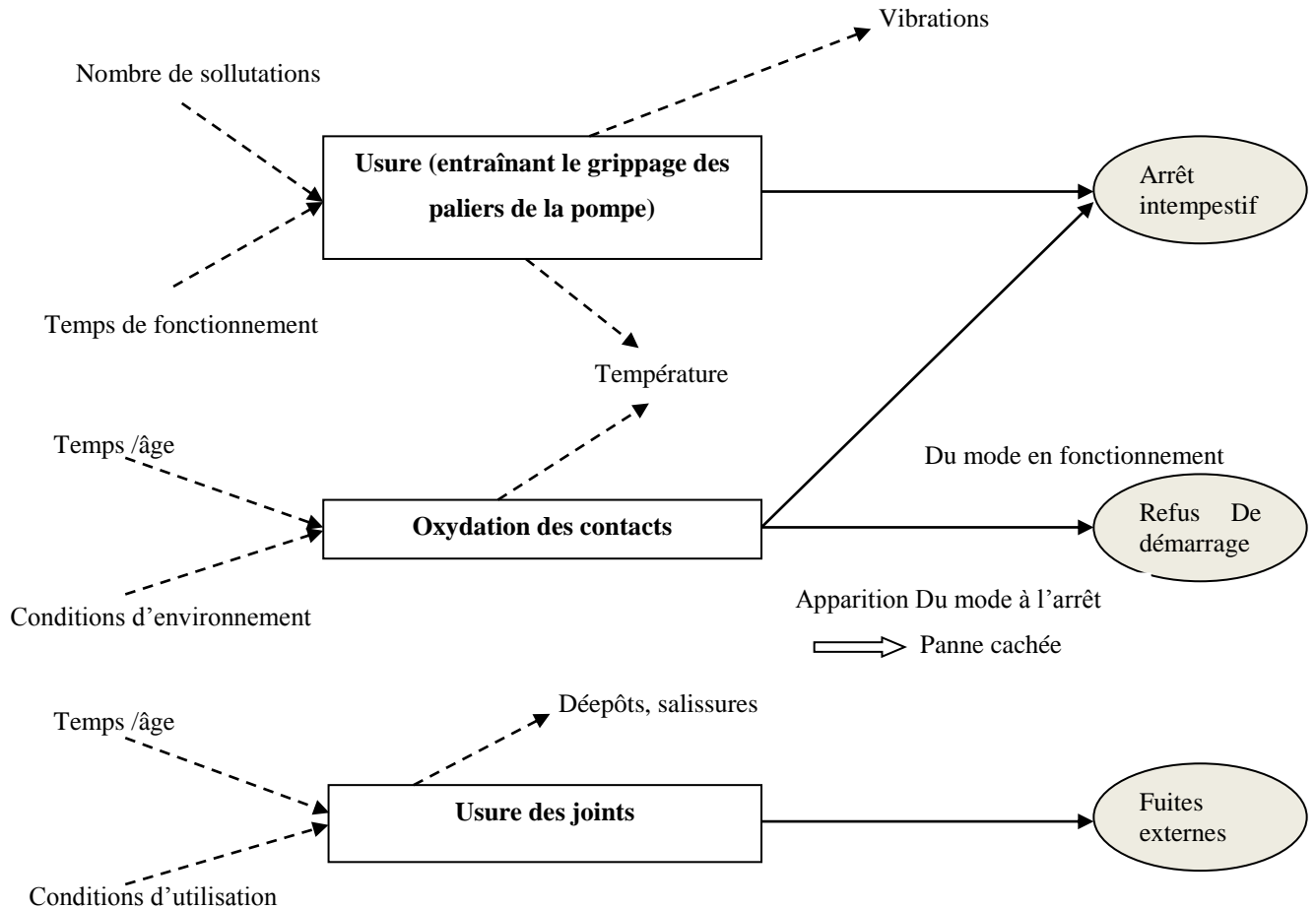


Fig.6.3a : Phénomènes de comportement des pompes pris en compte pour l'étude.

Comportement des clapets : matériels 03VH, 05VH, 13VH et 01VH

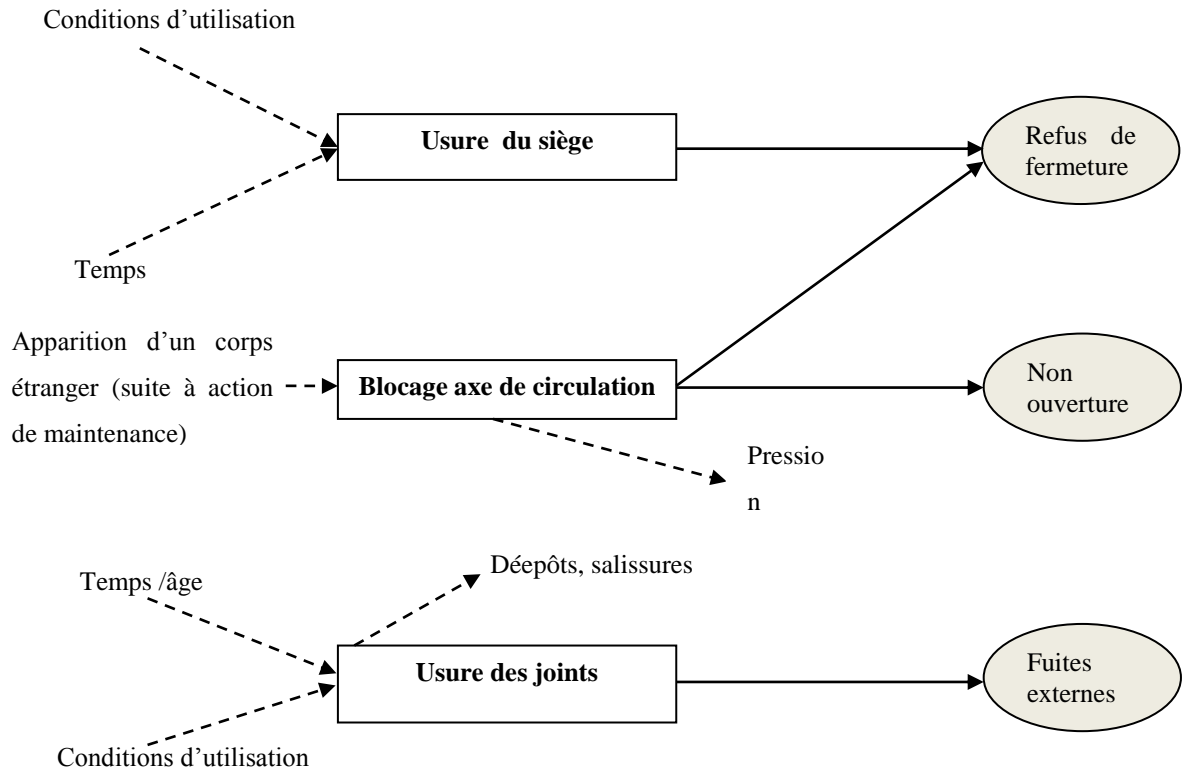


Fig.6.3b : Phénomènes de comportement des clapets pris en compte pour l'étude.

Comportement des capteurs : matériels 11SP et 09SP

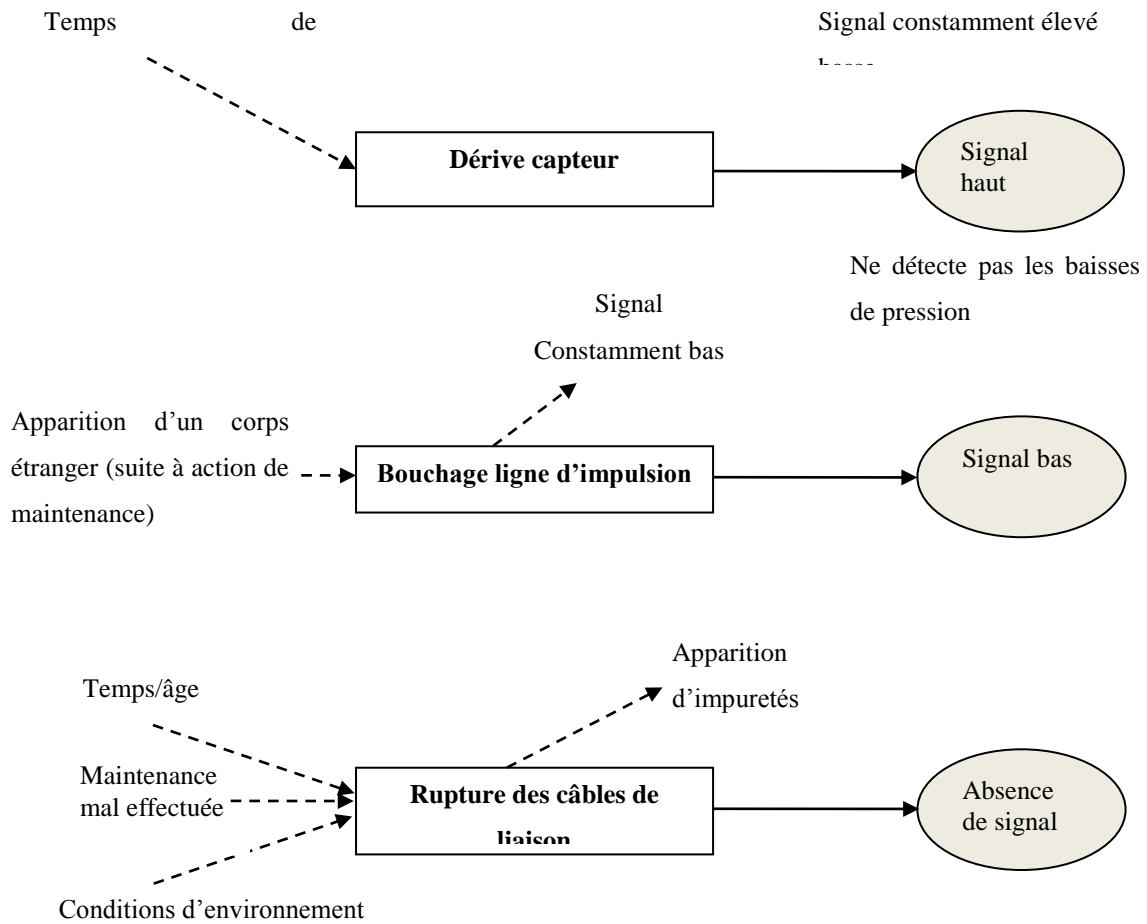


Fig.6.3c : Phénomènes de comportement des capteurs pris en compte pour l'étude.

Comportement des filtres : matériels FI01 et FI02

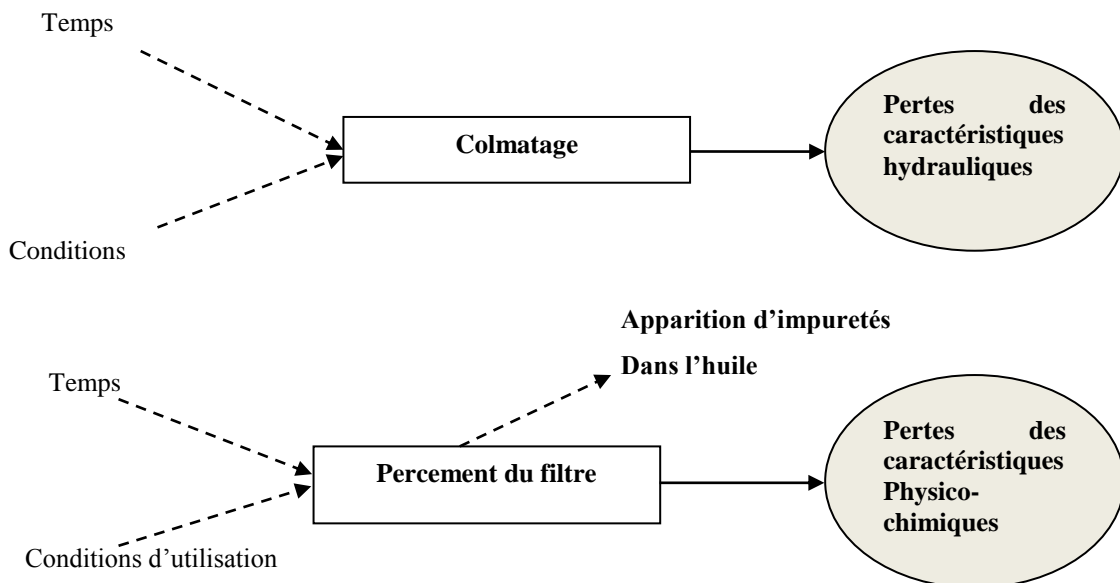


Fig.6.3d : Phénomènes de comportement des filtres pris en compte pour l'étude.

Comportement de l'échangeur thermique

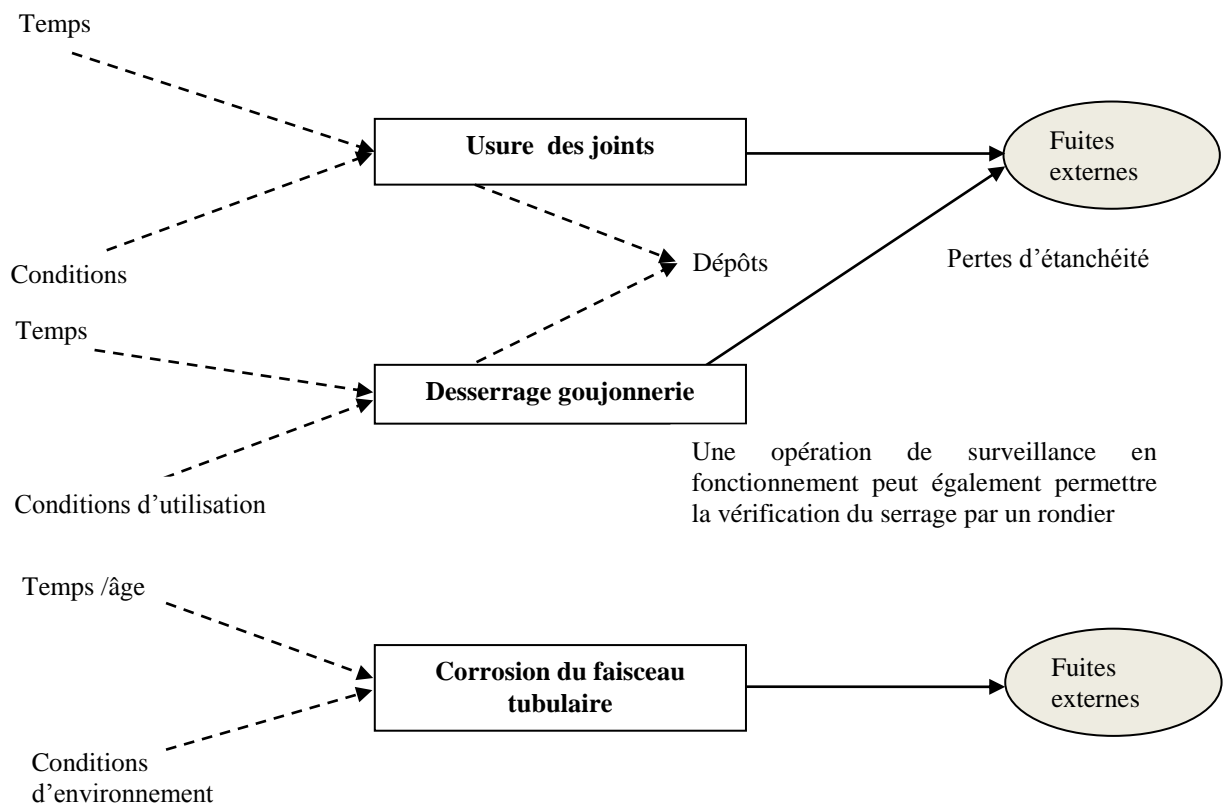


Fig.6.3e : Phénomènes de comportement de l'échangeur thermique pris en compte pour l'étude.

Le comportement de chaque matériel est donc décrit par :

- plusieurs mécanismes de dégradation,
- des modes de défaillances pouvant apparaître à l'arrêt ou en fonctionnement, et causés par un ou de plusieurs mécanismes de dégradation,
- des symptômes qui permettent de témoigner de l'évolution des mécanismes sans les observer directement,
- différents types de facteurs influents et de paramètres d'évolution des mécanismes.

Cette multiplicité des phénomènes permet de considérer plusieurs types de tâches de maintenance possibles et assure au cas d'étude une complexité suffisante pour obtenir des résultats probants.

Par ailleurs, la prise en compte des facteurs influents sur l'évolution des mécanismes de dégradation permet de pouvoir intégrer des dépendances entre composants.

Les différents modèles de matériels décrivent l'état de chaque élément du système et l'occurrence d'événements tels que sa défaillance ou sa dégradation. Aussi, l'interaction entre les différents modèles et le modèle de fonctionnement du système permet de répercuter les conséquences d'un événement survenu sur un matériel sur les matériels dépendants.

Les règles de fonctionnement du système AGR sont énoncées à l'introduction. Son comportement de dysfonctionnement peut quant à lui être décrit en se basant sur les principes de construction des arbres de défaillance, [135].

On peut s'intéresser alors à l'événement redouté « Indisponibilité du système » et on caractérise, à l'aide de relations booléennes, les différentes combinaisons d'événements qui mènent au dysfonctionnement du système. L'événement redouté consiste à la panne du système, suite à l'occurrence de défaillances, ou à son arrêt pour maintenance. Aussi, nous considérons les figures 6.4a et 6.4b comme des arbres d'indisponibilité.

Lorsque la branche I, ou branche principale, est active, les raisons qui entraînent une tentative de basculement sur la branche II peuvent être : [OU logique]

- ✦ L'échangeur thermique présente une défaillance,
- ✦ Le bloc de filtrage présente une défaillance,
- ✦ Le clapet 01VH présente une défaillance,
- ✦ Le super-composant présente une défaillance,
- ✦ La branche I est en maintenance.

Le basculement est réussi si : [ET Logique]

- ✦ La pompe de la branche II ne présente pas de défaillance,
- ✦ Le clapet associé ne présente pas de défaillance,
- ✦ La branche II n'est pas en maintenance,
- ✦ Le capteur de pression 09SP ne présente pas de défaillance,
- ✦ Le capteur de pression 09SP n'est pas en maintenance.

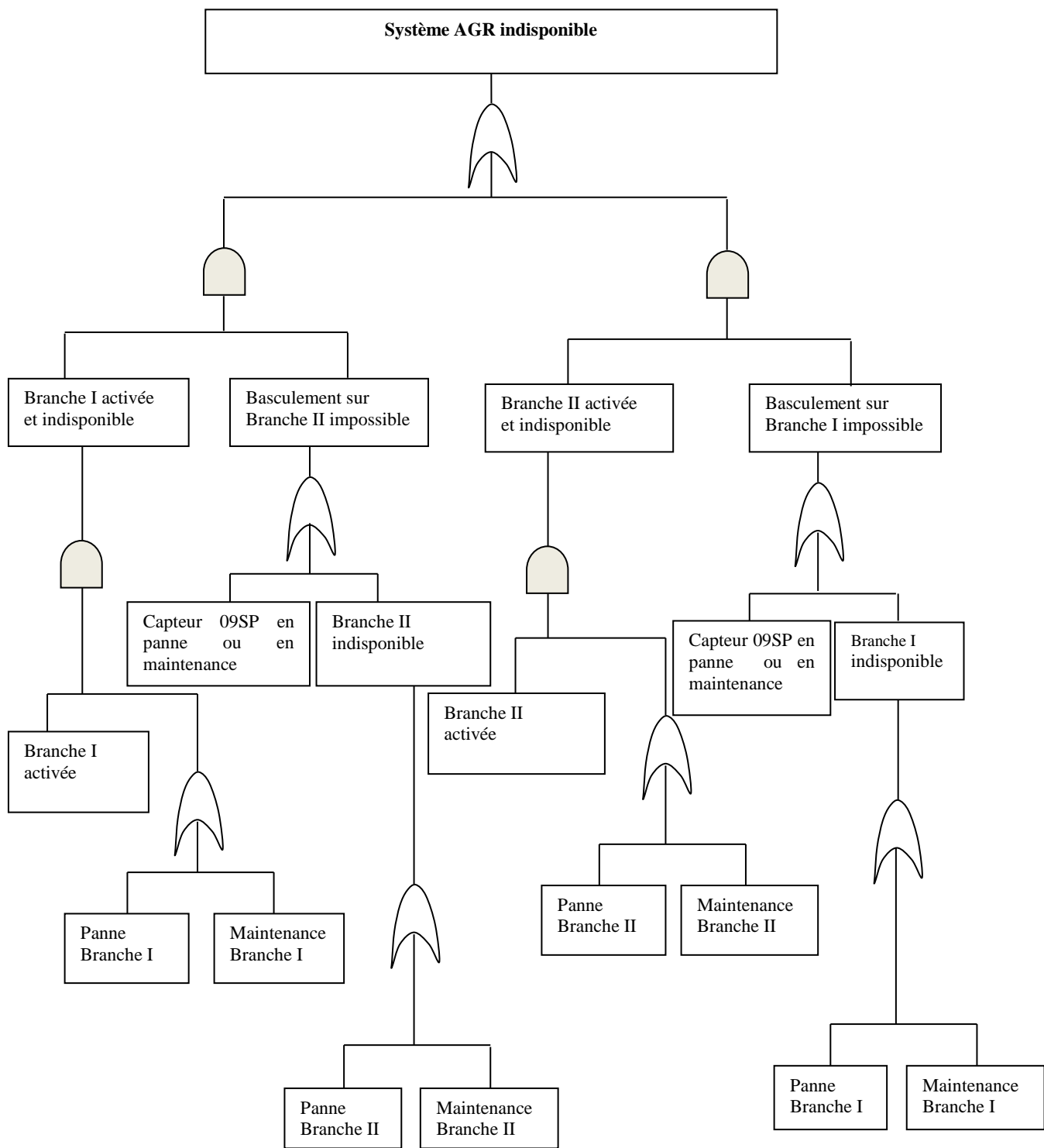


Fig.6.4a : Arbre d'indisponibilité du système AGR.

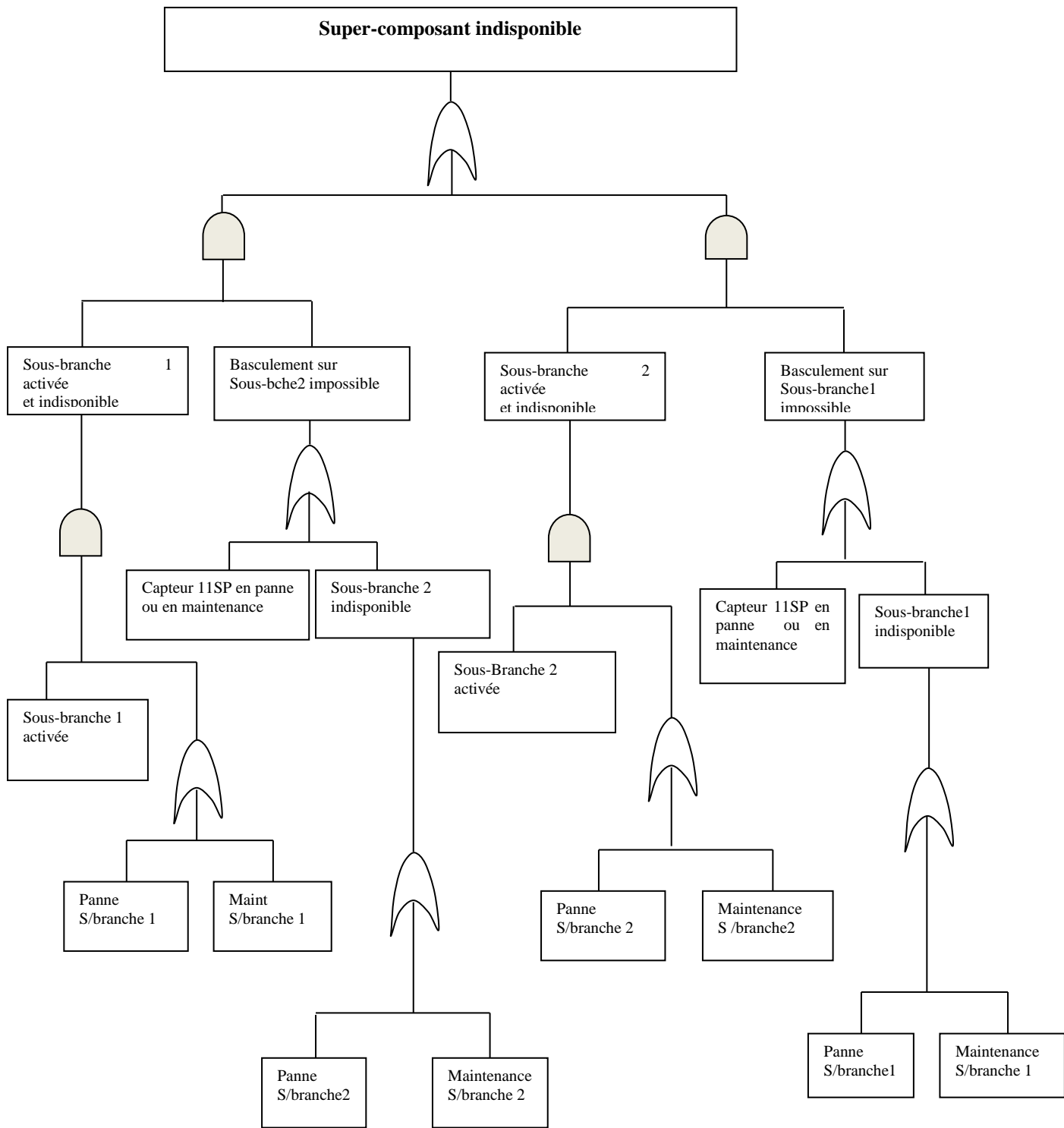


Fig.6.4b : Arbre d'indisponibilité du super-composant.

6.3 Maintenance préventive « MP » :

Si un composant j subi des opérations de maintenances préventive MP aux temps chronologique suivants:

$$(t_{j1}, \dots, t_{jn}) \quad (1)$$

En se basant sur le model de réduction d'âge [4], l'âge effective après la i ème opération de MP devient :

$$\tau_j(t) = \tau_j^+(t) + (t - t_{ji}) \text{ for } t_{ji} < t < t_{j(i+1)}, (1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

Et

$$\tau_j^+(t_{ji}) = \varepsilon_i \tau_j(t_{ji}) = \varepsilon_i (\tau_j^+(t_{j(i-1)}) + (t_{ji} - t_{j(i-1)})) \quad \text{Où}$$

$\tau_j^+(t_{ji})$ est l'âge du composant immédiatement après la i ème opération de MP.

Par définition, on assume que $\tau_j(0) = 0, t_{j0} = (0)$ et ε_i représente le coefficient de réduction d'âge.

Deux limites d'intervention de MP sont distingués lorsque $\varepsilon_i = 1$ et $\varepsilon_i = 0$.

Dans le premier cas le composant est seulement restauré à l'état "as bad as old" (ABAO), état qui n'affecte pas l'âge effective du composant. Dans le second cas le model remis le composant à l'état "as good as new" (AGAN) ce qui implique que l'âge du composant est remis à zéro (remplacement). En effet, toutes les actions de maintenance préventive qui améliore l'âge du composant sont imparfaites. Comme mentionné et démontré dans [137], la fonction hasard du composant j , peut être calculée par :

$$h_j^* = h_j(\tau_j(t)) + h_{j0} \quad (3)$$

Où $h_j(t)$ est la fonction hasard définie lorsque l'équipement ne subi aucune action de MP, et h_{j0} correspond à l'âge initial de l'équipement.

La fiabilité de l'équipement j dans l'intervalle entre les actions de MP i et $i+1$ est donnée par:

$$r_j(t) = \exp\left(-\int_{\tau_j^+(t_{ji})}^{\tau_j(t)} h_j^*(x) dx\right) = \exp\left[H_j(\tau_j^+(t_{ji})) - H_j(\tau_j(t))\right] \quad (4)$$

$H_j(\tau)$ représente la fonction hasard cumulative. Clairement si dans l'équation (4) $t = t_{ji}$ la fiabilité atteint le maximum et devient égale à 1.

Les réparations minimales sont effectuées si l'équipement tombe en panne entre les actions de MP et leurs coût prévu dans l'intervalle $[0, t]$ est donné par :

$$C_{Mj} = C_j \int_0^t h_j(x) dx \quad (5)$$

Lorsque l'équipement j subi des opérations de MP aux temps chronologiques t_{j1}, \dots, t_{jn} , dans ce cas, le coût total des réparations minimales est la somme de tous les coûts des interventions et est donné par :

$$C_{Mj} = C_j \sum_{i=0}^{n_j} \int_{\tau_j^+(t_{ji})}^{\tau_j(t_{j(i+1)})} h_j(x) dx = C_j \sum_{i=0}^{n_j} [H(\tau_j(t_{j(i+1)})) - H_j(\tau_j^+(t_{ji}))] \quad (6)$$

6.4 Les paramètres Utilisés « la représentation des tâches de maintenance » :

L'originalité de la démarche construite réside en partie dans la description de l'ensemble de la chaîne causale décrivant la défaillance des matériels du système, au travers des mécanismes de dégradation évoluant jusqu'à l'occurrence probable des modes de défaillance et créant l'apparition de symptômes observables. Il apparaît donc judicieux de proposer dans cette étude une analyse de stratégies de maintenance faisant appel à ces points particuliers. On intègre ainsi des tâches spécifiques telles que les contrôles et les inspections, qui précisément permettent d'observer la dégradation des matériels respectivement de manière directe ou à travers la détection de symptômes.

Le tableau 6.1 décrit la trame générale des stratégies de maintenance évaluées. A chaque matériel sont associées les actions réalisées et leurs caractéristiques pour présenter les valeurs des variables de décision utilisées par la suite.

<i>Matériel</i>	<i>Matériel N°</i>	<i>Tâche et N°</i>	<i>Périodicité</i>	<i>durée</i>	<i>Coût</i>
Pompes 03PO-05PO	1	Contrôle 1	Variable	Cas1=3 Cas 2=5	40
		Inspection 2	Variable	0.1	2
		Test 3	Variable	0.2	7
Clapets 03VH-05VH	2	Contrôle 4	Variable	2	30
		Inspection 5	Variable	0.1	1
		Test 6	Variable	0.1	5
Pompes 001PO	3	Contrôle 7	Variable	Cas1=3 Cas 2=5	40
		Inspection 8	Variable	0.1	2
		Test 9	Variable	0.2	7
Clapet 01VH	4	Contrôle 10	Variable	2	30
		Inspection 11	Variable	0.1	1
		Test 12	Variable	0.1	5
Echangeur Thermique	5	Remplacement Systématique 14	350	1	55
Filtres FI01-FI02	6	Remplacement Systématique 14	350	0.2	32
Capteur 09SP	7	Remplacement Systématique 14	600	0.1	40
Capteur 11SP	8	Remplacement Systématique 14	800	0.1	40

Tableau 6.1 : Base des stratégies de maintenance étudiées. Maintenance préventive des matériels.

Le tableau 6.2 présente les numéros des tâches de maintenance préventive, les composants concernés par l'opération, le coefficient de réduction d'âge correspondant à chaque tâche ainsi que le coût qui lui est associé. Les valeurs affectées aux coûts des différentes tâches de maintenance intègrent les éventuels délais nécessaires à la réalisation d'une tâche, ainsi que les coûts de pièces et main d'œuvre.

<i>Action de la MP</i>	<i>Elément N°</i>	<i>Réduction D'âge ε</i>	<i>Coût 10³\$</i>
1	1	1	40.5
2	1	0.6	2.7
3	1	0.4	7.3
4	2	1	30.8
5	3	0.7	1.6
6	3	0.4	5.1
7	4	1	40.3
8	4	0.5	2.6
9	5	0.6	7.7
10	5	0.3	30.3
11	6	0.8	1.4
12	7	1	55.0
13	7	0.4	30.5
14	8	1	32.3
15	8	0.5	40.1
16	8	0.7	37.6

Tableau 6.2 : paramètres des actions de la maintenance préventive

6.5 Optimisation du programme de maintenance préventive :

Toutes les tâches de MP qui doivent être effectuées afin de maintenir la disponibilité du système sont présentées par un vecteur ordonné V de MP. A chaque fois qu'une action de MP est nécessaire pour améliorer la fiabilité du système, celle définie par le nombre suivant du vecteur est exécutée. Lorsque l'action programmée de MP V_i s'avère insuffisante pour améliorer la fiabilité du système, automatiquement l'action de MP V_{i+1} doit être exécutée etc.

Pour un vecteur donné V , le nombre total n_j et les temps chronologiques des actions de MP sont déterminés pour chaque composant $j, 1 \leq j \leq J$. Pour toutes les actions de MP $V_i \in V$ le coût total peut être exprimé par :

$$C_p(V) = \sum_{i=1}^N C_p(v_i) \quad (7)$$

Et le coût des réparations minimales est calculé par :

$$C_M(V) = \sum_{j=1}^J C_j \sum_{i=0}^{n_j} [H(\tau_j(t_{ji+1})) - H(\tau_j^+(t_{ji}))] \quad (8)$$

Le problème d'optimisation consiste à déterminer la séquence optimale des actions de maintenance préventive, choisi à partir de la liste des actions de MP disponibles, qui

minimise le coût total de la maintenance tout en garantissant la disponibilité désirée du système.

Minimiser:

$$f(V) \rightarrow c = C_p(V) + C_M(V) \quad (10)$$

Sous contrainte:

$$A_{sys}(V, D, t) \geq R_0 \quad (11)$$

- Où A_{sys} représente la disponibilité du système
 V représente le vecteur optimal des actions de MP
 D représente le vecteur des charges
 R_0 représente la fiabilité minimale requise

Le problème de recherche de programmes optimaux de maintenance préventive sous contraintes de disponibilité du système abordé dans cette thèse est clairement NP-difficile.

Sa résolution par une méthode exacte en un temps raisonnable n'est pas garantie.

Pour cela, faire appel à des heuristiques permettant une optimisation approchée s'avère inévitable. En littérature, les méthodes approchées utilisées pour la résolution du même type de problème sont aussi intéressantes les unes que les autres. Dans ce travail nous nous sommes intéressés en particulier à deux méta-heuristiques basées respectivement sur les colonies de fourmis et le système immunitaire artificiel qui ont donné des résultats très intéressants dans plusieurs applications d'optimisations.

6.5.1 Algorithme de colonie des fourmis :

6.5.1.1 Conventions :

Ant System sera par la suite appelé AS. Les variables que nous devons définir pour comprendre la suite sont les suivantes [138] :

- $b_i(t)$ (ou $i \in X$) le nombre de fourmis ayant choisi la tâche i à l'instant t
- $m = \sum_{i \in X} b_i$ leur nombre total, invariant dans le temps
- $\tau_{ij}(t)$ la valeur de τ_{ij} , à l'instant t
- $n = |X|$, le nombre de villes
- $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$, la visibilité d'une ville j quand on est placé sur la ville i , invariante dans le temps.

Précisons maintenant le comportement de l'ensemble de la colonie. A tout instant t , chaque fourmi choisit une tâche de maintenance selon un choix probabiliste. Toutes les

fourmis choisissent à l'instant $t+1$ dans une tâche de leur choix. On appelle une itération de l'algorithme AS, l'ensemble des sélections de l'ensemble de la colonie entre l'instant t et l'instant $t+1$. Ainsi après n itérations, l'ensemble de la colonie aura effectué un programme de maintenance globale. De cette manière toutes les fourmis commenceront et finiront leur tour en même temps.

6.5.1.2 Choix d'implémentation :

On précise que chaque fourmi a une mémoire implémentée par une liste de villes déjà visitées. Cela permet de garantir qu'aucune fourmi ne sélectionnera deux fois une même opération de maintenance pour un même composant au cours de sa recherche.

La mémoire de chaque fourmi est vidée lorsqu'elles ont terminé leur cycle.

6.5.1.3 Choix des transitions :

Une fourmi k ayant choisi une tâche i à l'instant t va choisir une autre tâche de maintenance j en fonction de la visibilité η_{ij} de cette tâche et de la quantité de phéromones $\tau_{ij}(t)$ déposée sur le chemin qui mène à cette tâche. Ce choix sera réalisé de manière aléatoire, avec une probabilité de choisir la tâche j donnée par :

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} \tau_{il}(t)^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (12)$$

Où l'on définit l'ensemble J_i^k comme étant l'ensemble des tâches que la fourmi k , placée sur le choix i , n'a pas encore choisies à l'instant t dans le cycle courant. α et β sont deux paramètres qui contrôlent l'importance relative entre phéromones et visibilité. Ainsi si α est égal à 0, le choix se fera uniquement en fonction de la visibilité (si β est différent de zéro).

6.5.1.4 Mise à jour des phéromones :

À la fin de chaque cycle (chaque fourmi a parcouru les sommets qui composent le graphe), les variables des phéromones sont mises à jour selon la formule :

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (13)$$

où $\rho \in [0, 1]$ est un coefficient qui définira la vitesse d'évaporation des phéromones sur les arcs entre l'instant t et l'instant $t + n$, et où $\Delta\tau_{ij}(t)$ représente la quantité de phéromone déposée par les fourmis dans ce même intervalle de temps sur l'arc (i, j) .

Le choix de ρ est important, en effet si ρ se rapproche trop de 1, on observe un effet de stagnation des phéromones sur les arcs, ce qui implique des inconvénients tel que le fait de voir les mauvaises solutions persister.

De même, choisir $\rho \approx 0$ implique une évaporation trop rapide des phéromones, ce qui amène la fourmi à un choix dépendant uniquement de la visibilité des nœuds.

Appelons $T_k(t) = (u_{k1}, \dots, u_{kq})$ le plan réalisé par la k -ème fourmi dans l'intervalle de temps $[t, t+n]$, et $C_k(t)$ sa son coût. $T_k(t)$ (et donc $C_k(t)$) s'obtient en analysant la mémoire de la fourmi.

Soit $\Delta\tau_{ij}^k(t)$, la quantité de phéromones déposée par cette fourmi sur l'arc (i, j) dans ce même intervalle de temps. On le définit ainsi :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & si (i,j) \in T^k(t) \\ 0 & si (i,j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (14)$$

Où Q est une constante. On voit bien ici que les phéromones sont régulées en fonction de la qualité de la solution obtenue car plus $C_k(t)$ est faible plus l'arc sera mis à jour en phéromones.

On peut maintenant définir le $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ de la formule de mise à jour des phéromones ainsi :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (15)$$

6.5.2 Fonctionnement de l'algorithme :

Initialisation de l'algorithme. Les éléments s'agencent de la manière suivante au début de l'algorithme :

1. les m fourmis sont réparties aléatoirement sur les n sommets des graphes qui représentent les composants.
2. Pour chaque fourmi, la liste qui modélise sa mémoire contient un composant de départ.

3. Les pistes de phéromones sont initialisées comme suit : $t_{ij}(0) = c$, où c est une petite constante positive, qui ne peut être nulle

4. au cours d'une itération, chaque fourmi aura choisi une action de maintenance et revient vers un sommet qui représente un composant.

Fin d'un cycle. Après n itérations, nous sommes à l'instant t , toutes les fourmis ont terminé leur tour, chacune à une liste "mémoire" pleine qui représente un plan de maintenance préventive et est revenue à un sommet du graphe.

A ce moment :

1. Chaque fourmi calcule sa valeur $C_k(t)$.

2. Les variables $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ sont calculées conformément à la formule (3).

3. Les variables de phéromone $\tau_{ij}(t)$ sont mises à jour suivant la formule (2). En d'autres termes, la fourmi refait son tour en sens inverse tout en déposant des phéromones.

4. On observe quelle fourmi a trouvé le tour de coût minimum (i.e. on recherche la fourmi k telle que $k = \min_{k=1}^m C_k(t)$. Si ce tour est meilleur que le meilleur tour jusqu'ici, on le mémorise.

5. Les mémoires de fourmis (liste des plans de maintenance) sont effacées.

6. Les fourmis recommencent un nouveau tour, au départ de composants aléatoires.

Fin de l'algorithme : On arrête l'algorithme après un nombre de cycles égal à une constante

NC_{max} . Si à partir d'un instant, toutes les fourmis produisent le même plan de MP, l'algorithme s'interrompt : on est dans une situation de stagnation où le programme arrête de chercher des alternatives. L'algorithme donne en retour le meilleur plan mémorisé.

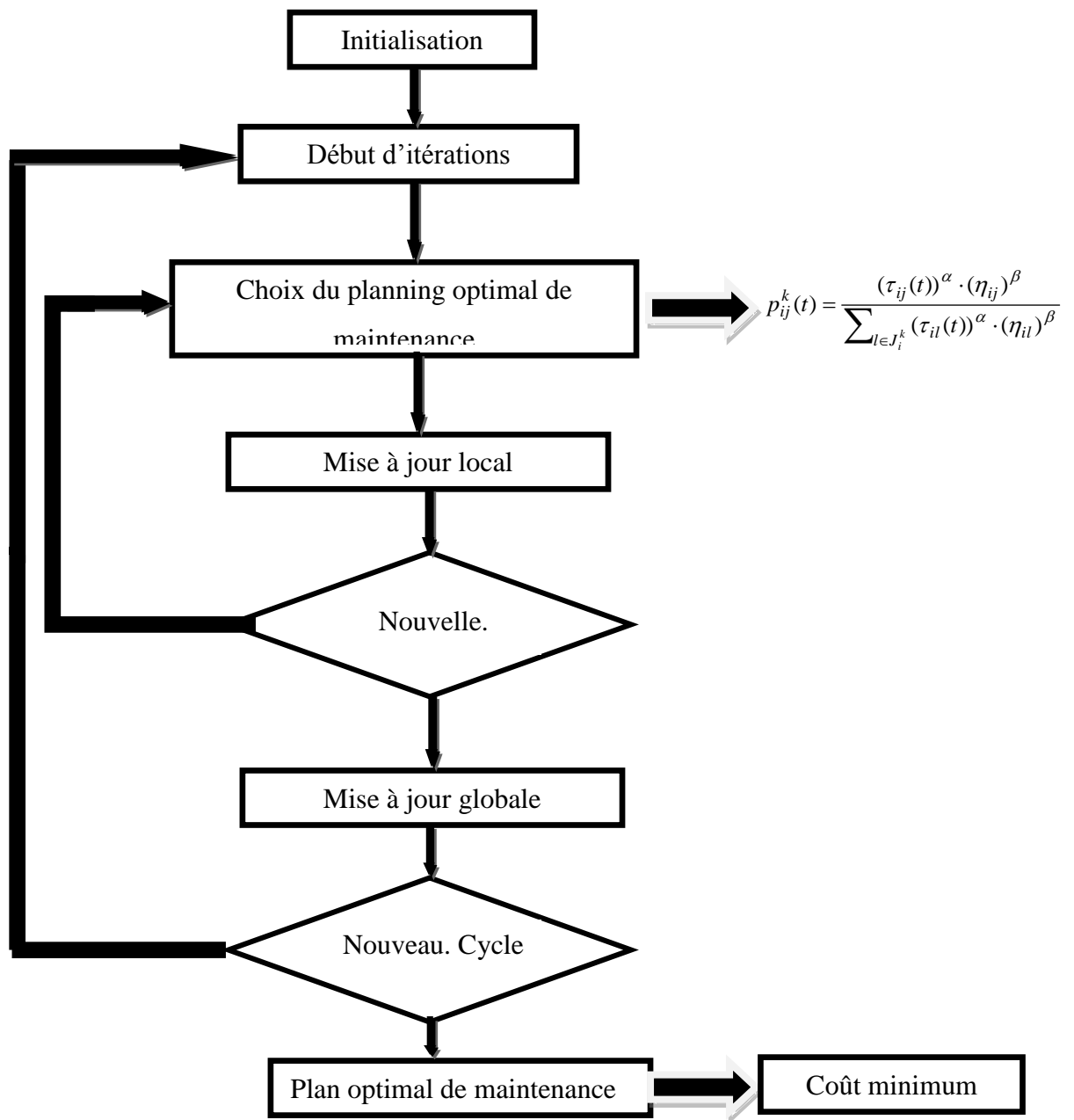


Fig. 6.5 : Organigramme de l'algorithme des colonies de fourmis

6.6 Résultats numériques :

6.6.1 Paramétrage de l'algorithme :

Plusieurs tests ont été réalisés avec différents paramétrages de l'algorithme des fourmis et certaines conclusions en ont été tirées que nous proposons de les reprendre ici :

1. On pose $p = 0,5$ et $c \approx 0$, seule la stratégie gloutonne est à l'œuvre au début de l'algorithme :

Ceci est souhaitable, car les pistes de phéromones ont été générées artificiellement et n'ont donc aucune signification physique. Ensuite, grâce au paramètre $p > 0$, les fourmis commencent progressivement à exploiter les valeurs τ_{ij} au fur et à mesure que les pistes de phéromones se renforcent. Afin de ne pas être esclave des choix anciens (i.e. de ne plus tenir compte que des

τ_{ij}), il faut que la visibilité ait encore un impact. Ceci explique le choix selon lequel $p = 0,5$.

2. La recherche est plus efficace quand les fourmis communiquent entre elles, c'est-à-dire quand les quantités de phéromones ont un grand impact sur la politique de décision de la fourmi. Ceci correspond à prendre $\alpha \approx 1$.

3. Il existe un optimum quand $m = n$, où la coordination des fourmis semble atteindre son maximum.

4. Lors de l'initialisation de l'algorithme, il semble toujours plus intéressant de distribuer les fourmis sur tous les composants plutôt que de toutes les faire démarrer d'un même composant. On entend de ce fait de placer sur chaque composant le même nombre de fourmis. Ceci impose que m soit multiple de n . Du fait du point précédent, on choisira donc toujours $m = n$. Il a aussi été constaté qu'une distribution aléatoire des fourmis n'a qu'un impact négligeable sur la convergence. On place donc une fourmi par composant initialement.

5. Le paramètre Q n'a qu'une influence négligeable. Cela se comprend, puisque dans la politique de choix des fourmis, on utilise un rapport entre quantités de phéromones et non pas directement ces quantités. On pose généralement $Q = 100$.

Pour résumer, on a observé que les paramètres présentés sur le tableau 6.3 donnent en pratique les meilleurs résultats.

<i>Paramètre</i>	<i>Valeurs</i>
<i>M</i>	<i>n</i>
<i>P</i>	<i>0.5</i>
<i>α</i>	<i>1</i>
<i>β</i>	<i>5</i>
<i>Q</i>	<i>100</i>
<i>c</i>	<i>Petite valeur positive</i>
<i>Distribution initiale</i>	<i>Uniforme</i>

Tableau 6.3: Paramètres de l'algorithme des fourmis

6.6.2 Planning Optimale De Maintenance Obtenu Par l'ACA :

Nous avons laissé tourner l'algorithme durant 5000 cycles. Le temps moyen d'exécution est de 3 minutes et 49 secondes sur un PC 2 Ghz Quad Pentium Core 2 sous Windows XP. Les résultats obtenus pour les plans optimaux de maintenance garantissant une disponibilité du système de graissage supérieure à 97% avec une fiabilité minimale de 0.9 et 0.95 sont illustrés dans les tableaux 6.4 et 6.5.

<i>t</i>	<i>Action MP</i>	<i>Composant affecte</i>	<i>R(t, 0.97)</i>
02.250	9	5	0.907
05.652	13	7	0.912
07.120	3	1	0.917
09.312	5	3	0.922
11.648	15	8	0.934
14.046	13	7	0.939
16.343	11	6	0.931
17.879	2	1	0.934
19.671	8	4	0.928
Coût total de la MP		124.4 10³\$	

Tableau 6.4 : Plan MP Optimal pour $R(T, 0.97) > 0.9$

<i>t</i>	<i>Action MP</i>	<i>Composant affecte</i>	<i>R(t,0.97)</i>
01.783	8	4	0.952
03.547	13	7	0.959
06.054	5	3	0.966
08.131	3	1	0.956
09.894	9	5	0.951
11.576	11	6	0.959
13.077	6	3	0.964
14.634	14	8	0.954
15.714	2	1	0.957
17.237	4	2	0.965
18.368	8	4	0.955
19.749	10	5	0.951
<i>Coût total de la MP</i>		<i>154.9 10³\$</i>	

Tableau 6.5 : plan MP optimal pour $R(T,0.97) > 0.95$

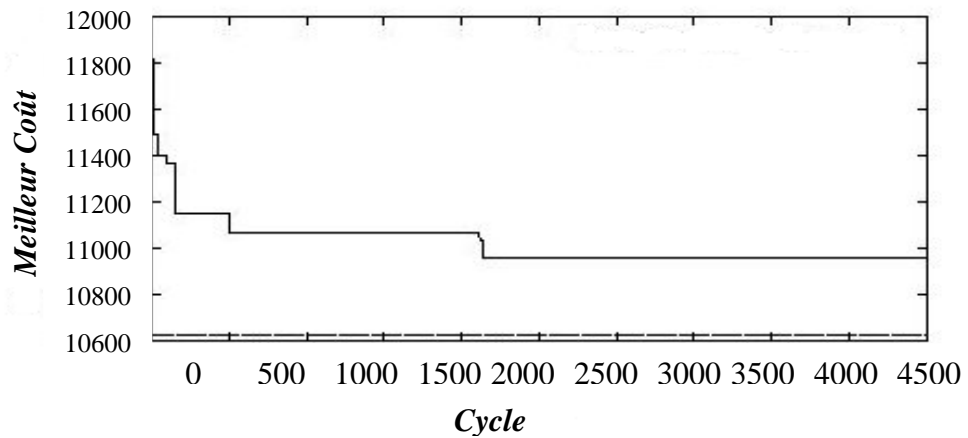


Fig. 6.6 : Nombre de cycles pour les solutions optimales

6.7 Optimisation par l'algorithme du système immunitaire artificiel :

6.7.1 Algorithme de la sélection clonale :

La sélection clonale artificielle est une abstraction des mécanismes de mémorisation des systèmes immunitaires, les algorithmes développés sont généralement dédiés à l'optimisation ou à la recherche. L'algorithme de la sélection clonale est basé sur les étapes suivantes :

1. Produire un ensemble de solutions (répertoire d'anticorps) de N candidats qui sont défini par le problème à étudier ;
2. Choisir les n_1 cellules qui ont la plus grande affinité à l'antigène ;
3. Copier (produire des copies identiques de) ces cellules choisies. Le nombre de copies est proportionnel aux affinités: plus l'affinité est haute, plus le nombre de clones est grand;
4. Changer la structure des cellules choisies (hyper mutation). Le taux de changement est proportionnelle à leurs affinités : plus l'affinité est haute, plus le taux de changement est petit;
5. Sélectionner les n_2 cellules (du résultat de l'étape 4) qui ont la plus grande affinité à l'antigène pour composer le nouveau répertoire ;
6. Remplacer quelques cellules qui possèdent des valeurs d'affinité faible par les nouvelles cellules ;
7. Répéter les étapes 2 à 6 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt donné soit rencontré.

6.7.2 Critère D'arrêt :

Pour mettre fin à l'exécution de l'ensemble des étapes que nous venons de présenter, un critère d'arrêt est nécessaire. [139] explique que le choix de ce critère dépend de la complexité du problème traité, du nombre de variables qu'il présente ainsi que des informations connues a priori sur la solution optimale. Si on connaît une borne inférieure de la solution optimale.

L'algorithme s'arrête dès qu'il trouve une solution dont la valeur du critère est la plus proche possible de la borne. Si aucune information n'est connue a priori, le critère d'arrêt peut être un nombre fixe d'itérations ou un nombre prédéfini d'itérations sans amélioration.

Dans le cadre de ce travail, il convient d'utiliser un nombre prédéfini d'itérations sans amélioration comme condition d'arrêt.

6.7.3 Codage Des Solutions [140] :

Chaque solution ou anticorps Ab est représenté par une matrice de Maintenance préventive $[MP]$.

$$Ab = [MP]$$

La matrice $[MP]$ possède N colonnes et L lignes, où:

L représente le nombre des éléments du système et N les intervalles des interventions de la MP. Chaque intervalle i possède une durée θ_i

$$T = \sum_{i=1}^N \theta_i$$

Où T est la vie utile du système. Donc chaque ligne dans la matrice représente les actions de MP qui doivent être accompli en séquence pour chaque élément.

$$Ab = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{L1} & \dots & A_{Ln} \end{bmatrix} \quad (5)$$

6.8 Algorithme immune artificiel :

Etape1: Définir l'antigène

La fonction objectif que nous visons à minimiser et la contrainte de disponibilité défini dans l'équation 10 et 11 représente l'antigène. Comme illustre-la figure 4, l'antigène représente la configuration des actions de la PM dans la solution du problème d'optimisation, et le segment correspondant de l'anticorps représente une solution d'essai pour les variables [8,9].

La reconnaissance de l'antigène par l'Anticorps se fait de manière Comme une clef et Une serrure (figure 6).

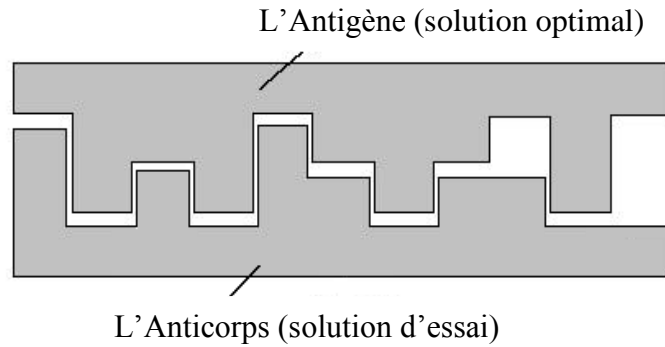


Fig.6.7 : Une clef et Une serrure entre l'antigène et l'Anticorps

L'antigène est reconnu par les récepteurs d'anticorps d'une manière similaire à un verrou et une relation de clé. À l'exception des préparatifs de la MP et l'Anticorps Représente Une solution essai.

Étape 2: Initialisation aléatoire de population d'anticorps
 La population initiale d'anticorps de nombre-Matrix est aléatoirement produite. La population d'anticorps représente des vecteurs d'actions de P.M. pour chaque partie du système. Comme décrit précédemment, une représentation basée sur position est employée dans cette étude pour représenter l'anticorps. Cette représentation produira de la progéniture valide des procédures de croisement et de mutation.

Étape 3: évaluer l'aptitude d'anticorps dirigés contre l'antigène

L'aptitude de chaque anticorps contre l'antigène de la population est calculée en fonction de sa valeur de la fonction objective et les violations potentielles de contraintes. Dans l'évaluation de l'aptitude de différents anticorps, les exigences de contrainte ont également été examinés. Lorsqu'une contrainte est violée, le degré de violation est pondéré à pénaliser l'aptitude de l'anticorps. Des anticorps ayant une forte aptitude représentent de bonnes personnes.

L'aptitude de chaque anticorps est un nombre positif dans l'intervalle]0, ..., 1[donnée par:

$$\text{fit}(Ab^i) = \frac{1}{1 + \text{Coût}_i + \omega[(R_o - R_i) + |(R_o - R_i)|]} \quad (16)$$

Où

:

$Coût_i$ et R_i sont respectivement le coût et la disponibilité de la configuration représentée par l'anticorps (Ab^i).

ω Est un facteur de pénalité sert à sanctionner les anticorps qui violent l'exigence de contrainte.

Dans l'équation (16), la remise en forme antigénique des anticorps satisfaisant la contrainte de disponibilité.

$(R_i \geq R_0)$ Est une fonction des coûts seulement.

Étape 4: Choisir les meilleures m anticorps qui doivent être conservés dans la mémoire système (M).

Sélectionnez le n , ($n \leq m$) les plus hauts anticorps d'affinité par rapport à l'antigène pour le clonage.

Étape 5: Générer jeu de clone (C)

Génère l'ensemble de clone (C) pour les meilleurs anticorps n triés dans l'ordre croissant [Ab^i mieux individu que Ab^j pour tous ($j > i$)]. Le nombre de copies est proportionnel à leurs affinités : plus l'affinité est haute, plus la taille de clone est grande. Le clonage des meilleures personnes de n est mis en application par la règle:

$$NC_i = \text{round}\left(\frac{\lambda * n}{i}\right) \quad (17)$$

Où

NC_i est le nombre de clones pour l'anticorps Ab^i

n est le nombre d'anticorps sélectionnés

λ est un facteur de taille

Pour $n=40$ et $\lambda=1$, l'anticorps à affinité plus haute ($i = 1$) produit 40 clones, tandis que la seconde affinité plus haute ($i = 2$) produit 20 clones, etc

Étape 6: Exécuter l'hypermutation génétique et générer l'ensemble de clone maturée (C^*)

6.8.1 Opérations Relatives à La Mutation:

Structures clonés sont mutés avec un taux inversement proportionnel à leurs affinités avec l'antigène: plus l'affinité est haute, plus le taux de mutation est petit. La mutation est exécutée après une règle décentrée de probabilité qui permet des taux plus élevés ou inférieurs de mutation d'anticorps selon leur affinité avec de l'antigène comme suit : Dans chaque itération j , et pour chaque anticorps i , évaluez la valeur seuil de mutation comme :

$$\eta = \exp\{-\rho \text{fit}(Ab^i)\} \quad (18)$$

Générer un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$

Si $\mu < \eta$ donc fait la mutation d'anticorps Ab^i , sinon passer à l'anticorps qui suit.

6.8.2 Opérations De Croisement :

Les opérations de croisement sont effectuées sur les vecteurs des parents. Pour illustrer la procédure de croisement nous considérons un programme de PM de six interventions et nous considérons deux anticorps de parents Ab^1 et Ab^2 . Pour l'illustration nous considérons seulement les vecteurs de P.M. du premier élément (première ligne dans la matrice d'anticorps).

$$Ab^1 = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 7 & 1 & 5 & 2 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ A_{L1} & & \dots & & & A_{L6} \end{bmatrix}$$

$$Ab^2 = \begin{bmatrix} 5 & 2 & 7 & 3 & 1 & 6 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ A_{L1} & & \dots & & & A_{L6} \end{bmatrix}$$

Pour générer la première ligne de l'anticorps progéniture Ab^{12} , nous procédons comme suit:

La première ligne du parent d'anticorps Ab^1 est copiée dans la descendance Ab^{12} puis le fragment des gènes entre deux positions l arbitraires et m du parent d'anticorps Ab^2 ($1 \leq l < m \leq 6$) sont copiés dans les positions correspondantes de la progéniture Ab^{12} .

La procédure de croisement pour le premier élément (première ligne en anticorps Ab^{12}) est illustrée pour

$l=2$ et $m=4$

$$Ab^{12} = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 7 & 3 & 5 & 2 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ A_{L1} & & \dots & & & A_{L6} \end{bmatrix}$$

Les opérations de croisement pour les autres composants et le vecteur d'amortisseur sont effectuées d'une manière similaire. Pour chaque composant, la procédure de croisement est exécutée seulement si les résultats d'un nombre généré de façon aléatoire ($0 \leq ran \leq 1$) est inférieure à une limite de seuil spécifiée TL . La valeur du paramètre TL peut être réglée pour dépendre du nombre de cycles. L'équation (19) place la valeur- seuil pour exécuter un croisement.

$$TL = \exp\left(-\frac{T-G}{T}\right) - \beta \quad (19)$$

Où

G est le nombre d'évaluation,

T le nombre maximal d'évaluation,

β un facteur d'échelle. β a été fixé à 0.2, de sorte que la probabilité d'exécution de croisement varie de 80% dans les premiers stades du processus d'optimisation à 17% à la fin des étapes.

Étape 7: Créer nouvelle population aléatoire (R).

Générer une nouvelle population aléatoire (R) pour remplacer la population éliminée dans le répertoire (S) et pour éviter la convergence prématurée aux optimums locaux.

Étape 8: Placez les anticorps de (C), (C *), (M), (R) dans le répertoire (S) et examinez les anticorps nouvellement générés.

Les affinités anticorps-antigène (Ab^i) des anticorps générés dans l'étape 6 et 7 ont été évaluées. Par ailleurs, pour conserver la diversité des anticorps dans le répertoire courant, l'affinité (ci-après «l'affinité des anticorps-anticorps») entre les anticorps i et le meilleur anticorps dans le répertoire (P) ont également été étudiés.

Des anticorps présentant une affinité élevée au-delà de la limite TL seuil avec le meilleur anticorps sont supprimés avec une délétion probabilité $P(d)$ donnée par:

$$p(d) = \alpha^{\frac{G}{T}} \quad (20)$$

Où α est un nombre de graduation de probabilité dans l'intervalle $[0, 1]$, G le nombre d'évaluation et T le nombre maximal d'évaluation.

Il ressort de l'équation ci-dessus. Que, durant les étapes précoces de la recherche d'anticorps présentant une grande "affinité d'anticorps- d'anticorps" $Afin(Ab^i)$ sont supprimées avec une probabilité élevée permettant la diversité d'anticorps dans la mémoire du système immunitaire et de provoquer la procédure de recherche afin de couvrir uniformément l'espace de décision.

À ce dernier recherchez les étapes quand la région de l'espace contenant probablement l'optimum global est localisée, à proximité de personnes optimales sont autorisés à effectuer amende recherche locale.

L'affinité des anticorps-anticorps $Afin(Ab^i)$ dans cette étude peut être exprimée comme suit:

$$Afin(Ab^i) = \frac{1}{1+D_i} \quad (21)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^{k-1} \delta_j \quad (22)$$

$$\text{Où } \delta_j = \begin{cases} 1 & \text{si } (Ab^i)_j^k \neq (Ab^{best})_j^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (23)$$

Où

D_i est la distance de Hamming entre les anticorps i et le meilleur anticorps, $(Ab^i)_j^k$ est

l'élément de jth dans le composant k de l'anticorps i , et $(Ab^{meilleur})_j^k$ est l'élément de jth

dans le composant k du meilleur anticorps.

La distance de Hamming entre deux anticorps est le nombre d'emplacements équivalents pour lesquels les machines ou les amortisseurs correspondants sont différents.

Étape 9: Produisez le jeu de la mémoire (M)

Resélectionner m la plus haute affinité de ces individus à maturité pour être gardés comme souvenirs du système immunitaire. Sélectionnez N meilleurs candidats d'affinité pour le clonage.

Étape 10: Répétez les étapes 6 à 10 jusqu'à un certain critère d'arrêt soit rempli. La condition d'arrêt appliquée dans ce travail est basée sur la fonctionnalité de la stagnation de l'algorithme (moins de 0,1% de variation de la fonction de coût en dix générations consécutives).

6.8.3 Planning Optimal Obtenu Par L'AIS :

Les Tableaux 6.6 et 6.7 présente les résultats des séquences optimales de maintenance préventive respectivement pour le cas de fiabilité $R_0 \geq 0.90$ et celui de fiabilité $R_0 \geq 0.95$. L'algorithme converge dans tous les essais et le nombre de cycles nécessaires pour la convergence en fonction de la taille de la population des anticorps initial et le nombre de clones sont illustrés sur les figures 6.8 et 6.9.

t	Action <i>MP</i>	Composant <i>affecte</i>	$R(t,0.97)$
02.110	8	4	0.912
05.545	13	7	0.916
06.850	2	1	0.921
09.015	5	3	0.937
11.362	14	8	0.941
13.212	13	7	0.937
16.010	11	6	0.929
17453	3	1	0.933
19.286	9	5	0.921
Coût total de la MP		116.6 10³\$	

Tableau 6.6 : plan MP optimal pour $R(T,0.097) > 0.90$

t	Action MP	Composant affecte	$R(t,0.97)$
01.734	8	4	0.952
03.485	13	7	0.961
06.054	5	3	0.969
08.035	2	1	0.958
09.603	9	5	0.961
11.441	11	6	0.966
12.874	6	3	0.964
14.229	14	8	0.952
15.356	2	1	0.959
17.042	4	2	0.967
18.296	8	4	0.958
19.368	10	5	0.952
Coût total de la MP		150.3 10³\$	

Tableau 6.7 : plan MP optimal pour $R(T,0.97) > 0.95$

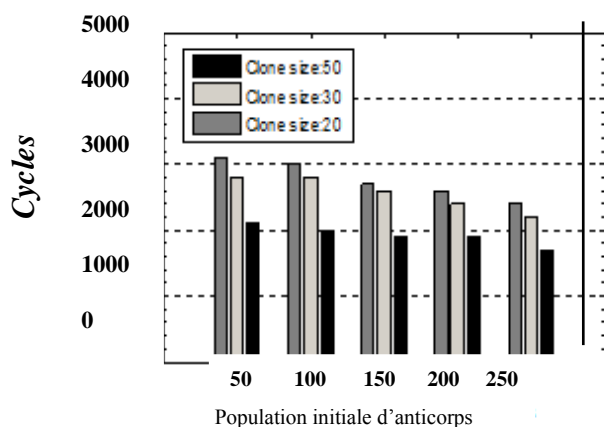


Fig 6.8 : Nombre de cycles pour la convergence en fonction

des paramètres du répertoire et des clones (cas 1)

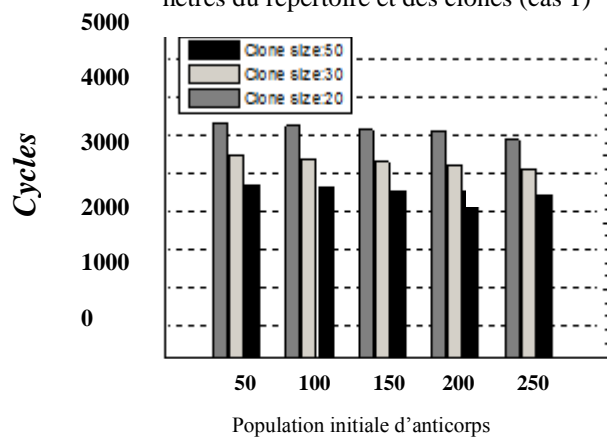


Fig 6.9 : Nombre de cycles pour la convergence en

fonction des paramètres du répertoire et des clones (cas 2)

6.9 Discussion :

Dans ce chapitre, nous utilisons deux métaheuristiques notamment l'algorithme basé sur le système immunitaire artificiel AIS et l'algorithme des colonies de fourmis ACA pour résoudre le problème d'optimisation des planning des tâches de maintenances préventive d'un système de graissage d'une turbo-pompe d'une centrale nucléaire.

Une comparaison des algorithmes montre que l'algorithme à colonies de fourmis ACA est plus rapide que l'algorithme immunitaire AIS, cependant les solutions obtenues par l'AIS sont plus optimales. Cette performance de l'AIS est principalement due à une exploration de l'espace des configurations de façon opportuniste, en intensifiant d'une part l'effort de recherche vers les zones les plus «prometteuses» de l'espace des configurations, i.e., aux alentours des meilleures configurations trouvées, et en diversifiant d'autre part l'effort de recherche de façon à être capable de découvrir de nouvelles zones contenant potentiellement de meilleures solutions.

La façon d'intensifier et de diversifier l'effort de recherche dépend de l'approche considérée et se fait en modifiant certains paramètres de l'algorithme. Pour les approches par voisinage, l'intensification de la recherche se fait en favorisant l'exploration des « meilleurs » voisins. Par exemple, pour l'algorithme immunitaire AIS, on augmente la probabilité de clonage des meilleures configurations de la population et on diminue la probabilité de mutation ; Pour la méta-heuristique ACO, on augmente la probabilité de choisir les composants de solution ayant appartenu aux meilleurs configurations trouvées en augmentant l'influence de la phéromone.

Le temps CPU nécessaire pour trouver la meilleure solution dépend de la taille du problème et de sa difficulté. Par exemple, L'AIS exécute 1940 cycles en moyenne pour résoudre le second cas de l'optimisation du plan de maintenance avec la contrainte d'une disponibilité minimum de 0.97 avec une probabilité minimum de 0.95, tandis que L'ACO exécute ce même problème en 2227 cycles.

Cependant, comme un cycle de L'AIS est beaucoup plus long à exécuter qu'un cycle de L'ACO, L'ACO converge toujours plus rapidement que L'AIS puisque pour les deux instances chaque algorithme a été exécuté 50 fois sur un PC 2 Ghz Quad Pentium Core 2 et L'AIS converge en moyenne en 7minutes 23 secondes tandis que l'ACO converge en seulement 3 minutes 49 secondes.

Enfin, un inconvénient de ces métaheuristiques réside dans le fait que ces algorithmes sont influencés par des paramètres qui ne sont pas connus a priori. L'estimation de ces paramètres pour les différentes instances, que ce soit de façon manuelle ou à travers un système automatique d'apprentissage, empêche ces métaheuristiques d'être utilisées sous forme de logiciel applicable à toutes les instances.

Conclusion Générale

Dans le contexte de mondialisation actuel, les entreprises doivent être de plus en plus compétitives. Le fonctionnement des moyens de production étant très optimisé, de nos jours, il est nécessaire de trouver d'autres leviers d'amélioration. Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements. L'optimisation des plannings des activités de maintenance représentent donc un moyen d'action directe sur la performance des entreprises.

Dans cette thèse, le problème de conception optimale de plans de maintenance préventive des systèmes de production assujettis à des défaillances aléatoires a été traité. Les systèmes avec dépendance entre composant ont été étudiés.

Nous nous sommes ainsi concentrés sur la formalisation d'une structure de représentation pouvant décrire à la fois le comportement d'un système et de ses matériels, ainsi que les effets des actions de maintenance effectuées. Nous avons ensuite revu un modèle d'évaluation des performances du système maintenu de manière à quantifier les coûts liés à la maintenance et à l'indisponibilité du système.

Avec l'application de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité et l'utilisation croissante de la maintenance préventive conditionnelle, il est difficile de prévoir de manière précise les effets d'une politique de maintenance à long terme. D'une part, les systèmes sont composés de plusieurs matériels dépendants, eux-mêmes caractérisés par des comportements mettant en évolution différents phénomènes. D'autre part, les stratégies de maintenance appliquées consistent en différentes interventions avec des conditions de réalisation et des effets propres. Ces complexités invitent à définir un cadre global de modélisation en complément des approches déjà développées.

En prenant en compte l'ensemble de la chaîne causale décrivant le comportement des matériels d'un système maintenu, nous avons vu qu'il est possible de décrire finement l'évolution de ce système et d'évaluer son indisponibilité ainsi que les coûts de maintenance pour une stratégie fixée. En effet, on a pu représenter les effets de tâches de maintenance aux caractéristiques différentes. De plus, le champ de représentation est large et permet de prendre en compte l'ensemble des tâches de maintenance, aussi bien corrective que préventive, systématique et conditionnelle.

La mise en œuvre de l'approche de résolution proposée a été développée sur un exemple inspiré d'un cas réel. Il s'agit d'un système de graissage d'une turbo-pompe alimentaire d'une centrale nucléaire. Notre contribution intervient dans la phase de planification des programmes

de maintenance préventive et consiste à proposer un outil d'aide pour les responsables du service de planification des opérations de maintenance. Les résultats obtenus contribuent à la réduction des coûts de maintenance tout en assurant une amélioration de la disponibilité du système.

En ce qui concerne les outils d'optimisation, le principal défi était de concevoir des algorithmes robustes et efficaces pour résoudre le problème d'optimisation des plannings de maintenance sous contrainte de disponibilité et. La conception d'un algorithme à base de métaheuristiques est une tâche difficile qui nécessite à la fois une connaissance approfondie du problème étudié et du fonctionnement intrinsèque de cette ou ces métaheuristique(s). Dans le cas d'un algorithme de type colonies de fourmis, chaque problème peut être représenté par plusieurs types de graphes, et le choix du "meilleur" graphe est une tâche qui est loin d'être systématique. De plus, un choix judicieux de l'information heuristique est nécessaire pour la conception d'un algorithme à colonies de fourmis efficace.

Deux algorithmes à base de métaheuristiques sont proposés. Une comparaison entre les performances de ces algorithmes montre que l'algorithme du système immunitaire artificiel est meilleur que l'algorithme à colonies de fourmis. Les divers modèles et algorithmes proposés dans la thèse représentent des contributions vers la conception optimale des programmes de maintenance.

Il est clair que les résultats enregistrés doivent être consolidés et que des améliorations doivent être envisagées. D'autres applications sont à prévoir pour confirmer l'intérêt des méthodes proposées.

Perspectives d'approfondissement

Dans ce travail, nous nous sommes surtout concentrés sur la définition d'un cadre global de modélisation. Aussi, un certain nombre de travaux futurs sont possibles pour rendre la représentation encore plus réaliste et permettre son application. Notons en particulier qu'il faut porter un effort sur la représentation des mécanismes de dégradation et en particulier la façon de recueillir et intégrer les données nécessaires à la modélisation. Les techniques basées sur l'interrogation d'experts pour la prise en compte des facteurs influents sur l'évolution des phénomènes semblent bien se prêter à la problématique. Plus précisément, les réseaux bayésiens, [142] permettent d'intégrer les connaissances a priori des experts pour calculer des probabilités conditionnelles et décrire, de façon probabilisée, les relations causales entre les facteurs influents et l'évolution des mécanismes de dégradation. La logique floue, [143], est un outil de la décision qui permet de traduire les avis d'experts en distributions de possibilités.

Dans cette étude, nous n'avons pas considéré les aspects liés aux incertitudes de la modélisation. La représentation de phénomènes aléatoires et le recours à des avis d'experts

soulignent l'intérêt de la modélisation des incertitudes et de leur propagation. La structure du modèle étant définie, on peut songer à étudier les incertitudes aussi bien stochastiques (étant donné le caractère aléatoire des phénomènes tels que les défaillances) qu'épistémiques (avec l'utilisation des avis d'experts pour la description des mécanismes de dégradation) et leur propagation au sein du cadre global de modélisation, [144], [Dubois & Prade, 1988].

Le développement d'une application industrielle peut être envisagé à travers l'intégration de la méthode d'évaluation des performances des stratégies de maintenance au sein d'un travail d'optimisation. L'objectif deviendra la recherche de la politique de maintenance optimale pour un critère de performances donné ou pour plusieurs critères dans le cas d'une approche multicritères, [145], [146], [147].

Enfin, Au cours de cette thèse, nous avons considéré que les déplacements sur les lieux des interventions étaient compris dans les coûts des tâches. On a supposé que les différents équipements maintenus se trouvent sur un même site et donc que les durées n'étaient pas influencées par l'ordre de traitement des tâches.

A l'heure actuelle, de plus en plus d'entreprises sous-traitent la fonction maintenance ; ce qui impose une organisation du service de maintenance quelque peu différente. Ainsi, on trouve de plus en plus de services de maintenance utilisant des centres de télémaintenance pour assurer un suivi en temps réel de l'état des équipements à maintenir. De nouvelles données dans un tel contexte apparaissent. Les sites de production à maintenir ne sont pas nécessairement tous dans un même lieu géographique ; des informations permettant de diagnostiquer les pannes peuvent être obtenues à distance ; etc. Ainsi, la planification du travail à réaliser s'en trouve modifiée.

Une perspective principale de ce travail est donc l'extension au contexte distribué des approches réalisées. La prise en compte de la localisation des ressources est une piste de travail très intéressante. [148] ont ainsi étudié le problème d'un technicien de maintenance qui doit effectuer des tâches de maintenance préventive sur différents sites.

Références

- [1] Remy, E. Modèles d'évaluation quantitative de l'effet de la maintenance sur la fiabilité – état des lieux des recherches passées et en cours à EDF R&D. Actes du congrès LambdaMu, Avignon, Octobre 2008.
- [2] Zille, V. Berenguer, C., Grall, A., Despujols, A. & Lonchamp, J. Modelling and performance assessment of complex maintenance programs for multi-component systems. In ESREDA 32nd Seminar proceedings, Alghero, Mai 2007.
- [3] Techniques d'analyse de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). P-IEC 60812 {Ed.2.0}. Commission électrotechnique internationale, 2006.
- [4] Cordier, R., Despujols, A., Meuwisse, C. Selection des tâches de maintenance – Concepts et définitions. Rapport EDF HP-28/93/029/B, 1993.
- [5] Lyonnet, P. Optimisation d'une politique de maintenance. Edite par TEC ET DOC, 1999.
- [6] Despujols, A. Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance. Techniques de l'ingénieur, dossier MT9050, 2005.
- [7] DENIAUD S., ZERHOUNI N., EL MOUDNI A., MOREL F. « Sur une modélisation de maintenance préventive à l'Alstom ». International Journal of Mechanical production systems Engineering. Number 2, V-53 à V-65. Mai 1999.
- [8] COTAINA N., M.GABRIEL M, RICHEL D., O'REILLY K. « Utilisation de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) pour développer et optimiser les politiques de maintenance dans les scieries. Revue Française de gestion industrielle , N° 16, P. 47-65.
- [9] Sherwin, D. A review of overall models for maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 6 (3), p. 138–164, 2000.
- [10] Murthy, D.N.P., A., Atrens, and J.A., Eccleston. Strategic maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 8 (4), p. 287–305, 2002.
- [11] Villemeur, A. Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels. Edition Eyrolles Paris, 1988.
- [12] Villemeur, A. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment, volume 1. J.Wiley, UK, 1992.
- [13] Murthy, D.N.P., A., Atrens, and J.A., Eccleston. Strategic maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 8 (4), p. 287–305, 2002.
- [14] Baker, R.D. and A.H., Christer. Review of OR modelling of engineering aspects of maintenance. European Journal of Operational Research, 73, p. 407–422, 1994.

- [15] Sherwin, D. A review of overall models for maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 6 (3), p. 138–164, 2000.
- [16] Dekker, R. and P.A., Scarf. On the impact of optimization models in maintenance decision making: The state of the art. *Reliability Engineering and Systems Safety*, 60 (2), p. 111–119, 1998.
- [17] Dekker, R., F.A., van der Duyn Schouten, and R., Wilderman. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Models of Operations Research*, 45, p. 411–435, 1997.
- [18] Dekker, R., R.E., Wildeman, and F.A., van der Duyn Schouten. Review of multi-component models with economic dependence. *ZOR/Mathematical Methods of Operations Research*, 45, p. 411–435, 1997.
- [19] Gits, C.W. On the maintenance concepts for a technical system: II. literature review. *Maintenance Management International*, 6, p. 181–196, 1986.
- [20] Jardine, A.K.S. and J.A., Buzacott. Equipment reliability and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 19, p. 285–296, 1985.
- [21] Menipaz, E. Optimization of stochastic maintenance policies. *European Journal of Operational Research*, 2, p. 97–107, 1978.
- [22] Monahan, G.E. A survey of partially observable markov decision processes: Theory, models and algorithms. *Management Science*, 28, p. 1–16, 1982.
- [23] Pierskalla, W.P. and J.A., Voelker. A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 23, p. 353–388, 1976.
- [24] Pintelton, L.M. and L., Gelders. Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*, 58, p. 301–317, 1992.
- [25] Scarf, P.A. On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research*, 99 (3), p. 493–506, 1997.
- [26] Sherif, Y.S. and M.L., Smith. Optimal maintenance models for systems subject to failure: A review. *Naval Research Logistics Quarterly*, 28, p. 47–74, 1981.
- [27] Thomas, L.C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering*, 16, p. 297–309, 1986.
- [28] Valdez-Flores, C. and R.M., Feldman. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 36, p. 419–446, 1989.
- [29] Wang, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139, p. 469–489, 2002.

- [30] Wijnmalen, D.J.D. and J.A.M., Hontelez. Review of a markov decision algorithm for optimal inspections and revisions in a maintenance system with partial information. *European Journal of Operational Research*, 62, p. 96–104, 1992.
- [31] Basile, O., Dehombreux, P., Riane, F. Evaluation of the uncertainty affecting reliability models. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(2):137-151, 2007.
- [32] G.ZWINGELSTEIN « diagnostique des défaillances », traité es nouvelles technologies série diagnostic et maintenance, edition Hermes1995.
- [33] C.SASSI « intégration des politiques de maintenance dans les systemes de production manufacturiers »These de doctorat de l'INP,Annee1998.G
- [34] COTAINA N. P. «Méthodologie d'aide à la décision et la mise en place de politiques de maintenance pour les PME. L'apport de la MBF (Maintenance basée sur la Fiabilité)» Doctorat de l'Université Henri Poincaré, NancyI soutenue le 22 octobre 1999
- [35] VAURIO J.K. « On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policie », Pages 79-89 ,Volume 56, Issue 1, April 1997. *Reliability Engeniering and safety Journal*.
- [36] Cho, D.I. and M., Parlar. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, 51, p. 1–23, 1991.
- [37] ZWINGELSTEIN G. « La maintenance basée sur la fiabilité : Une doctrine de maintenance pour optimiser la fiabilité et la sûreté de fonctionnement »Congrès qualité et sûreté de fonctionnement, compiège. 17 novembre, 1994 .
- [38] A.Tomache, Communication SME-ERCE, Symposium sur la maintenance industrielle, AEID-IAP. Alger, 21÷ 23, janvier 2001
- [39] Tajiri, M. and F., Gotoh. TPM Implementation. McGrall-Hill, New York, NY, 1992.
- [40] NF-EN-13306-X-60-319. Terminologie de la maintenance. Norme AFNOR, 2001.
- [41] Remy, E. Modèles d'évaluation quantitative de l'effet de la maintenance sur la fiabilité – état des lieux des recherches passées et en cours a EDF R&D. Actes du congrès LambdaMu, Avignon, Octobre 2008.
- [42] Cho, D.I. and M., Parlar. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, 51, p. 1–23, 1991.
- [43] Dekker, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 51, p. 229–240, 1996.
- [44] ZERHOUNI N., EL MOUDNI A., MOREL F. « Sur une modélisation de maintenance préventive à l'Alstom ». *International Journal of Mechanical production systems Engineering*. Number 2,V-53 à V-65. Mai 1999.

- [45] Dorigo M.,ManiezzoV.,Colorni A.positve feedback as a search strategy,technical report N°91-016,politecnico di Milano,Italy,1991
- [46] Lyonnet, P. Optimisation d'une politique de maintenance. Edite par TEC ET DOC, 1999.
- [47] Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des couts de maintenance et de la fiabilité Application a l'aéronautique. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2007.
- [48] Despujols, A. Approche fonctionnelle de la maintenance. Techniques de l'ingenieur, dossier MT9020, 2004.
- [49] Zille, V. Berenguer, C., Grall, A., Despujols, A. & Lonchamp, J. Modelling and performance assesment of complex maintenance programs for multi-component systems. In ESREDA 32nd Seminar proceedings, Alghero, Mai 2007.
- [50] Despujols, A. Methodes d'optimisation des strategies de maintenance. Techniques de l'ingénieur, dossier MT9050, 2005.
- [51] MSG-3. Maintenance Program Development Document. Air Transport Association, Washington, D.C. Revision 2, 1993.
- [52] EPRI. RCM technical handbook, 1982.
- [53] Despujols, A. Les applications de l'OMF. Note interne EDF HT-28-01-006 A, 2001.
- [54] G.ZWINGELSTEIN « diagnostique des défaillances », traité es nouvelles technologies série diagnostic et maintenance, édition Hermes1995.
- [55] Gits, C.W. On the maintenance concepts for a technical system: II. Literature review. Maintenance Management International, 6, p. 181–196, 1986.
- [56] Heidergott, B. Optimisation of a single-component maintenance system: A smoothed perturbation analysis approach. European Journal of Operational Research, 119, p. 181–190,1999.
- [57] Basile, O., Dehombreux, P., Riane, F. Evaluation of the uncertainty affecting reliability models. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 13(2):137-151, 2007.
- [58] Zille V. Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance sur des systèmes complexes. Présentation dans le cadre du séminaire des thèses du département management des risques industriels EDF-R&D. Chatou, Mars 2007.
- [59] Héng, J. Pratique de la Maintenance Préventive. Dunod, 2002.
- [60] Kelly, A. Maintenance Organization and Systems. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- [61] Heidergott, B. Optimisation of a single-component maintenance system: A smoothed perturbation analysis approach. European Journal of Operational Research, 119, p. 181–190, 1999.
- [62] J. Zaytoon (1993). Extension de l'Analyse Fonctionnelle à l'étude de la Sécurité Opérationnelle des Systèmes Automatisés de Production. Thèse N° 93 ISAL 0016 en vue de

l'obtention du grade de Docteur. Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'INSA de Lyon – France.

- [63] G. Nowack (1997). De l'apport des opérateurs temporels dans la modélisation dysfonctionnelle des systèmes. Thèse N° 97 ISAL 0072 en vue de l'obtention du grade de Docteur. Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'INSA de Lyon, France.
- [64] E. Niel, (1994) De la Sécurité Opérationnelle des Systèmes de Production, Habilitation à diriger les recherches en sciences (HDR 94 – 013), Université Claude Bernard, Lyon 1 et Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [65] H., Mohamed (2006). L'utilisation conjointe des réseaux de Petri stochastiques et des processus de Markov pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des performances d'un système de production : Ligne d'emboutissage de l'entreprise B.A.G. Batna. Thèse en vue de l'obtention du grade de Magister. Soutenue le 14 juin 2006 à l'Université El-Hadj Lakhdar Batna. Spécialité Génie Industriel.
- [66] R., C., David (1993). Analyse orientée objets et modélisation par simulation. Editions Addison-Wesley, France, juillet 1993.
- [67] C. Sassine, (1998) Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers, Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble - France, Discipline : Automatique et Productique.
- [68] Schneider, (2004). La Sûreté de Fonctionnement. Guide Technique, revue InterSection, novembre 2004.
- [69] A., Villemeur, (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, éditions Eyrolles, Paris 5è.
- [70] G. Zwingelstein (2008). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes. Technique de l'Ingénieur numéro S 8 250.
- [71] P. N., Cotaina (1999). Méthodologie d'aide à la décision et à la mise en place de politiques de maintenance pour les P.M.E. L'apport de la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité). Thèse, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, spécialité Automatique, soutenue le 22 octobre 1999.
- [72] G. Levitin, A. Lisniaski, H. Ben-haim, D. Elmakis. Redundancy optimization for series-parallel multistate system, IEEE Transactions reliability 47 (2) 1998 165-172.
- [73] Ushakov I. Universal generating function. Sov J Comput Syst Sci 1986;24(5):118–29.
- [74] Ushakov I. Optimal standby problems and a universal generating function. Sov J Comput Syst Sci 1987;25(4):79–82.
- [75] Aven T, Jensen U. Stochastic models in reliability. New York: Springer-Verlag.1999.

- [76] Bagdonvicius V. and Nikulin M. Accelerated life models modeling and statistical analysis. Chapman & Hall, 2002.
- [77] Barros A, Bérenguer C, Grall A. Optimization of replacement times using imperfect monitoring information. *IEEE Trans Reliab* 2003;52:523–33.
- [78] Blokus A. Reliability analysis of large systems with dependent components. In: Proceedings of the European safety and reliability conference (ESRel2005), Tri City, Poland, 2005, p. 205–12.
- [79] Ebeling CE. An introduction to reliability and maintainability engineering. McGRAW-HILL; 1997.
- [80] Fricks RM, Trivedi KS. Modeling failure dependencies in reliability analysis using stochastic petri-nets. In: Proceedings of European Simulation Multiconference (ESM '97), Istanbul, Turkey, 1997
- [81] Kotz S, Lai CD, Xie M. On the effect of redundancy for systems with dependent components. *IIE Trans* 2003;35:1103–10.
- [82] Kalbfleisch, J.D., Prentice, R.L. The Statistical Analysis of Failure Time Data, John Wiley & Sons, Chichester, 1980.
- [83] Kumar D. and Klifesjo B. Proportional hazard model: a review. *Reliability Engineering & System Safety*. 1994; 44: 177–188.
- [84] Levitin G. and Lisnianski A. Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2000; 67: 193-203.
- [85] Levitin G. A universal generating function approach for the analysis of multi-state systems with dependent elements. *Reliability Engineering and System Safety*. 2004;85:285-292.
- [86] Martorell S, Sanchez A. and Serradell V. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 1999; 64: 19-31
- [87] Misra K. B. Reliability Analysis and Prediction; A Methodology Oriented Treatment. Elsevier. ISBN 0-444-89606-6. 1992.
- [88] Mitrani I. Probabilistic Modelling. Cambridge University Press. ISBN 0521 58530 9. 1998.
- [89] Percy D. F. and Kobbacy K. A. H. Determining economical maintenance intervals. *International Journal of Production Economics*. 2000; 67: 87-94.
- [90] Pham H. Handbook of reliability engineering. London: Springer-Verlag.2003.
- [91] Rao SS. Reliability based design. New York: McGraw-Hill, Inc. 1992.
- [92] M. Samrout, E. Châtelet, R. Kouta, N. Chebbo. Optimization of maintenance policy using the proportional hazard model. *Reliability Engineering & System Safety*, sous presse.

- [93] Tsai Y. T., Wang K. S. and Teng H. Y. Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*. 2001; 74: 89-97.
- [94] Vaurio JK. Treatment of general dependencies in system fault-tree and risk analysis. *IEEE Trans Reliab* 2002;51:278–87.
- [95] Vaurio JK. Common cause failure probabilities in standby safety system fault tree analysis with testing—scheme and timing dependencies. *Reliab Eng Syst Safety* 2003;79:43–57.
- [96] Watanabe Y, Oikawa T, Muramatsu K. Development of the DQFM method to consider the effect of correlation of component failures in seismic PSA of nuclear power plant. *Reliab Eng Syst Safety* 2003;79:265–79.
- [97] Yu H; Chu C; Chatelet E; Yalaoui F; Reliability optimization of a redundant system with failure dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 92 (12), décembre 2007, pp. 1627-1634.
- [98] M.R. GAREY, D.S. JOHNSON, *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*, W.H. Freeman and Company, New York, 1979.
- [99] Chandru V. and Rao M.R. Linear programming, Chapter 31 in *Algorithms and theory of computational Handbook*, Crc Press 1999.
- [100] A. Sabihi Les methods hybrides en optimization combinatoire: Algorithmes exactes et heuristiques. Thèse de doctorat de l'université Paris-I Panthéon sorbonne. Année 2003
- [101] G. LAPORTE, I.H. OSMAN, *Metaheuristics in combinatorial optimization*, Annals of Operations Research 63, J.C. Baltzer Science Publishers, Basel, Switzerland, 1996.
- [102] I.H. OSMAN, J.P. KELLY (Eds.), *Meta-heuristics: theory and applications*, Kluwers Academic Publishers, Boston, 1996.
- [103] MacCarthy B.L. and Liu J. Addressing the Gap in Scheduling Research : A Review of Optimization and Heuristic Methods in Production Scheduling. *International Journal of Production Research*, 1993, 31(1), 59-79.
- [104] Spinellis D, Papadopoulos C.T. A simulated annealing approach for buffer allocation in reliable production Unes. *Annals of Opérations Research*, 2000, 93, 373-384.
- [105] Glover, F. W. and Kochenberger, G. A. (2003). *Handbook of Metaheuristics*, volume 57 of International series in operations research and management science. Kluwer Academic Publishers, Boston Hardbound.
- [106] T. Feo and M. Resende : Greedy Randomised Adaptive Search Procedure. *Journal of Global Optimisation*, tome 42, pages 860-878, 1995.
- [107] Talbi, E.-G. (2002). A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8(5) :541-564.

- [108] G. LAPORTE, I.H. OSMAN, Metaheuristics in combinatorial optimization, Annals of Operations Research 63, J.C. Baltzer Science Publishers, Basel, Switzerland, 1996.
- [109] I.H. OSMAN, J.P. KELLY (Eds.), Meta-heuristics: theory and applications, Kluwers Academic Publishers, Boston, 1996.
- [110] Timmis, J. (2001). aiVIS: Artificial Immune Network Visualisation. Proceedings of EuroGraphics UK. Pp 61-69. UCL, London. ISBN 0-9540321-0-1
- [111] J. Lepagnot ‘Conception de métaheuristiques pour l’optimisation dynamique. Application à l’analyse de séquences d’images IRM’. Thèse de doctorat, Université Paris-est, décembre 2011.
- [112] *A. collignan ‘methode d’optimisation et d’aide a la decision en conception mecanique :application a une structure AERONAUTIQUE ‘ these de doctorat, Université Bordeaux I, novembre 2011.*
- [113] M. Dorigo, V. Maniezzo, & A. Colomi. Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, 26(1): 29–41, 1996.
- [114] Dorigo, M., & Gambardella, L.M. 1997. Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1), 53_66.
- [115] Gambardella, L., Taillard, E., & Dorigo, M. 1999a. Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem. Journal of the Operational Research Society, 50, 167_176.
- [116] Deneubourg, J.L, Goss, S, & Verhaeghe, J.C. 1983. Probabilistic behaviour in ants. Journal of Theoretical Biology, 105, 259_271
- [117] Hiba KHELIL, Abdelkader BENYETTOU, Abdel BELAÏD Application du système immunitaire artificiel pour la reconnaissance des chiffres Maghrebien Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence , MCSEAI, April 28-30, 2008 – Oran, Algeria.
- [118] Khedam radja ‘contribution au developpement de methodologies de fusion/classification contextuelles d’images satellitaires multi-sources :.Application à la cartographie thématique du milieu urbain de la ville d’Alger’. Thèse de doctorat Faculte D’electronique Et Informatique, USTHB.
- [119] Timmis, J., & Knight, T. (2001). Artificial immune systems : Using the immune system as inspiration for data mining. In Hussein A. Abbass, Ruhul A. Sarker, and Charles S. Newton, editors, Data Mining: A Heuristic Approach, chapter XI, pp.209–230. Group Idea Publishing.
- [120] Forrest, S., & Perelson, A. (1994). Self-Nonsel Self Discrimination in a Computer. Symposium on Research in Security and Privacy, pp. 202-212.

- [121] Hofmeyr, S., & Forrest, S. (2000). Architecture for an Artificial Immune System. *Evolutionary Computation* 7(1), pp. 45-68.
- [122] Kim, J., & Bentley, P. (2001). Towards an Artificial Immune System for Network Intrusion Detection: An Investigation of Clonal Selection with Negative Selection Operator. *Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1244-1252.
- [123] De Castro, L. N., & Von Zuben, F. (2000). The clonal selection algorithm with engineering applications, *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference*: 36-37. An Evolutionary Immune Network for Data Clustering.
- [124] De Castro, L. N., & Timmis, J. I. (2002). *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*. Springer-Verlag.
- [125] Nasaroui, O., Dasgupta, D., & Gonzalzs, F. (2002). The fuzzy artificial immune system: Motivations, basic concepts, and application to clustering and web profiling. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems at WCCI*, pp. 711–716.
- [126] Lee, W., Nimbalkar, R. A., Yee, K. K., Patil, S. B., Desai, P. H., Tran, T.T. & Stolfo., S. J. (2000). A data mining and CIDF based approach for detecting novel and distributed intrusions. *Lecture Notes in Computer Science*, 1907: pp. 49–65.
- [127] Timmis, J., & Neal, M. (2000). An Artificial Immune System for Data Analysis, *BioSystems* 55(1/3), pp. 143-150.
- [128] Watkins, A., & Boggess, L. (2002). A new classifier based on resource limited artificial immune systems. *Proceedings of Congress on Evolutionary Computation. Part of the World Congress on Computational Intelligence*, pp. 1546-1551.
- [129] Leandro Nunes De Castro, Fernando J. Von Zuben,. *The Construction of a Boolean Competitive Neural Network Using Ideas from Immunology*. s.l. : Neurocomputing, 2003. pp. 51-85.
- [130] De Castro .LN & Von Zuben .F.J «Artificial Immune Systems: Part I - Basic theory and applications », Technical report, TR-DCA-01/99, December 99.
- [131] Dréo J., Pétrowski, A. Siarry P., and Taillard É. D., *Metaheuristics for Hard Optimization: Methods and Case Studies*, 3-540-23022-X, Springer, 2006.
- [132] Dasgupta D, Gonzalez F: An Immunity-Based Technique to Characterize Intrusions in Computer Networks, *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol 6; 3, pp 1081-1088, 2002.
- [133] Gregoire, C. *Modelisation et simulation de strategies de maintenance d'un systeme de graissage a l'aide de reseaux de Petri*. Rapport de projet de fin d'etudes d'ingenieur de l'Universite de Technologie de Troyes, EDF R&D Chatou, sous la responsabilite de A. Despujols, Printemps 2004.

- [134] Berenguer, C., Chatelet, E., Langeron, Y. Modelisation par RdPSI et simulation de strategies de maintenance appliquees a des systemes multi-composants – Etude de cas : systeme de graissage d'une turbo-pompe alimentaire. Rapport de contrat d'association EDF/R&D-UTT. Contrat P28/D02028/0-Lot 2, 2002.
- [135] Barlow, R. E., Fussell, J. B., Singpurwalla, N. D., Birnbaum, Z. W. Reliability and fault tree analysis : Theoretical and applied aspects of system reliability and safety assessment. Conference on Reliability and Fault tree analysis, University of California. Berkeley, Etats-Unis, 1974.
- [136] M. Brown and F. Proschan, 1983. Imperfect repair. *Journal of Applied probability*; 20: 851-859.
- [137]. D. Lin, M.J. Zuo and RCM. Yam, 2000. General sequence imperfect preventive maintenance models. *International Journal of reliability, Quality and safety Engineering*; Vol. 7, No. 3: 253-266.
- [138] M. Dorigo Ant Algorithms: Third International Workshop, ANTS 2002, Brussels, Belgium, September 12-14, 2002, Proceedings)) [Author:] [Sep-2002
- [139] J. Kaabi-Harrath. Contribution à l'ordonnement des activités de maintenance dans les systèmes de production. PhD thesis, Université de Franche-Comte, France, 2004.
- [140] M. Abdallah , Y. Massim , M. Benguediab , A. Zeblah Efficient Artificial Immune Algorithm for Preventive- Maintenance-Planning For Multi State Systems *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* Vol. 3, Issue 4, Jul-Aug 2013, pp.2196-2205
- [141] Y Massim, F Yalaoui, L Amodeo, E Chatelet, A Zeblah Efficient combined immune-decomposition algorithm for optimal buffer allocation in production lines for throughput and profit maximization. *Computers & operations research* 37 (4), 611-620
- [142] Corset, F. Aide a l'optimisation de maintenance a partir de reseaux bayesiens et fiabilite dans un contexte doublement censure. These de doctorat, Universite Joseph Fourier -Rennes 1, 2003.
- [143] Baraldi, P., Zio, E. Sensitivity analysis and fuzzy modelling for passive systems reliability assessment. *Annals of Nuclear Energy* 31(3):277-301, Fevrier 2003.
- [144] Baraldi, P., Zio, E. A combined Monte Carlo and possibilistic approach to uncertainty propagation in event tree analysis. *Risk Analysis* 28(5) : 1309-1326, 2008.
- [145] Crespo Marquez, A., Sanchez Heguedas, A. Models for maintenance optimization: a study for repairable systems and finite time periods. *Reliability Engineering and System Safety*, 75(3):367-377, Mars 2002.

- [146] Lapa, C.M.F., Pereira, C.M.N.A., Mol, A.C.D.A. Maximization of a nuclear system availability through maintenance scheduling optimization using a genetic algorithm. *Nuclear Engineering and Design*, 196(2):219-231, Mars 2000.
- [147] Marseguerra, M., Zio, E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 68(1):69-83, Avril 2000.
- [148] Ya-Yong Tang, Yeh Lam A δ -shock maintenance model for a deteriorating system. *European Journal of Operational Research*, 168(2):541-556, Janvier 2006.