

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROMECHANIQUE

جامعة باجي مختار – عنابة
كلية علوم المهندسين
قسم الإلكتروميكانيك

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT D'ETAT
Thème

*Modélisation des écoulements dans des
réservoirs agités*

Option : ELECTROMECHANIQUE

Par : Nassir CHEIKCHOUK

DEVANT LE JURY

Président	: Mr A. BELHAMRA	M.C	Université de Annaba
Rapporteur	: Mr A. YOUSFI	M.C	Université de Annaba
Examineurs	: Mr D. EL ALLOUSSI	Professeur	Université de Skikda
	Mr H. BOUGHOUAS	M.C	Université de Constantine
	Mr M. BENIDIR	M.C	Université de Constantine
Membre invité	: Mr A.E HADJADJ	M.C	Université de Annaba

Avant propos

Je voudrais tout d'abord remercier chaleureusement Monsieur Yousfi Ali, maitre de conférence à l'université Badji Mokhtar directeur de thèse pour m'avoir encadré et encouragé tout au long de ces travaux et Dr Saidani Messaoud de l'université de coventry U.K qui a co-supervisé mon travail.

Par leurs grandes compétences scientifiques et leurs remarquables qualités humaines, ont pu rendre ces années fructueuses.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Messieurs Belhamra Ali et Hadjadj A.Elias Maitres de conférences à l'Université Badji mokhtar d'avoir accepté d'examiner les travaux présentés dans cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Mr Daoud El-Alloussi de l'universite de skikda pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur de cette thèse.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Messieurs Boughouas Hamlaoui et Benidir Mohamed de l'université de Constantine qui ont aimablement accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Mes remerciement vont également à mes amis, à mes collègues, aux personnels et employés du département Electromécanique pour leur amitié et leur soutien.

Merci à ma petite famille, qui est une source permanente de motivation et de bonheur.

ملخص

إن التطورات الإدراكية و المنهجية لموضوع البحث تهدف انطلاقا من المعطيات إلى تطبيق التجارب، وإعداد تخطيط تنظيمي للصيانة من أجل إجراء تطور إنتاجي موافق للمتطلبات الحالية.

إن الأعمال التمهيدية تسمح للإداري المسؤول عن وظيفة الصيانة بحسن تدبي النظام الذي يقدم وسائل المساعدة في القرارات الموضحة لإدارة سياق التطورات و وسائلهم.

من الجانب العملي فموضوع البحث مخصص لتحليل مختلف النماذج و الأعمال المقترحة لتطبيق تجديد التجربة و يتجلى ذلك في مستويين من التحليل.

يضم المستوى الأول مجموعة من الوسائل، والنماذج والمناهج التي تبحث عن وصف كيفية تجزئة الجهاز مستعينين بعدة أعمال سلسلة 'مركوف' ، التحاليل متعددة المعايير.

أما المستوى الثاني للتحليل يعتمد على تحديد الاستحقاقات بهدف التجديد وبمساعدة أفضل الوسائل.

نعرف حدا رئيسيا يتعلق بخاصية أحادية الهدف للبحث عن الحلول التي لا تسمح بأخذ عدة معايير في وقت واحد.

من جهة أخرى يعنى هذا الحد بتشكيل خاصية للأنظمة الفيزيائية ذات هندسة متغيرة تسمح بأفضلية الآلية الهيدروليكية حسب المعايير بأدنى ضغط في المكبس وإحصائه للأنظمة الجادة المدمج بالمفهوم القياسي للأهمية.

و أخيرا تؤدي حتما النتائج المتحصل عليها إلى إدراكات حسية مستقبلية للبحوث و اتساعات أخرى ممكنة وهكذا نبحت في نفس الوقت عن إخراج نقاط القوة لوظيفة البحث ، ونعرض كذلك محاور جديدة لمستقبل أبحاثنا على مستويات قصيرة متوسطة ، و طويلة المدى.

Résumé

Les développements conceptuels et méthodologiques de cette thèse ont pour but à partir des données du retour d'expérience, élaborer une stratégie d'organisation de la maintenance afin de formaliser le processus de production adaptée aux exigences actuelles.

L'approche proposée permettra au gestionnaire de la fonction maintenance de bien penser le système en lui offrant des outils qui l'aideront à prendre des décisions éclairées quant à la gestion des processus et processeurs.

D'un point de vue pratique, cette thèse est consacrée d'une part à l'analyse de différents modèles et approches proposés pour la pratique du renouvellement en distinguant 2 niveaux d'analyse.

Le premier niveau comporte l'ensemble des outils, modèles et méthodes qui cherchent à décrire la dégradation du matériel en utilisant diverses approches chaîne de Markov, analyses multicritères.

Le second niveau d'analyse s'appuie sur la détermination d'échéances pour le renouvellement à l'aide d'outils d'optimisation. Nous identifions une limite principale, elle concerne le caractère uni-objectif de la recherche des solutions ne permettant pas de tenir compte de plusieurs critères à la fois.

D'autre part elle concerne l'élaboration d'un modèle des systèmes physiques celui à géométrie variable qui permet l'optimisation du mécanisme hydraulique d'après le critère du minimum de pression dans le vérin et son calcul fiabiliste intégrant la notion de mesure d'importance.

Finalement les résultats obtenus conduisent impérativement vers des perspectives de recherche futures et des extensions possibles. Ainsi, nous cherchons à la fois à faire ressortir les points forts de notre activité de recherche et nous proposons aussi de nouveaux axes pour notre recherche future, à court, moyen et long termes.

ABSTRACT

The purpose of the conceptual and methodological developments of this thesis are starting from the data of the experience feedback, to work out a strategy of organization of maintenance in order to formalize the production process adapted to the current requirements.

The approach suggested will make it possible to the manager of the function maintenance to think the system well by offering tools to him which will help it to make decisions lit as for the management of the processes and processors.

From a practical point of view, this thesis is devoted E on the one hand to the analysis of various models and approaches suggested for the practice of the renewal by distinguishing 2 levels from analysis.

The first level comprises the whole of the tools, models and methods which seek to describe the degradation of the material by using various approaches chains of Markov, analyzes S multicriterion S.

The second level of analysis is based on the determination of expiries for the renewal using tools for optimization. Nous let us identify a principal limit, it relates to the character plain-objective of the search for the solutions not allowing to take account of several criteria at the same time.

In addition it relates to the development of a model of the physical systems that with variable geometry which allows the optimization of the hydraulic mechanism according to the criterion of the minimum of pressure in the jack and its calculation reliability engineer integrating the concept of measurement of importance.

Finally the results obtained imperatively lead worms of the future prospects for research and the possible extensions. Thus, we at the same time seek to emphasize the strong points of our activity of research and we propose also new axes for our future research, with short, average and long terms.

Sommaire

Introduction générale	8
1 Modélisation de fiabilité des réservoirs agités	10
Introduction.....	10
1.1 Notions de fiabilité et de maintenance.....	12
1.1.1 Estimation des indices de fiabilité.....	13
1.1.2 Les éléments concernés par la maintenance.....	16
1.1.3 Les politiques et activités de maintenance.....	17
1.2 Modèle mathématique.....	20
1.2.1 Théorie.....	20
1.2.2 Formulation de calcul.....	25
1.2.3 Analyse et présentation des données.....	26
Conclusion.....	30
2 Modélisation de maintenance préventive	31
Introduction.....	31
2.1 Stratégies de maintenance dans la littérature scientifique.....	33
2.1.1 Stratégie de maintenance préventive.....	33
2.1.1.1 Stratégie bloc (BRP).....	34
2.1.1.2 Stratégie âge (ARP).....	35
2.1.1.3 Stratégie de bloc modifiée.....	36
2.1.1.4 Stratégie opportuniste.....	37
2.2 Hypothèses.....	38
2.3 Modèle : Minimisation du coût.....	38
2.3.1 Politique de remplacement à intervalle constant.....	39
2.3.2 Remplacement préventif à âge prédéterminé.....	40

2.4	Modèle : Minimisation du temps.....	43
2.4.1	Politique de remplacement à intervalle constant.....	43
2.4.2	Remplacement préventif à âge prédéterminé.....	44
2.5	Paramètres d'optimisation des stratégies.....	45
2.6	Application numérique.....	45
2.6.1	Exemple 1 : Comparaison des stratégies.....	47
2.6.2	Résultats et discussion.....	49
2.6.3	Exemple 2 : Détermination de l'intervalle optimal de remplacement.....	50
2.6.4	Résultats et discussion.....	54
	Conclusion.....	57

3 Optimisation de stratégie de maintenance par

	l'analyse de Markov.....	59
	Introduction.....	59
3.1	Concepts généraux de modélisation.....	62
3.1.1	Chaine de Markov.....	62
3.2	Optimisation du système.....	67
3.3	Calcul de la disponibilité.....	69
3.4	Effet de la maintenance préventive sur le taux de défaillance.....	73
3.5	Application numérique.....	79
	Conclusion.....	83

4 Modélisation du mécanisme hydraulique

	de levage de la pelleteuse.....	85
	Introduction.....	85
4.1	Construction du modèle.....	87

4.2	Optimisation du mécanisme.....	88
4.3	Organigramme de calcul.....	90
4.4	Résultats et discussion.....	104
4.5	Application numérique.....	105
	Conclusion.....	108
5	Modélisation de fiabilité du système hydraulique	
	de la pelleteuse.....	110
	Introduction.....	110
5.1	Méthode d'analyse AMDEC.....	111
5.2	Exemple d'application.....	114
5.3	Arbre de défaillance.....	117
5.4	Problématique.....	123
5.5	Mesure de l'importance de Birnbaum.....	125
5.5.1		A
	Application numérique.....	126
5.5.1.1	Configuration 1 (branchement parallèle).....	126
5.5.1.2	Configuration 2 (branchement série).....	127
	Conclusion.....	129
	Conclusion générale.....	130
	Bibliographie.....	133
	Annexe 1.....	137
	Annexe 2.....	138

Liste des figures

Figure 1.1	Tendance déterministe des coûts de fonctionnement.....	20
Figure 1.2	Coûts de fonctionnement et de remplacement.....	21
Figure 1.3	Tendance de coût de fonctionnement.....	22
Figure 1.4	Forme de bénéfices.....	24
Figure 1.5	Politique de remplacement.....	25
Figure 1.6	Graphes des coûts d'inspection plus combustible supplémentaire.....	29
Figure 2.1	Modélisation stratégie bloc.....	34
Figure 2.2	Modélisation stratégie âge.....	35
Figure 2.3	Modélisation stratégie bloc modifié.....	36
Figure 2.4	Modélisation de type opportuniste.....	37
Figure 2.5	Politique de remplacement à intervalle constant.....	39
Figure 2.6	Système composé de deux composants série.....	47
Figure 2.7	Stratégies d'après le critère coût.....	48
Figure 2.8	Stratégie d'après le critère disponibilité.....	49
Figure 3.1	Diagramme de transition de markov.....	62
Figure 3.2	Graphe de transition.....	65
Figure 3.3	Fonction de disponibilité du système.....	66
Figure 3.4	Modèles de maintenance.....	68
Figure 3.5	Domaine de maintenance préventive.....	71
Figure 3.6	Temps maximal de révision.....	72
Figure 3.7	Durée maximale d'immobilisation.....	73
Figure 3.8	Taux de défaillance pour une MP imparfaite.....	75

Figure 3.9 effet de la maintenance préventive parfaite sur le taux de défaillance.....	76
Figure 3.10 détermination d'un λ équivalent par conservation de surface.....	77
Figure 3.11 Taux de défaillance équivalent résultant d'une maintenance systématique parfaite.....	78
Figure 3.12 Dépendance de λ en fonction de $1/\gamma$	81
Figure 3.13 Probabilité des états du modèle en fonction de $1/\gamma$	82
Figure 3.14 Valeur optimale de T+R.....	83
Figure 4.1 Pression du système hydraulique.....	87
Figure 4.2 Organigramme fonctionnel de l'optimisation du mécanisme.....	91
Figure 4.3 Schéma de calcul du mécanisme.....	92
Figure 4.4 Schéma de calcul.....	102
Figure 4.5 Caractéristique du bloc de commande.....	104
Figure 4.6 Paramètres du mécanisme.....	105
Figure 4.7 Résultats de l'analyse du mécanisme.....	107
Figure 4.8 Vitesse du godet en fonction du temps.....	108
Figure 5.1 Schéma de la commande hydraulique de la pelleteuse.....	113
Figure 5.2 Symboles utilisés pour arbres de défaillance.....	117
Figure 5.3 Arbre de défaillance relatif à la commande hydraulique de la pelle.....	119
Figure 5.4 Bloc diagramme de fiabilité de la commande hydraulique.....	122
Figure 5.5 Bloc diagramme pour le branchement parallèle.....	123
Figure 5.6 Fiabilité du système en fonction du temps.....	125

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Valeurs moyennes de B et de $L(m)$	27
Tableau 1.2	Résultats de calcul.....	28
Tableau 2.1	Paramètres optimaux des stratégies.....	48
Tableau 2.2	Calcul de l'intervalle préventif optimal.....	53
Tableau 2.3	Politique de remplacement à âge optimal.....	54
Tableau 2.4	Fonctions de fiabilité.....	56
Tableau 2.5	Disponibilité $D(t_p)$	57
Tableau 4.1	Expressions pour le calcul de i_i	103
Tableau 4.2	Résultats de l'optimisation pour trois types de machines.....	106
Tableau 5.1	matrice de criticité de la commande hydraulique du godet.....	116
Tableau 5.2	liste des points critiques.....	117

Introduction Générale

Les exigences du marché et les mutations subies par les systèmes de production ces dernières décennies ont conduit à des évolutions structurelles profondes de la maintenance industrielle. La pertinence de la maintenance a été abondamment démontrée au cours des dernières années. Alors qu'elle était perçue comme un mal nécessaire au cours des années de prospérité, sa pertinence s'est de plus en plus affirmée avec les récentes crises économiques et la mondialisation des marchés. La maintenance est en effet un centre de production de la disponibilité. Si elle est bien gérée, elle permet d'améliorer la fiabilité de l'outil de production et donc d'augmenter sa disponibilité et sa capacité de production.

Cette thèse comporte un ensemble de recherches qui s'inscrivent dans le cadre d'une problématique globale portant sur la proposition d'outils d'aide à la décision pour la gestion de processus de maintenance. En effet les problèmes relatifs à l'implantation de tels mécanismes se résument généralement à la gestion des processus de maintenance et des processeurs (ressources humaines, matérielles et pièces de rechange) cette recherche à débouchée sur plusieurs contributions. Plusieurs extensions possibles aux modèles peuvent être envisagées.

Ainsi, nous avons cherché dans cette étude, outre l'intégration de méthodes de maintenances mieux adaptées aux réalités présentes, à envisager de nombreuses hypothèses mathématiques.

Le mémoire comporte cinq chapitres. Le premier chapitre permet d'introduire la problématique de stratégie de maintenance liée à un problème technique celui des réservoirs subissant des dégradations lesquelles entraînent des difficultés de production dans le processus chimique entraînant une diminution de l'efficacité du processus de fabrication. Le modèle établi fait apparaître la

nécessité d'intégration de critères économiques et techniques dans le processus sur le court terme.

Dans le chapitre 2, L'étude porte sur la détermination d'instantanés optimaux de maintenance pour la minimisation d'un coût moyen de maintenance de décision permettant de définir un horizon d'exploitation d'un système, soumis à une maintenance préventive périodique, autrement dit déterminer les paramètres de la politique de maintenance préventive qui optimise plusieurs critères pour deux politiques de type âge et celle de type bloc en considérant deux critères : minimisation du coût et minimisation du temps d'arrêt

Dans le chapitre 3, nous allons montrer comment la modélisation markovienne peut aider, par une formalisation simple du problème, à définir ce ratio maintenance corrective / maintenance préventive, en posant les bases d'une étude d'optimisation sous contraintes technico-économiques

Dans le Chapitre 4, nous proposons une approche originale par rapport à la littérature, nous nous intéressons au développement d'approches de modélisation des systèmes à géométrie variable. Nous présentons une méthode utilisée pour l'optimisation du mécanisme hydraulique de la pelle dont le schéma fonctionnel fera l'objet d'étude du chapitre 5

Dans le chapitre 5 nous nous intéressons à la fiabilité du système de commande hydraulique du godet de la pelleteuse. Nous essayons de déceler les parties vulnérables du système par l'application d'outils d'aide à la décision et par l'application de la mesure de Birnbaum.

Dans la présente thèse, les modèles développés et les techniques utilisées ont en réalité un caractère plus général. Le choix des différentes applications est fait dans un souci de compréhension et de prise en charge de problèmes de quelques natures que ce soient. Il peut s'étaler à n'importe quel système.

CHAPITRE 1**Modélisation de Fiabilité des
Réservoirs Agités****INTRODUCTION**

L'étude de tout système ou processus nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce processus face à différentes sollicitations et d'analyser ainsi les mécanismes le régissant. Dans notre cas, nous en déduisons à l'adoption d'une politique de remplacement préventive et à la détermination des conséquences qui en découlent. La modélisation dont il est question ici est la modélisation générale de type stratégie de maintenance. Nous étudions plus particulièrement le modèle déterministe dans lequel les conséquences de chaque action sont connues avec certitude.

Cette étude porte sur la détermination d'une politique de révision optimale pour des réservoirs agités largement utilisés dans des industries chimiques et de transformation. Les produits liquides transportés et /ou emmagasinés ont la particularité de contenir des solides et durant le processus de fabrication forment des dépôts sur la surface à l'intérieur des réservoirs et causent des difficultés de

production dans le processus chimique entraînant une diminution de l'efficacité du processus de fabrication. Selon la réglementation en vigueur les installations doivent être inspectées régulièrement. Le travail est pris en charge et exécuté par le service entretien.

Le problème en face du personnel de maintenance est la formation de dépôts entre les périodes d'inspection qui entraînent la détérioration de son rendement. Pour réduire cette perte dans l'efficacité, les différentes sections du service doivent être nettoyées. Ces opérations engendrent des coûts d'inspection et cette étude porte sur la détermination d'une politique d'inspection afin de minimiser la somme des coûts induits plus les coûts de combustible entre les différentes enquêtes. En général les approches précitées peuvent être appliquées à l'équipement à intervalles fixes, mais il y a des parties qui s'abiment au cours de cette opération et peuvent être restaurées partiellement ou complètement durant cette période [16].

a) Effet de la formation de dépôts

L'accumulation des dépôts s'exprime par l'augmentation de la température dans l'installation. La montée de température peut être utilisée à estimer l'excès d'énergie consommée dû à la perte d'efficacité

b) Conséquences

Les conséquences de n'importe quelle décision sont :

- i) Si la décision est de continuer à opérer sans aucune attention alors la note de consommation d'énergie s'accroîtra
- ii) Si la décision est d'opérer des nettoyages alors la note d'énergie subséquente sera réduite mais un coût d'inspection sera ajouté

c) critères et fonction objectif

Les coûts encourus en utilisant une politique d'inspection sont ceux de l'inspection même plus ceux de l'augmentation de l'énergie. Ce coût sera appelé coût d'énergie supplémentaire et le critère dans cette étude est de minimiser la somme des coûts d'inspection et de l'énergie supplémentaire entre chaque étude ou enquête.

Dans ce chapitre nous rappellerons certains concepts de fiabilité et de maintenance non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour la mise en place de système de maintenance.

1.1 notions de fiabilité et de maintenance

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, conçus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné, pour chaque système il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer.

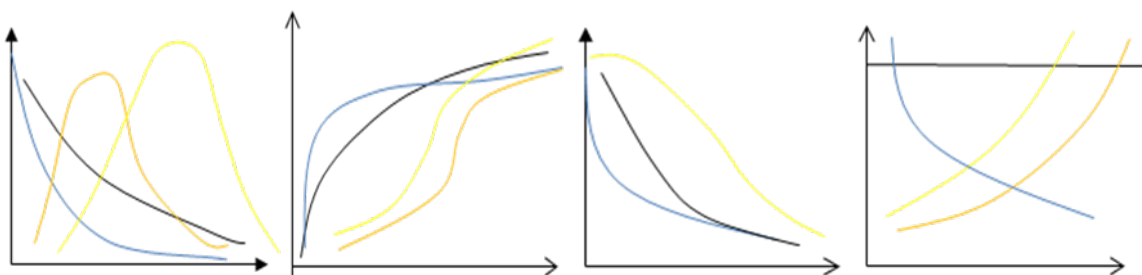
LA FIABILITE [1]

Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée.

Terme anglais : reliability (performa

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (1.1)$$

Fig.1a : Densité probabilité Distributions cumulative Fonctions fiabilités Taux de défaillance



$$f(t)dt = Pr(t < \text{durée de vie} \leq t + dt)$$

avec $f(t)$ la fonction de densité de probabilité associée aux durées de vie. Rappelons que la durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu, elle s'exprime en termes de temps, de kilomètres, d'heures de fonctionnement etc...

Le fait que la défaillance d'un système puisse survenir à n'importe quel moment nous conduit à considérer cette grandeur comme une variable aléatoire à laquelle nous pouvons associer une fonction densité $f(t)$

1.1.1 Estimation des indices de fiabilité

Pour mesurer la fiabilité, il faut disposer d'informations sur les durées de vie. Celles-ci peuvent être issues d'historiques d'exploitation ou d'expériences sur des prototypes. Si on soumet à l'essai N éléments identiques, dans les mêmes conditions, à l'instant t où les essais se terminent, on a $N_s(t)$ éléments qui ont survécu et $N_f(t)$ qui ont échoué ($N_s(t) + N_f(t) = N$ car il n'y a pas de remplacement à la panne). À l'issue de ces essais, on est en mesure de déterminer le taux de panne et la fonction de densité de probabilité (équation (1.2)), la fiabilité et la probabilité de défaillance (équation (1.3)) et les autres caractéristiques de la fiabilité [7].

$$r(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{N_s(t)\Delta} \quad \text{et} \quad f(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{N\Delta} \quad (1.2)$$

$$R(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_s(t)}{N} \quad \text{et} \quad F(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_f(t)}{N} \quad (1.3)$$

Ces fonctions sont illustrées dans la figure 1.a pour les distributions les plus répandues :

— Normale — Weibull — Exponentielle négative — Hyper exponentielle

DÉFAILLANCE [1]

Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, celle-ci est en état de panne.

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

Note : perte partielle ou totale des fonctionnalités du système qui le rend incapable de délivrer le service spécifié.

Terme anglais : *failure*

Une défaillance peut être caractérisée par un taux appelé taux de défaillance, réparation et de transition

TAUX DE DÉFAILLANCE INSTANTANÉ [43]

Limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'une défaillance d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t+\Delta t]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro, en sachant que l'entité n'a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.il représente également la vitesse d'arrivée de la panne.

Terme anglais : *instantaneous failure rate*

TAUX DE RÉPARATION INSTANTANÉ [43]

Limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'achèvement de la réparation (ou d'une opération de maintenance) d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t+\Delta t]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro, sachant que l'entité a été en panne sur tout l'intervalle de temps $[0, t]$.

Terme anglais : *instantaneous repair rate*

TAUX DE TRANSITION [43]

Limite, si elle existe, du quotient de la probabilité de quitter un état du système pour un autre état du système dans l'intervalle de temps donné $[t, t+\Delta t]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro.

La vie utile d'un composant comporte des cycles de fonctionnement, ces derniers sont composés des notions suivantes :

MTBF [43]

Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

Terme anglais : Mean Time Between Failure

MTTF [43]

Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

Terme anglais : Mean Time To Failure

MTTR [43]

Durée moyenne de réparation. Ce terme est parfois utilisé pour désigner la durée moyenne de maintenance corrective.

Terme anglais : Mean Time To Repair

MUT [43]

Durée moyenne de fonctionnement après réparation.

Terme anglais : Mean Up Time

Il résulte de ces définitions une grandeur qui caractérise un équipement au même titre que la fiabilité

DISPONIBILITÉ [1]

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires sont assurés.

Note : C'est une grandeur qui intègre la fiabilité et la maintenabilité. Elle exprime la probabilité pour que le système accomplisse sa fonction, donc qu'il soit exempté de fautes, à l'instant t , sachant qu'il a pu en receler auparavant.

Terme anglais : availability

DISPONIBILITÉ INSTANTANÉE

Probabilité qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné. Elle est notée $D(t)$.

Synonyme : "mesure de la disponibilité"

Terme anglais : *instantaneous availability*

DISPONIBILITÉ HUMAINE

Aptitude d'un opérateur humain à être en état d'accomplir une mission requise dans des conditions données et à un instant donné.

Terme anglais : *human availability*

1.1.2 Les éléments concernés par la maintenance

COMPOSANT [17]

Partie d'un élément fonctionnel constituant une entité élémentaire considérée comme indivisible.

Terme anglais : *component*

COMPOSANT CRITIQUE

Composant dont la défaillance, dans un état de fonctionnement donné du système, entraîne la défaillance du système.

Terme anglais : *critical component*

ÉLÉMENT

voir "Entité"

ENTITÉ

Tout élément, composant, sous-système, système, dispositif, équipement, unité fonctionnelle que l'on peut considérer individuellement.

Termes anglais : *entity, item*

FONCTION

Service rendu par un système, une entité.

Terme anglais : *function*

MACHINE [17]

Ressource de production d'un SAP. Ensemble de mécanismes combinés pour recevoir une forme d'énergie, la transformer et la restituer sous une forme appropriée, ou pour produire un effet donné.

Terme anglais : machine

MAINTENABILITÉ [1]

Aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

Terme anglais : maintainability

SYSTEME

Un système est un ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés, en interaction ou coopérant entre eux.

Terme anglais : system

1.1.3 Les politiques et activités de maintenance

STRATÉGIE DE MAINTENANCE

Ensemble des décisions qui conduisent :

- à définir le portefeuille d'activités de la production de maintenance, c'est - à - dire, à décider des politiques de maintenance des matériels (méthodes correctives, préventives, amélioratives à appliquer à chaque matériel)
- et, conjointement, à organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

Terme anglais : maintenance strategy

MAINTENANCE [15]

Ensemble des actions techniques et administratives correspondantes, y compris les opérations de surveillance et de contrôle, destinée à *maintenir* (maintenance préventive) ou à *rétablir* (maintenance corrective) une entité dans un état spécifié ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement (disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité) lui permettant d'accomplir une fonction requise.

Terme anglais : maintenance

MAINTENANCE CORRECTIVE (MC) [15]

C'est une opération de maintenance effectuée après la détection d'une défaillance et destinée à remettre une entité dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

Note : Ses actions s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- test : comparaison des mesures avec une référence,
- détection : déceler l'apparition d'une défaillance,
- localisation : les éléments par lesquels la défaillance se manifeste,
- diagnostic : analyse des causes de la défaillance
- dépannage, réparation : remise en état (avec ou sans modification),
- contrôle : contrôle du bon fonctionnement
- amélioration éventuelle : éviter la réapparition de la panne,
- historique : mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

Synonyme : "dépannage"

Terme anglais : corrective maintenance

MAINTENANCE PRÉVENTIVE (MP)

Opération de maintenance effectuée avant la détection d'une défaillance d'une entité, à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits (suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs) et destinée à réduire la probabilité de défaillance d'une entité ou la dégradation du

fonctionnement d'un service rendu. [31] Si une entité tombe en panne avant l'occurrence d'une date de maintenance, elle n'est pas réparée et attendra la prochaine date de maintenance préventive.

Note : L'intervention préventive sert à améliorer l'état de l'élément. Par conséquent, seules les défaillances progressives sont prises en compte. Une politique de maintenance préventive a pour objectifs :

- réduire les coûts de défaillance ;
- augmenter la fiabilité d'une machine ;
- améliorer la disponibilité de l'atelier de production ;
- augmenter la durée de vie efficace d'une machine ;
- améliorer l'ordonnancement des travaux ;
- faciliter la gestion des stocks ;
- assurer la sécurité, etc.

Synonyme : "entretien"

Terme anglais : *preventive maintenance*

MAINTENANCE CONDITIONNELLE

Opération de maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé [31] (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure, etc.) ou à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation et de la baisse de performance d'une entité.

Note : Cela permet de "retarder" et de planifier les interventions. Cet événement permet de fixer un seuil d'alarme avant un seuil d'admissibilité. Le principal intérêt d'une telle stratégie est de pouvoir utiliser les entités aux maximum de leur possibilité mais aussi de diminuer le nombre des opérations de maintenance corrective [31]. Contrairement à la MC, les activités de la MP prédictive sont principalement basées sur des activités de surveillance.

Synonyme : "maintenance préventive prédictive"

Termes anglais : *conditional preventive maintenance, predictive maintenance, unscheduled maintenance*

1.2 Modèle mathématique

Le modèle mathématique développé tient compte des décisions, conséquences et critères établis dans la section précédente, c'est-à-dire il est basé sur la supposition que les intervalles entre inspections seront constants. La stratégie de remplacement est déterministe.

1.2.1 Théorie

Les situations de maintenance déterministes sont celles dans lesquelles les conséquences de chaque action sont connues avec certitude. Pour un matériel dont le coût de fonctionnement augmente avec l'usage, la tendance de l'action de remplacement de fonctionnement est connue avec certitude comme illustrée dans la figure 1.1[45].

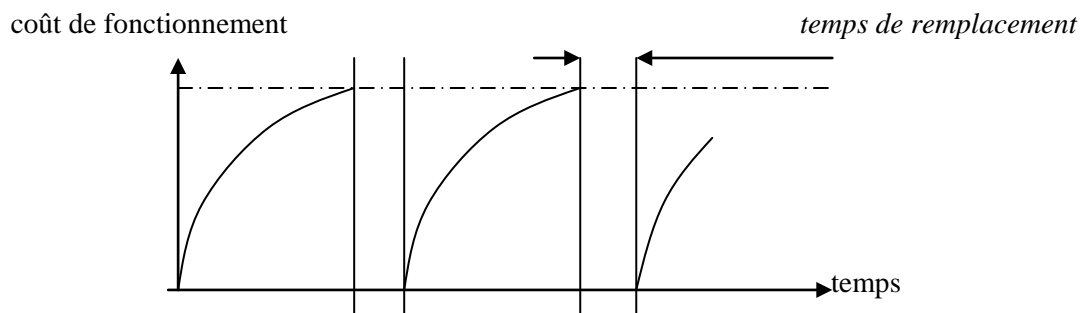


Figure 1.1 *tendance déterministe des coûts de fonctionnement*

Dans la pratique on rencontre deux modèles de remplacement un à court terme et l'autre à long terme.

a) modèle de remplacement pour intervalle de remplacement à court terme

Ce que nous désirons déterminer est une stratégie de remplacement optimal qui minimise la somme des coûts de fonctionnement et de remplacement entre les inspections annuelles principales comme illustrée dans figure 1.2.

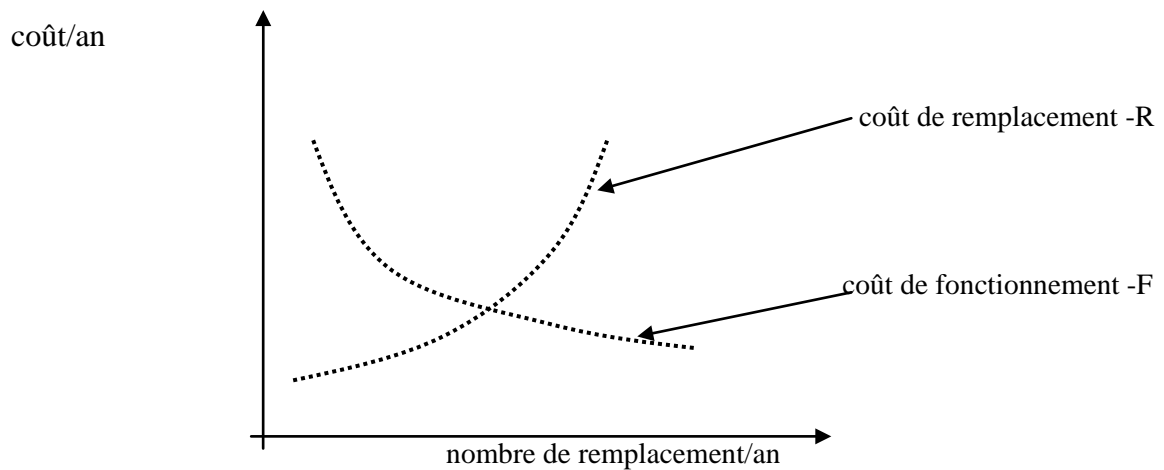


Figure 1.2 coûts de F et de R / au nombre de remplacement

Les suppositions faites dans cette analyse sont les suivantes :

- i) La tendance du coût de fonctionnement par unité de temps suivant chaque remplacement est illustrée dans fig.1.3 est exprimée comme

$$\frac{\text{coût de fonctionnement}}{\text{unité de temps à temps } t} = A - Be^{-\lambda.t} \quad \text{ou } (A - B) \text{ est le coût de}$$

fonctionnement /unité de temps si aucune détérioration s'est produite et λ constante qui détermine la forme de la courbe

- ii) Coût de remplacement = α
 iii) Effectuer n remplacements séparés également entre les inspections annuelles dans l'intervalle $(0, t)$ fig.1.4
 iv) L'objectif est de minimiser la Σ des coûts de F et de R .

Coût total entre inspections annuelles

= coût de remplacement entre inspections + coût de fonctionnement entre inspections

coût de remplacement entre inspections

= nombre de remplacements \times coût par remplacement = $n.\alpha$

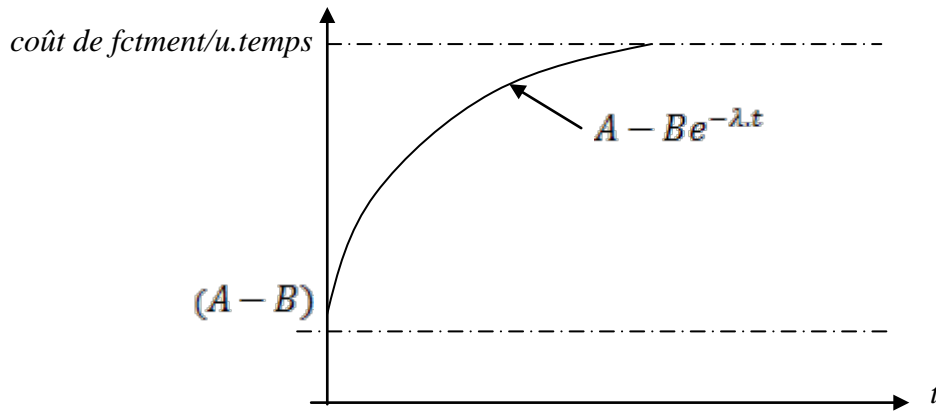


Figure 1.3 tendance de coût de fonctionnement

Coût de fonctionnement entre inspections

= coût de fonctionnement pour chaque intervalle entre remplacement \times nombre d'intervalle entre inspection

$$\int_0^s (A - Be^{-\lambda t}) dt \times (n + 1)$$

Coût total entre inspection $C(s)$

$$\begin{aligned} &= n\alpha + (n + 1) \int_0^s (A - Be^{-\lambda t}) dt \\ &= n\alpha + (n + 1) \left[As + \frac{B}{\lambda} e^{-\lambda s} - \frac{B}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\text{Puisque } (n + 1) = T \quad \rightarrow \quad n = \left(\frac{T}{s} - 1 \right)$$

Substituant n dans (1)

$$C(s) = \frac{T\alpha}{s} - \alpha + TA + \frac{TB}{s\lambda} e^{-\lambda s} - \frac{TB}{s\lambda} \quad (1.5)$$

Pour déterminer l'intervalle optimal d'inspection, s , dérivons et égalons à 0 $C(s)$

$$\frac{B}{\lambda} - \alpha = e^{-\lambda s} \left(Bs + \frac{B}{\lambda} \right) \quad (1.6)$$

b) modèle de remplacement pour intervalle de remplacement à long terme

la dégradation du matériel peut être mesurée en terme de bénéfice net tiré à partir du fonctionnement de l'équipement [24] . Eventuellement le bénéfice net atteindra un niveau où il est économiquement justifiable de remplacer cet équipement. Nous souhaitons déterminer une stratégie de remplacement optimale qui maximise le total des bénéfices nets à escompter sur une longue période. Nous supposons que l'équipement est remplacé par un neuf <as new > condition pour continuer à faire des bénéfices [21,22].

Les paramètres utilisés sont :

- i) $b(t)$ est le bénéfice net par rapport à l'unité de temps
- ii) $c(t)$ est le coût net de remplacement de l'équipement à l'âge t . Remplacer un matériel coûte le prix d'achat ajouté le coût de l'installation et on peut encore introduire le coût de perte du temps nécessaire au remplacement. Ces derniers sont généralement compensés partiellement par la récupération du matériel usagé qui habituellement dépend de quand l'ancien équipement sera remplacé
- iii) K est le temps requis pour effectuer l'action de remplacement
- iv) T est l'âge de l'équipement au moment du remplacement
- v) $T+K$ est le cycle de remplacement
- vi) $B(t)$ est le total des bénéfices nets escomptés tiré de l'utilisation de l'équipement pour les durées de longueur T sur une longue période.

Le bénéfice net escompté sur le premier cycle est :

$$\int_0^T b(t)e^{-it} dt \quad \text{ou } i - \text{taux d'intérêt}$$

Le coût de remplacement net escompté sur le premier cycle de remplacement

$$c(t)e^{-it}$$

Cependant le total des bénéfices nets escomptés sur le premier cycle de remplacement

$$\int_0^T b(t)e^{-it} dt - c(T)e^{-iT} = B_1(T + K)$$

Le total des bénéfices nets escomptés sur le second cycle à partir du début du 2^{ème} cycle est :

$$B_2(B + K)$$

Le total des bénéfices nets escomptés sur le second cycle à partir du début du 1^{ème} cycle est :

$$B_2(T + K)e^{-i(T+K)}$$

⋮

Le total des bénéfices nets escomptés sur le n^{ème} cycle à partir du début du 1^{ème} cycle est :

$$B_n(T + K)e^{-[i(n-1)(T+K)]}$$

La forme que prennent les bénéfices sur le cycle de remplacement est illustrée sur fig.1.4.

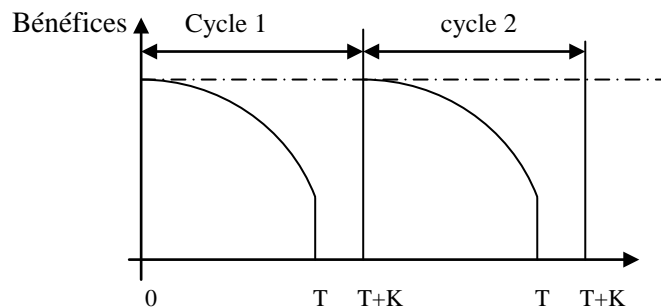


Figure 1.4 forme de bénéfices

Ainsi le total des bénéfices nets sur une longue période avec âge de remplacement T est :

$$B(T) = B_1 + B_1e^{-i(T+K)} + B_1e^{-i2(T+K)} + \dots + B_1e^{-i(n-1)(T+K)} + \dots \tag{1.7}$$

Alors

$$B_1(T + K) = B_2(T + K) = B_3(T + K) = \dots = B_1$$

L'équation (1.7) est une progression géométrique à l'infinie, alors

$$B(T) = \frac{B_1}{1 - e^{-i(T+K)}} = \frac{\int_0^T b(t)e^{-it} dt - c(T)e^{-iT}}{1 - e^{-i(T+K)}} \quad (1.8)$$

L'équation (1.8) est un modèle de remplacement par lequel une variété d'intervalles de remplacement peut être évaluée.

1.2.2 Formulation de calcul

Dans ce cas il est supposé que le quantité d'énergie générée entre inspections est constante [16]

Soit $S_1 = S_2 = \dots = S_{n+1} = S$

Coût supplémentaire de combustible entre inspections est exprimé en fonction de la quantité produite $= c \int_0^S T(m)dm$

Coût d'une seule inspection = α

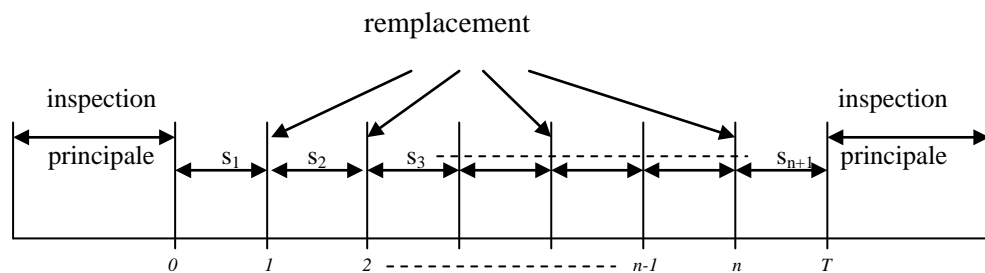


Figure 1.5 politique de remplacement

$$\sum_{n=1}^{n+1} s_n = N$$

Si n sont les inspections entre enquête $(n+1)$ intervalles d'inspection

Coût d'inspection = $n \cdot \alpha$

Coût de combustible supplémentaire = $(n + 1) \int_0^S T(m) dm$

Noté E_N = coût sup de combustible produit par N quantité produite

$$E_N = n\alpha + (n + 1) \int_0^S T(m) dm$$

Puisque $N = s(n + 1) \rightarrow n = \left(\frac{N}{s} - 1\right)$

$$E_N = \alpha \left(\frac{N}{s} - 1\right) + \frac{N}{s} [c \int_0^S T(m) dm] \quad (1.9)$$

N = quantité de produit entre enquêtes

S = intervalle d'inspection

α = coût d'inspection

1.2.3 analyse et présentation des données

La relation entre la température des gaz dégagés et la quantité produite de matière

$$T_m = A - B e^{-L(m)s}$$

Pour

$$m = 0; \quad T(0) = A - B e^{-L(0).0}$$

augmentation de $t^\circ = t^\circ$ actuelle - $T(0)$

$$= A - B e^{-L(m)s} - (A - B)$$

$$= B - B e^{-L(m)s}$$

Pour obtenir le coût de fuel supplémentaire nous utilisons la forme de $T(m)$ et le coefficient de coût [23]

$$= c \int_0^S T(m) dm$$

$$= c \int_0^S (B - B e^{-L(m)s}) dm$$

$$= c \left[B_m + \frac{B}{L(m)} e^{-L(m)S} \right]_0^S$$

Calcul de c (voir annexe1)

$$= c \left[Bm + \frac{B}{L(m)} e^{-L(m)S} - \frac{B}{L(m)} \right]$$

Pour $S = \text{constant}$; $L(m) = L = ct$

$$c \int_0^S T(m) dm = c \left[BS + \frac{B}{L} e^{-L.S} - \frac{B}{L} \right]$$

Donc

$$E_N = \alpha \left(\frac{N}{S} - 1 \right) + \frac{N}{S} \left[c \left(BS + \frac{B}{L} e^{-L.S} - \frac{B}{L} \right) \right] \quad (1.10)$$

Pour déterminer la valeur de S qui minimise la somme du combustible sup et les coûts d'inspection nous dérivons l'équation (1.10) par rapport à s et $E_N=0$

$$\frac{dE_N}{ds} = -\frac{\alpha N}{S^2} - \frac{N}{S} C \cdot B e^{-L.S} \frac{N}{S^2 L} C B e^{-L.S} + \frac{NCB}{S^2 L} = 0$$

Puisque N et S ne peuvent être nuls cela donne

$$\alpha - \frac{CB}{L} + C B e^{-LS} \left(S + \frac{1}{L} \right) = 0 \quad (1.11)$$

Cette procédure est utilisée pour 8 conditions ayant 4 valeurs de B et $L(m)$ aux conditions initiales après enquête i.e. $m=0$ et 4 valeurs de $L(m)$ pour $m = 160, 200, 300, 350$ les valeurs trouvées sont regroupées dans le tableau 1.1

Tab.1.1 valeurs moyennes de B et de $L(m)$

m	B	L(m)
0	66.8	0.0087
0	57.5	0.0073
0	56.2	0.0113
0	55	0.018
160	66.8	0.015
200	47.32	0.016
300	55.95	0.024
350	63	0.031

La valeur moyenne de $L(m)$ à $m = 0$ est 0.0114 ;

La valeur moyenne de B à $m = 0$ est $59^\circ F$ soit $60^\circ F$ pour une erreur admise de 5%

Le coût d'inspection comporte la main d'œuvre et la fourniture nécessaire cela nécessite 2 hommes pour 2 jours ; la fourniture est l'eau et des produits chimiques. Ce coût est estimé à 80 KDA/inspection et il demeure constant. E_N est calculé pour $N = 600 \cdot 10^6$ et $N = 300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (valeur maximale et minimale espérées)

Le tableau suivant (1.2) donne les résultats pour différentes valeurs de n = nombre d'inspections et figure (1.6) illustre clairement ces résultats.

Tab 1.2 résultats de calcul

$N = 600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		$N = 300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
n	E_N	n	E_N
0	3.97	0	1.66
1	3.41	1	1.29
2	2.98	2	1.09
3	2.66	3	1.00
4	2.43	4	0.97
5	2.27	5	0.95
6	1.26	6	0.99
7	2.08	7	1.00
8	2.04	8	1.02
9	2.03	9	1.07
10	2.02	10	1.13
11	1.99	11	1.18
12	2.00	12	1.24
13	2.04	13	1.33
14	2.06	14	1.37
15	2.08	15	1.41
16	2.11	16	1.44
17	2.13	17	1.46
18	2.18	18	1.51
19	2.23	19	1.56

→ indique la solution optimale

pour $N = 600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ la solution optimale correspond à $n = 11^{\text{eme}}$ inspection

pour $N = 300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ // // // $n = 5^{\text{eme}}$ inspection

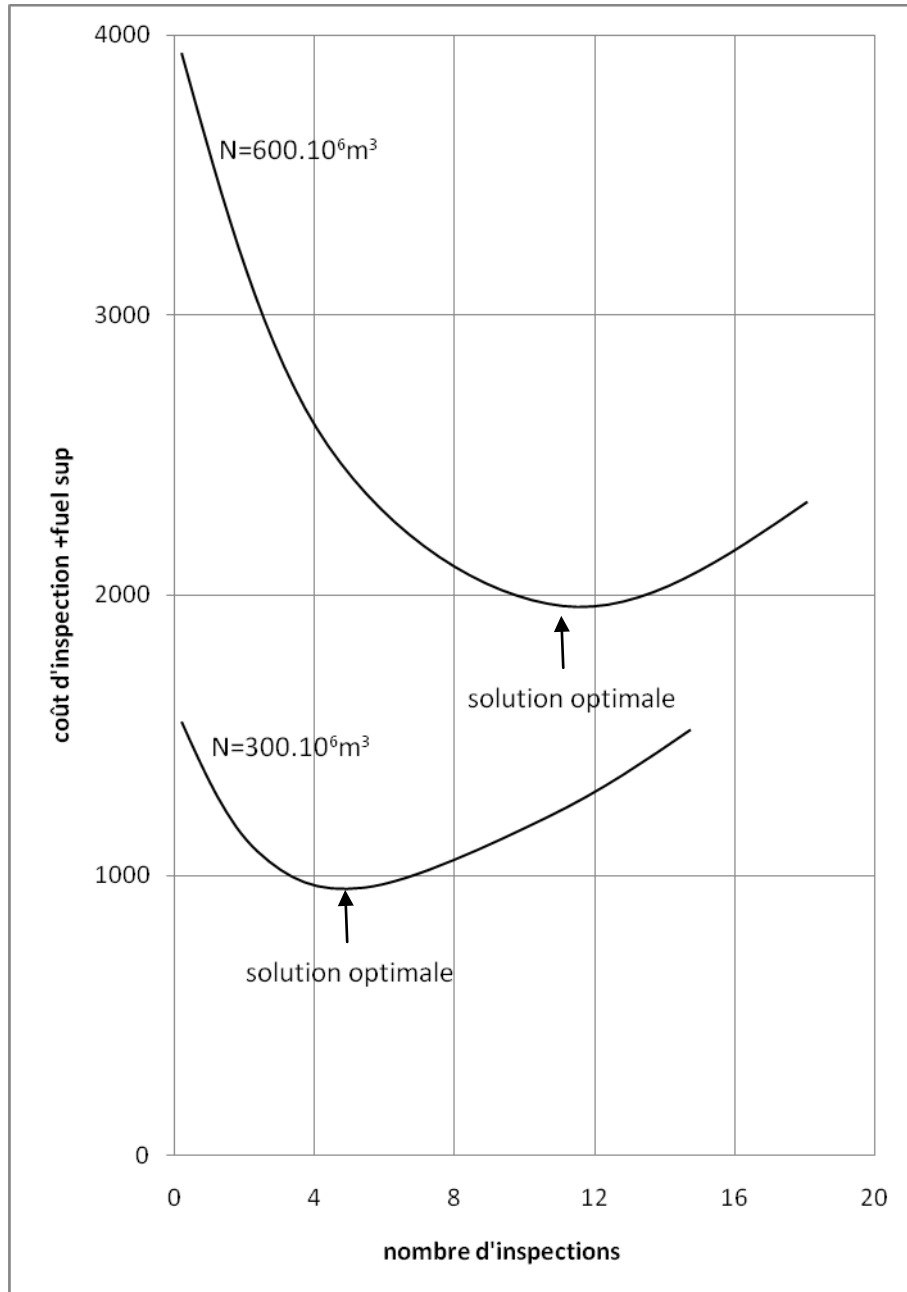


Figure 1.6 graphes des coûts d'inspection plus combustible supplémentaire

Conclusion

Nous avons développé un modèle qui permet de déterminer la politique d'intervention requise. Ce modèle est basé sur la minimalisation des coûts engendrée dans l'opération de nettoyage des réservoirs sur une échéance déterminée.

Le modèle traité est déterministe c'est-à-dire les conséquences de chaque action sont connues exactement.

La fonction objectif est de minimiser la somme des coûts d'intervention plus les coûts du combustible supplémentaire causé par l'accumulation des dépôts de matière résiduelle sur le fond du réservoir.

Les résultats de cette étude montre que la procédure de nettoyage est fonction de la quantité de matière produite, notre modèle est exécuté pour deux valeurs seulement (mini et maxi) Les résultats peuvent être améliorés en ajustant la fonction $L(m)$ par rapport à chaque étape m .

L'étape ultime sera d'étudier l'extension de cette approche à des modèles, prenant en compte notamment un remplacement à long terme et un intervalle d'inspection variable, nous pourrions envisager le cas du modèle stochastique qui est la suite logique à ce travail.

CHAPITRE 2

Modélisation de Maintenance Préventive

INTRODUCTION

La plupart des études sur les systèmes de production considèrent que ceux-ci sont disponibles en permanence pour produire et satisfaire la demande. Dans la réalité industrielle, les systèmes de production passent par des périodes d'indisponibilité qui peuvent être dues, entre autres, à des opérations de maintenance préventives ou correctives, ou à des opérations de sous-

traitance pour satisfaire d'autres demandes. La question est de trouver l'issue comment réduire ces périodes d'indisponibilité sachant bien qu'on ne peut les éliminer totalement.

L'optimisation de la maintenance reste encore trop peu l'une des priorités et est toujours vue comme une source de dépenses incontournables que l'on doit chercher à justifier ou anticiper.

Dans la littérature, plusieurs stratégies de maintenance combinant des actions de type préventif et de type correctif ont été proposées et modélisées mathématiquement [25,26 et 32]. Une maintenance bien gérée permet de diminuer ces coûts en augmentant la fiabilité globale, et finalement se révèle être un centre de profit. Une politique de maintenance peut être défini comme un ensemble d'actions qui sont ordonnées et exécutées selon certaines stratégies. Même si elles peuvent causer une indisponibilité du système de production pendant certaines périodes, les actions de maintenance préventive (MP) s'avèrent absolument nécessaires pour diminuer la fréquence des pannes dont les conséquences humaines et économiques peuvent être très lourdes dans un contexte industriel.

L'objet de notre étude est la détermination d'instantaux de maintenance pour la minimisation d'un coût moyen de maintenance de décision permettant de définir un horizon d'exploitation d'un système, soumis à une maintenance préventive périodique, autrement dit déterminer les paramètres de la politique de maintenance préventive qui optimise plusieurs critères pour les deux politiques précitées.

Un intérêt particulier a été accordé à deux stratégies de maintenance préventive, celle de type âge (l'instant de l'action de MP dépend de l'âge du système) et celle de type bloc (l'instant de l'action de MP est connu à l'avance, il ne dépend ni de l'âge ni de l'état du système) [11]. On cher-

chera ainsi à caractériser son horizon de rentabilité économique en fonction de ses caractéristiques de vieillissement, des profits et des dépenses cumulés au cours du temps mais aussi en fonction de la stratégie de maintenance adoptée.

La justification du choix d'un tel critère repose sur le constat de pratiques usuelles des décideurs dans un contexte industriel.

En considérant deux modèles : Minimisation du coût et minimisation du temps d'arrêt. La fonction objectif recherchée est le cycle optimal de remplacement préventif. Ensuite on utilisera un second critère le calcul de la disponibilité des équipements qui est considéré plus important que le coût de réparation ou de maintenance. En effet les conséquences du temps d'arrêt d'un équipement peuvent dépasser n'importe quel coût mesurable.

Deux exemples mettront en évidence la démarche entreprise pour la modélisation de ces stratégies de maintenance

2.1 Stratégies de maintenance dans la littérature scientifique

2.1.1 Stratégies de maintenance préventive

Rappelons qu'une stratégie de maintenance vise à déterminer les périodes de maintenance de même que le type d'action à entreprendre afin d'augmenter la fiabilité du système global [39,46]. La panoplie de stratégie regroupe jusqu'à présent quatre de ces politiques : la stratégie bloc, la stratégie âge, la stratégie bloc modifiée et la stratégie opportuniste. Une cinquième stratégie est actuellement en cours d'intégration : la stratégie basée sur le risque. Ces différentes politiques considèrent des remplacements par des éléments neufs ou usagés.

Nous avons choisi de détailler quatre stratégies classiques. Dans chacune de ces stratégies, chaque remplacement préventif coûte C_p et a une durée

T_p . Si une défaillance est détectée, le composant est remplacé à un coût C_f et la durée du remplacement est de T_f .

Pour modéliser les différentes stratégies, un graphe d'état représentant les différents états possibles des composants et les événements que peuvent subir ces composants dans le cas de la stratégie considérée. Ces graphes sont présentés par les figures 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 [28]

2.1.1.1 Stratégie bloc (BRP)

La stratégie bloc (Bloc Replacement Policy), proposée en 1979 [33], induit un remplacement périodique des composants d'un système. Suivant cette stratégie, un composant est changé au coût C_f en cas de panne, et au coût C_p préventivement toutes les T_p périodes fixées (ce quel que soit le temps de fonctionnement du composant).

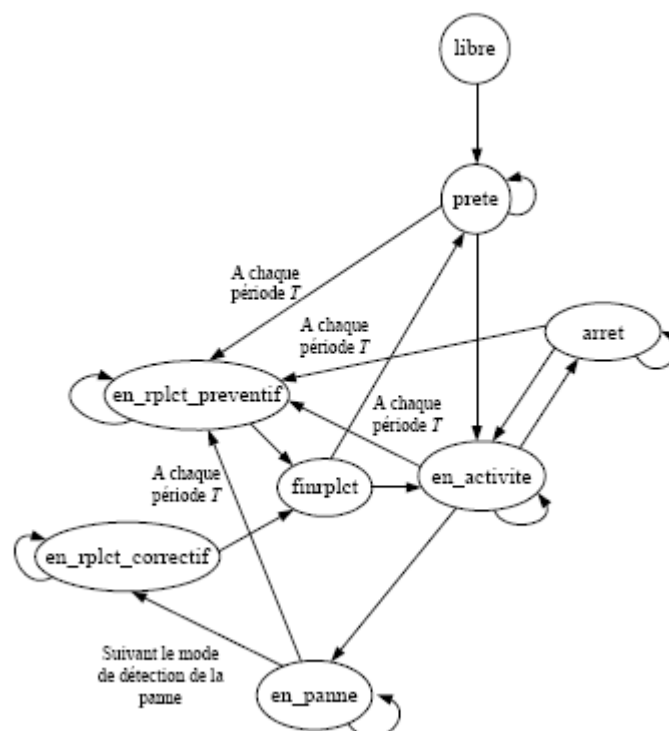


Figure 2.1 Modélisation stratégie bloc [28]

Cette politique comporte un seul paramètre à fixer (T), et son principal inconvénient est de ne pas tenir compte de l'âge des composants, autorisant de la sorte le remplacement d'éléments peu usagés.

2.1.1.2 Stratégie âge (ARP)

La politique de remplacement de type âge (Age Replacement Policy), introduite en 1965 [12] propose de remplacer un élément non opérationnel (en panne) au coût C_f , et de remplacer préventivement tout composant après T unités de temps de fonctionnement sans panne au coût C_p .

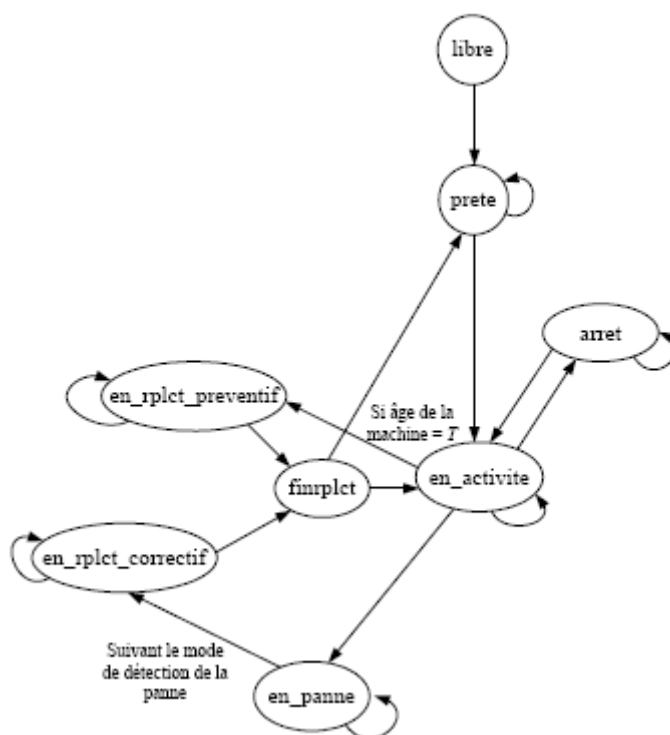


Figure 2.2 Modélisation stratégie âge [28]

Cette stratégie évite de remplacer un composant presque neuf (car il faut qu'il atteigne l'âge T pour être remplacé). Par contre, il est nécessaire de connaître le temps de fonctionnement du composant.

2.1.1.3 Stratégie de Remplacement Préventif de Bloc Modifié

La stratégie de type bloc modifié (Modified Bloc Replacement Policy) est une extension de la stratégie bloc définie plus haut. En effet, les remplacements préventifs se font également à des périodes T fixées, mais uniquement si le composant considéré a atteint une certaine limite d'âge constante b . De cette manière, on contourne le problème de la stratégie bloc BRP en évitant le remplacement d'éléments quasiment neufs. Tout comme la stratégie âge, la politique MBRP requiert la connaissance de l'âge des composants. L'application de celle-ci implique la détermination de deux paramètres : la période de remplacement T et le seuil d'âge b .

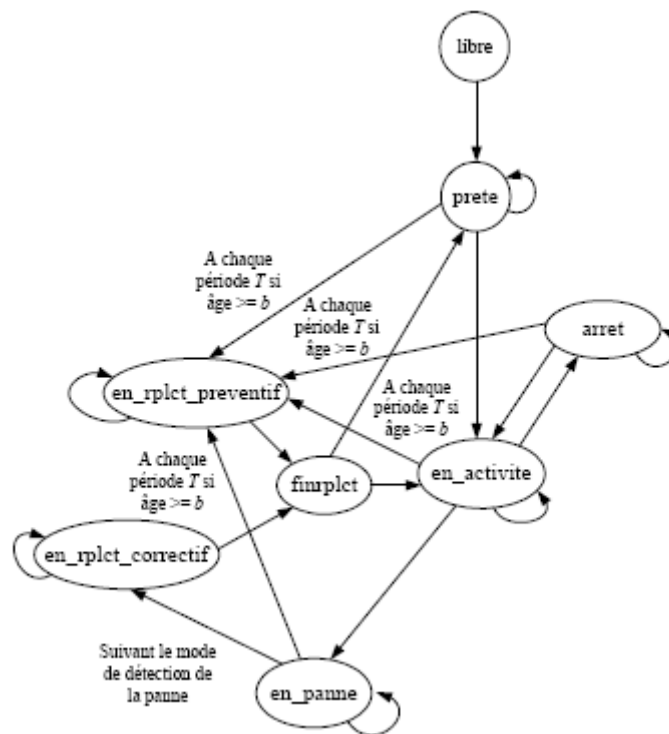


Figure 2.3 Modélisation de bloc modifié [28]

2.1.1.4 - Stratégie opportuniste

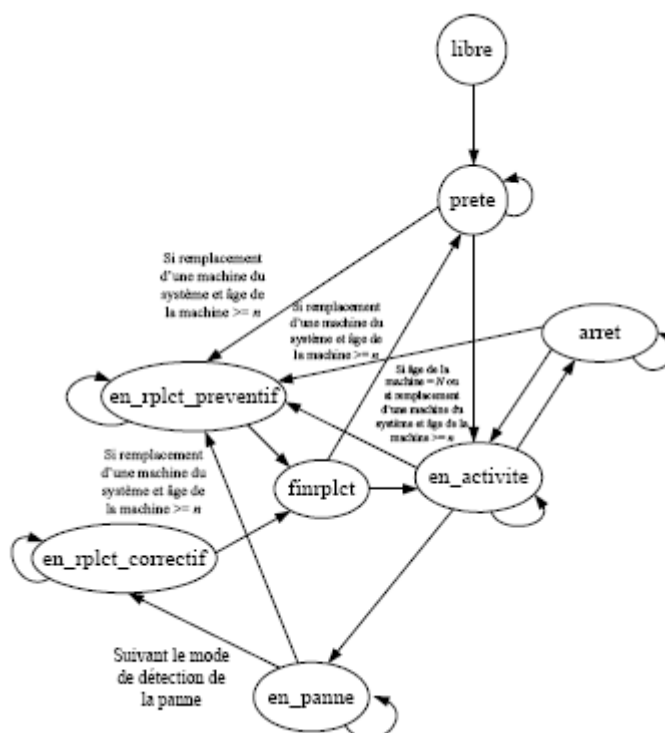


Figure 2.4 Modélisation de type opportuniste [28]

Cette stratégie, contrairement aux trois politiques précédentes, la stratégie opportuniste va prendre en compte les interactions entre les différents composants d'un système.

Un élément subit une maintenance préventive lorsqu'il a fonctionné durant N unités de temps (conformément à la stratégie âge). Mais il peut également subir un tel remplacement préventif si l'on doit procéder au changement (préventif ou correctif) d'un autre composant du système et que son âge est supérieur à $n < N$ unités de temps de fonctionnement. La politique de maintenance opportuniste est avantageuse quand il existe une économie d'échelle, c'est à dire lorsque le coût d'une maintenance groupée est inférieur à la somme des coûts des actions de maintenance séparées pour le critère coût par unité de temps ou lorsqu'il est possible de réaliser plusieurs remplacements à la fois pour le critère disponibilité.

2.2 Hypothèses :

La fonction principale de la maintenance préventive, du remplacement et de l'inspection est le contrôle des conditions des équipements et d'assurer leur disponibilité. Cela nécessite les points suivants :

- Fréquence de la maintenance préventive, remplacement et inspection
- Taille de l'équipage de maintenance
- Nombre et type de machines disponible en atelier de maintenance
- Règles de remplacement des composants
- Influence du changement technologique sur les décisions de remplacement
- Niveau inventaire optimum des pièces de rechange
- Règles de séquence et programme pour le travail de maintenance

2.3 Modèle : Minimisation du coût

Ces actions de maintenance sont exécutées sur des systèmes utilisant des réparations minimales ou des remplacements de tous les composants du système ou du système entier.

Avant de présenter les modèles analytiques de MPR, il est important de noter que plusieurs sinon tout les modèles disponibles supposent les hypothèses suivantes :

- * Le cout total lié au remplacement dû à une défaillance est plus grand que celui lié aux actions de maintenance préventive (PM), en d'autres termes le coût de réparation du système après sa défaillance est plus grand que le coût de maintien du système avant sa défaillance.
- * La fonction du taux de défaillance du système est proportionnelle au temps. Il est clair que si le taux de défaillance décroît avec le temps alors le système probablement est entrain de s'améliorer dans le temps et toute action de maintenance préventive ou réparation est considérée

comme gaspillage de ressource. De même si un équipement ou un système a un taux de défaillance constant alors toute action de MP ou de remplacement s'avère une perte. Cela peut être attribué au fait que si le taux de défaillance est constant, remplacer l'équipement avant la défaillance cela n'affecte pas la probabilité que l'équipement sera défaillant l'instant qui suit [23].

- * Les réparations minimales ne font pas changer le taux de défaillance du système bien qu'un composant peut être remplacé par un neuf, la complexité du système et le nombre très grand de composants ont un effet négligeable ou inexistant pour un tel remplacement.

2.3.1 Politique de remplacement à intervalle constant (CIRP)

(constant interval replacement policy)

Dans ce cas, deux types d'actions sont développés :

- Le premier type est le remplacement qui se produit à intervalle constant. Les composants ou éléments sont remplacés à temps prédéterminé sans se soucier de l'âge du composant ou de la partie remplacée.
- Le second type d'action est le remplacement où les composants ou les parties sont remplacées après défaillance cette politique est illustrée dans la fig 2.5.

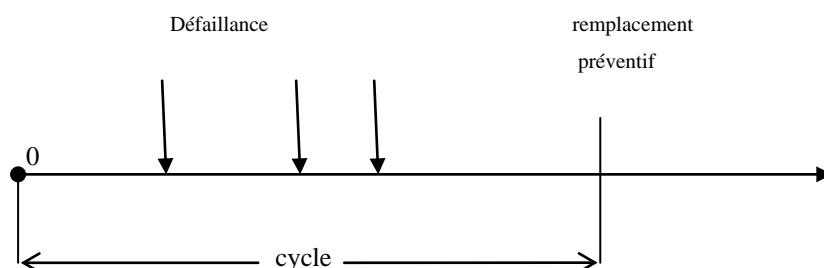


Figure 2.5 *politique de remplacement à intervalle constant*

le critère le plus largement utilisé est le coût total de remplacement espéré par unité de temps.

Cela peut être accompli par le développement de la fonction du coût total espéré comme suit

$$c(t_p) = \frac{\text{coût total espéré dans } [0, t_p]}{\text{longueur de l'intervalle espéré}} \quad (2.1)$$

Le numérateur :

$\Sigma(\text{coût de défaillance} + \text{coût de remplacement préventif})$ durant l'intervalle $[0, t_p]$ un remplacement préventif est effectué à un coût c_p et des remplacements de défaillance à un coût c_f chacun, où $M(t_p)$ est le nombre de remplacement espéré (renouvellement) durant $[0, t_p]$ la longueur de l'intervalle espéré est t_p

l'équation (2.1) peut être écrite comme suit :

$$c(t_p) = \frac{c_p + c_f M(t_p)}{t_p} \quad (2.2)$$

2.3.2 Remplacement à âge prédéterminé (PRPA)

(preventive replacement at predetermined age)

Dans ce cas les unités sont remplacées après défaillance ou à âge t_p lequel de ces deux phénomènes se produira le premier.

Si la part des coûts d'opération est indépendante du temps le coût /u. temps

$$c(t_p) = \frac{\text{coût total de remplacement espéré /cycle}}{\text{longueur de cycle espéré}} \quad (2.3)$$

Il y a deux cycles possibles d'opération :

- Le premier est quand l'équipement atteint son âge de remplacement préventif planifié t_p
- Le second est quand l'équipement tombe en panne avant cet âge

Nous utilisons le modèle de Jardine et Buzacott [23].

*Numérateur : coût de remplacement préventif \times probabilité que l'équipement survie jusqu'à l'âge de remplacement planifié + coût de remplacement de défaillance \times prob de défaillance de l'équipement avant t_p

$$= c_p R(t_p) + c_f [1 - R(t_p)] \quad (2.4)$$

Analoguement

*dénominateur : longueur du cycle préventif \times prob de cycle préventif + longueur attendue de cycle de défaillance \times probabilité de cycle de défaillance

$$= t_p R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t \cdot f(t) dt \quad (2.5)$$

Le coût

$$c(t_p) = \frac{c_p R(t_p) + c_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t \cdot f(t) dt} \quad (2.6)$$

Nous devons déterminer la valeur de t_p qui minimise l'équation (2.6) en optimisant la valeur de la longueur du cycle de remplacement préventif. Cela peut être effectué par la dérivée partielle de (2.6)

$$\frac{\partial c(t_p)}{\partial t_p} = \frac{[-c_p f(t_p) + c_f f(t_p)] \int_0^{t_p} R(t) dt - [c_p R(t_p) + c_f F(t_p)] R(t_p)}{[\int_0^{t_p} R(t) dt]^2} = 0$$

Le cycle optimal de remplacement préventif t_p^* est obtenu par

$$f(t_p^*) [c_f - c_p] \int_0^{t_p^*} R(t) dt = [c_p R(t_p^*) + c_f F(t_p^*)] R(t_p^*) \quad (2.7)$$

$$\frac{f(t_p^*)}{R(t_p^*)} \int_0^{t_p^*} R(t) dt = \frac{1}{c_f - c_p} [c_p R(t_p^*) + c_p F(t_p^*) + c_f F(t_p^*) - c_p F(t_p^*)]$$

$$h(t_p^*) \int_0^{t_p^*} R(t) dt = \frac{1}{c_f - c_p} [c_p + (c_f - c_p) F(t_p^*)] \quad (2.8)$$

Où

$$h(t_p^*) \int_0^{t_p^*} R(t) dt = \frac{c_p}{c_f - c_p} + F(t_p^*) \quad (2.9)$$

le second terme du dénominateur est obtenu comme suit

$$\int_{-\infty}^{t_p} t(f(t)) dt = \int_{-\infty}^{t_p} \frac{t}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (2.10)$$

$$= \frac{-\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] + \mu \phi \left(\frac{t_p - \mu}{\sigma} \right)$$

Or

$$\int_{-\infty}^{t_p} t(f(t)) dt = -\sigma \Psi \left(\frac{t_p - \mu}{\sigma} \right) + \mu \phi \left(\frac{t_p - \mu}{\sigma} \right)$$

Où

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-t^2}{2} \right] \quad \text{et} \quad \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[\frac{-t^2}{2} \right] \quad (2.11)$$

En utilisant la fonction centrée réduite de la loi Gaussienne N(0,1) tabulée

2.4 Modèle : minimisation du temps d'arrêt

La disponibilité d'un équipement est un indicateur très significatif et très utilisé du fait des conséquences qui en découlent par rapport aux autres critères [36,41].

2.4.1 Politique de remplacement à intervalle constant

C'est la politique de remplacement et de maintenance préventive la plus simple c'est identique à celle discutée précédemment à l'exception que l'objectif est de minimiser le temps d'arrêt total par unité de temps autrement dit c'est minimiser l'indisponibilité de l'équipement.

Dans cette politique les remplacements sont effectués à durée prédéterminée sans se soucier de l'âge de l'équipement

$$D(t_p) = \frac{\text{temps d'arrêt total}}{\text{longueur du cycle}} \quad (2.12)$$

*Numérateur : temps d'arrêt de la défaillance + temps d'arrêt dû au remplacement préventif

= nombre attendu de défaillance dans $[0, t_p] \times$ temps de remplacement de défaillance + T_p

Or

$$\text{Temps d'arrêt total} = M(t_p)T_f + T_p$$

T_f : temps de remplacement correctif

T_p : temps de remplacement préventif et

$M(t_p)$: nombre attendu de défaillance dans $[0, t_p]$.

La longueur du cycle est la somme des temps de maintenance préventive et la longueur du cycle de remplacement préventif = $T_p + t_p$.

D'ou

$$D(t_p) = \frac{M(t_p)T_f + T_p}{T_p + t_p} \quad (2.13)$$

2.4.2 Remplacement préventif à âge prédéterminé

Dans cette politique les remplacements préventifs sont exécutés suite à une défaillance de l'équipement ou quand l'équipement atteint l'âge t_p .

Notre objectif est la détermination de l'âge de remplacement préventif optimal qui minimise le temps d'arrêt par unité de temps :

$$D(t_p) = \frac{\text{temps d'arrêt total espéré|cycle}}{\text{longueur du cycle attendu}} \quad (2.14)$$

*Numérateur : \sum (temps d'arrêt du au remplacement préventif \times probabilité de remplacement préventif + le temps d'arrêt du au cycle de défaillance \times probabilité du cycle de défaillance)

$$T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)] \quad (2.15)$$

Analogue ment

*Dénominateur :

$$(t_p + T_p)R(t_p) + \left[\int_{-\infty}^{t_p} tf(t)dt + T_f \right] [1 - R(t_p)] \quad (2.16)$$

Cependant,

$$D(t_p) = \frac{T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p)R(t_p) + \left[\int_{-\infty}^{t_p} tf(t)dt + T_f \right] [1 - R(t_p)]} \quad (2.17)$$

Il est important de souligner que les conditions des modèles de minimisation du cout sont aussi applicables aux modèles de minimisation du temps d'arrêt. Souvent on remplace les contraintes de coût par celles de temps de remplacement- le temps de remplacement correctif est plus grand que celui préventif $T_f > T_p$.

2.5 Paramètres d'optimisation des stratégies

Les stratégies de maintenance préventive présentées nécessitent la détermination de paramètres, c'est à dire :

- la période de remplacement préventif T pour la stratégie âge et la stratégie bloc
- la période de remplacement préventif T et le seuil b pour la stratégie MBRP
- la période de remplacement préventif N et la variable n pour la stratégie opportuniste

Il existe des valeurs pour ces paramètres minimisant le coût par unité de temps de la maintenance ou maximisant la disponibilité du système. Ces

valeurs sont considérées comme optimales et doivent être déterminées à l'aide de méthodes d'optimisation.

2.6 Application numérique

En premier lieu on caractérise chaque composant du système par :

- la distribution de la loi de fiabilité (exponentielle, normale, uniforme ou Weibull)
- la distribution de la loi associée au temps de réparation préventive et corrective (normale ou constante)
- les coûts de l'intervention de maintenance préventive (C_p) et corrective (C_f) ($C_f > C_p$)

Les systèmes que nous modéliserons peuvent être décrits de façon hiérarchique par un ensemble de paramètres et de variables liés à la fois au système et à ses composants.

Les paramètres du système sont résumés comme suit :

- un identifiant
- la configuration du système (série, parallèle ou hybride)
- le temps de début des arrêts
- la durée des arrêts

Les paramètres des composants sont résumés comme suit :

- un identifiant
- l'état du composant : libre, prêt, en fin de remplacement, en activité, en remplacement préventif, en remplacement correctif, en panne, arrêt
- une variable fonctionnement qui permet de savoir si le composant est en fonctionnement ou pas
- la stratégie de maintenance et ses différents paramètres

- le temps de fonctionnement du composant (remis à zéro à chaque remplacement)
- le nombre de remplacement préventif et correctif
- le coût unitaire et total des remplacements préventifs et correctifs
- le temps de début des arrêts, la durée des arrêts

2.6.1 Exemple1 : comparaison des stratégies

Pour illustrer la pertinence de l'approche du modèle, nous considérons le système simple décrit par la figure 2.6 comportant deux éléments en série.



Figure 2.6 système composé de deux composants en série

Les paramètres des composants 1 et 2 sont résumés comme suit. Les lois de fiabilité utilisées sont des lois classiquement rencontrées en maintenance, et qui peuvent être obtenues à partir d'un historique des temps de panne des composants.

*Données de départ des composants 1 et 2

COMPOSANT 1 :

Loi de fiabilité : weibull à deux paramètres $\eta = 2$; $\beta = 5$

Temps du préventif = 1

Coût du préventif = 100

Coût du correctif = 500

Temps du correctif = 3

COMPOSANT 2

Loi de fiabilité : normale $\mu = 10$; $\sigma = 2$

Temps du préventif = 1

Coût du préventif = 100

Coût du correctif = 500

Temps du correctif = 3

Nous essayons d'obtenir les paramètres optimaux des quatre stratégies décrites plus haut, nous allons à chaque fois optimisé le coût et la disponibilité. Les résultats de calcul sont représentés au tableau 2.1, auquel on a ajouté les résultats de la maintenance corrective. Le tableau est divisé en deux parties, La première colonne représente les paramètres optimaux pour le critère minimisation coût, la deuxième les paramètres optimaux pour le critère maximisation disponibilité.

Tab 2.1 *paramètres optimaux des stratégies*

	Minimisation coût			Maximisation disponibilité		
	T de remplacement préventif	Coût	D(t)	T de remplacement préventif	Coût	D(t)
Maintenance Corrective	-----	78.53	0.52	-----	79.54	0.51
Age (PRA)	T1=1.98 T2=5.49	61.59	0.56	T1=4.02 T2=7.10	55.66	0.58
Bloc(PRIC)	T1=2.90 T2=9.56	64.67	0.58	T1=4.0 T2=8.0	59.95	0.63
Bloc modifié	T1=2.45 /B1=0.67 T2=9.47/B2=2.66	64.36	0.57	T1=4.0/b1=0.2 T2=8.0/b2=0.0	59.94	0.64
Opportuniste	N1=2.43/n1=2.27 N2=5.65 /n2=5.38	58.61	0.56	T1=4.02/n1=0.64 T2=8.11/n2=1.2	68.84	0.66

D'après les graphiques suivants on peut comparer les différentes stratégies et tirer les conclusions qui en découlent

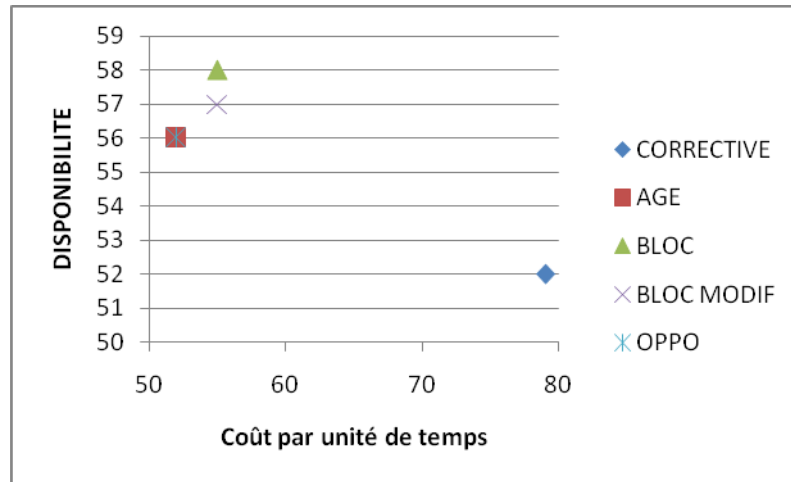


Figure 2.7 stratégies d'après le critère coût

Et d'après le critère disponibilité les stratégies se manifestent comme suit

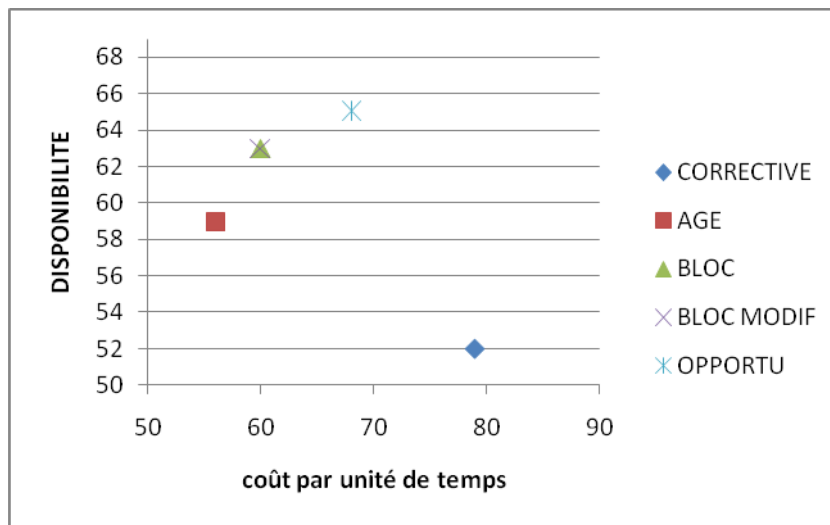


Figure 2.8 stratégies d'après le critère disponibilité

2.6.2 Resultats et discussion

Les graphiques des figures 2.7 et 2.8 permettent de comparer les différentes stratégies, et on peut en tirer les conclusions suivantes :

- Les stratégies de maintenance préventive permettent au mieux de diminuer le coût ou d'augmenter la disponibilité. Les résultats de la mainte-

nance corrective sont nettement inférieurs aux résultats des quatre stratégies de maintenance préventive.

- La stratégie donnant le coût minimum est la stratégie Age. Ce gain de coût se fait en détriment de la disponibilité puisque celle-ci est la moins élevée de toutes les stratégies préventives. Les paramètres optimaux de la stratégie Opportuniste sont les mêmes paramètres optimaux que la stratégie Age, avec $N=n$ ce qui revient à appliquer la stratégie âge.
- La stratégie donnant la disponibilité maximum est la stratégie Opportuniste. Ce gain de disponibilité se fait en détriment du coût puisque celui-ci est le plus élevé de toutes les stratégies préventives.
- La stratégie Bloc modifié n'a pas permis d'améliorer de manière prépondérante la stratégie bloc.
- Entre les deux solutions permettant de minimiser le coût et de maximiser la disponibilité, il existe un ensemble de solutions réalisant un compromis entre les deux critères. Le gestionnaire peut donc à partir d'un outil d'aide à la décision choisir la stratégie convenant le mieux à ses besoins.

2.6.3 Exemple2 : Détermination de l'intervalle optimal de remplacement

Nous avons choisis des machines tournantes pour pouvoir appliquer d'une manière plus explicite les deux premières politiques de maintenance et de remplacement notamment : La stratégie âge et celle bloc. Ce choix est fait pour deux raisons : La première est que dans toute industrie précitée en l'occurrence les réservoirs agités sont entraînés par ce type de machines.

La seconde est que pour l'industrie environnante et plus particulièrement au niveau du service de maintenance de Arcelor ce type de machines (alternateurs, moteurs asynchrones turbines ... etc) représentent le plus grand volume de travail et un engagement est tenu dans le cadre de la coopération

entre le secteur industriel et l'université et est pris en charge par nos étudiants et enseignants.

L'arbre de la turbine tournant à grande vitesse s'use selon la distribution normale de moyenne 1.000.000 de cycles et d'un écart type de 100.000 cycles.

Nous estimons que le coût de remplacement préventif pour tout l'atelier est $C_p = 50\text{KDA}$ et celui de défaillance est de l'ordre de $C_f = 100\text{KDA}$, Supposons que le remplacement préventif s'effectue à intervalle de temps discret équivalent à 100.000 cycles par intervalle $[0, t_p]$, et posant 100000 cycles comme l'unité de l'intervalle la solution du problème requiert la résolution des équations (2.2) et (2.6) respectivement pour la stratégie âge et stratégie bloc, ensuite viennent les différentes étapes du développement de la méthode.

$$M(0) = 0$$

$$M(1) = [1 + M(0)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left[\frac{-(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$M(1) = [1 + M(0)]\Phi(1-10) = [1 + 0]0 = 0$$

Ou

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left[\frac{-t^2}{2}\right] dt$$

Analoguement

$$M(2) = 0,$$

$$M(3) = 0,$$

$$M(4) = 0,$$

$$M(5) = 0,$$

$$M(6) = 0$$

$$M(7) = [1 + M(6)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(5)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^2 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(4)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_2^3 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(3)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_3^4 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(2)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_4^5 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(1)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_5^6 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$+[1 + M(0)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_6^7 \exp\left[-\frac{(t-10)^2}{2}\right] dt$$

$$M(7) = [1 + 0][\Phi(-3) - \Phi(-4)] = 0.0014$$

$$M(8) = 0.00275$$

$$M(9) = 0.15875$$

$$M(10) = 0.50005$$

$$M(11) = 0.84135$$

En substituant les résultats de calcul dans la formule (2.13)

Dans le tableau suivant sont récapitulés les résultats de calcul de l'intervalle préventif optimal.

D'après le tableau 2.2, le minimum du coût par cycle correspond à 800.000 cycles.

Cependant, la longueur de remplacement préventif optimal est équivalente à 800.000 cycles

Tab 2.2 Calcul de l'intervalle préventif optimal

Intervalle t_p	$M(t_p)$	$C(t_p)$
100,000	0	0.000500
200.000	0	0.000250
300.000	0	0.000166
400.000	0	0.000125
500.000	0	0.000100
600 .000	0	0.000083
700.000	0.0014	0.000072
800.000	0.00275	0.000063←
900.000	0.15875	0.000073
1.000.000	0.50005	0.000100
1.100.000	0.84135	0.001219

← indique le coût minimum

*pour la politique de remplacement à âge prédéterminé :

Dans ce cas

$$R(t_p) = 1 - \int_{-\infty}^{t_p} f(t)dt = \int_{t_p}^{\infty} f(t)dt \quad (2.18)$$

Or

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_p}^{\infty} \exp \left[\frac{-(t-10)^2}{2} \right] dt \quad (2.19)$$

Les résultats de calcul pour les différentes valeurs de t_p sont montrés dans le tableau 2.3. L'intervalle de remplacement préventif optimal pour l'âge de remplacement est de 800.000 cycles.

Tab 2.3 Politique de remplacement à âge optimal

t_p	$R(t_p)$	$\Psi = \left(\frac{t_p - \mu}{\sigma} \right)$	$\Phi = \left(\frac{t_p - \mu}{\sigma} \right)$	$c(t_p)$ par cycle
100.000	1.00	0	0	0.000500
200.000	1.00	0	0	0.000250
300.000	1.00	0	0	0.000166
400.000	1.00	0	0	0.000125
500.000	1.00	0	0	0.000100
600.000	1.00	0	0	0.000083
700.000	0.9987	0.004	0.0013	0.000072
800.000	0.9773	0.054	0.0227	0.000064 ←
900.000	0.8413	0.242	0.1587	0.000065
1.000.000	0.5000	0.398	0.5000	0.000160
1.100.000	0.1587	0.242	0.8413	0.000090

← indique le coût minimum

2.6.4 Résultats et discussion

Les résultats de cette politique sont identiques à ceux de la politique précédente. Cela est dû au fait que le temps est incrémenté de 100.000 cycles. Un incrément plus petit mènera sans doute à une différence significative entre les deux politiques de maintenance.

*Modèle : minimisation du temps d'arrêt

Pour le même exemple et pour les mêmes politiques de maintenance mais en utilisant un autre critère, nous allons essayer d'exécuter les mêmes calculs pour pouvoir les comparer. L'objectif est de minimiser le temps d'arrêt total par unité de temps c'est dire minimiser l'indisponibilité de l'équipement

$$T_f = 50.000 \text{ cycles} \quad T_p = 25.000 \text{ cycles}$$

Nous devons calculer :

$$M(t_p), \int_{-\infty}^{t_p} f(t)dt \text{ et } R(t_p)$$

a) Politique de remplacement à intervalle constant

Pour CIRP nous substituons les paramètres connus dans (2.20)

$$D_{pric}(t_p) = \frac{25.000[1+2M(t_p)]}{25.000+t_p} \quad (2.20)$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau 2.4 pour les fonctions suivantes :

$$M(t_p), \int_{-\infty}^{t_p} f(t)dt \text{ et } R(t_p)$$

Tab 2.4 fonctions $M(t_p)$, $\int_{-\infty}^{t_p} f(t)dt$ et $R(t_p)$

t_p	$M(t_p)$	$R(t_p)$	$1 - R(t_p)$	$\Psi(t_p)$	$\Phi(t_p)$	$\int_{-\infty}^{t_p} tf(t)dt$
100.000	0	1.00	0	0	0	0
200.000	0	1.00	0	0	0	0
300.000	0	1.00	0	0	0	0
400.000	0	1.00	0	0	0	0
500.000	0	1.00	0	0	0	0
600.000	0	1.00	0	0	0	0
700.000	0.0014	0.9987	0.0013	0.004	0.0013	900
800.000	0.00275	0.9773	0.0227	0.054	0.0227	17300
900.000	0.15875	0.8413	0.1587	0.242	0.1587	134500
1.000.000	0.50005	0.5000	0.5000	0.398	0.5000	460110
1.100.000	0.84135	0.1587	0.8413	0.242	0.8413	817100

b) Politique de remplacement à âge prédéterminé

Pour la PRA le temps d'arrêt par cycle est obtenu en utilisant :

$$D_{PRA}(t) = \frac{25.000[2-R(t_p)]}{(25.000+t_p)R(t_p)+[\int_{-\infty}^{t_p} tf(t)dt+50.000][1-R(t_p)]} \quad (2.21)$$

Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau suivant (Tab 2.5).

Pour ce deuxième critère de disponibilité et pour les deux politiques de maintenance :

Politique de remplacement à intervalle constant (CIRP) et politique de remplacement âge (PRPA) Les résultats aboutissent au même intervalle optimal de remplacement préventif.

Tab 2.5 Disponibilités $D(t_p)$

tp	$D_{PRIC}(t_p)$	$D_{PRA}(t_p)$
100.000	0.2000	0.2000
200.000	0.1111	0.1111
300.000	0.0769	0.0769
400.000	0.0588	0.0588
500.000	0.0476	0.0476
600.000	0.0400	0.0400
700.000	0.0346	0.0346
800.000	0.0305←	0.0316←
900.000	0.0356	0.0362
1.000.000	0.0488	0.0505
1.100.000	0.0596	0.0532

← indique le minimum de temps d'arrêt

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthode de modélisation et d'optimisation des stratégies de maintenance pour des configurations de systèmes plus ou moins complexes, simple à utiliser, ne nécessitant pas de

connaissances particulières et ce quelle que soit la complexité du système considéré.

Les deux critères celui de minimisation du coût et maximisation de la disponibilité engendrent bien des valeurs optimales de ces paramètres.

Nous avons choisis de faire deux applications pour d'une part mettre en œuvre ces deux modèles et d'autre part expliquer la démarche de résolution de ce problème.

Dans le premier cas on peut comparer les quatre stratégies en utilisant délibérément ces deux critères, d'autres indicateurs de performance peuvent être appliqués comme la disponibilité des composants, le coût de préventif total ou des composants etc....

Dans le deuxième cas un objectif précis est défini celui de la détermination de l'intervalle optimal de remplacement préventif mais l'étude détaillée se limite dans ce cas à deux stratégies les plus couramment utilisées : stratégie âge et celle de bloc d'après deux critères, minimisation du coût et maximisation de la disponibilité ou minimisation du temps d'arrêt.

Cela nous a permis de tirer les enseignements suivants :

La stratégie maintenance corrective a des résultats nettement inférieurs à ceux des stratégies de maintenance préventive.

Les politiques de maintenance préventive permettent au mieux d'améliorer les paramètres selon le critère choisi.

Les résultats relatifs au premier exemple permettant de minimiser le coût ou de maximiser la disponibilité. Donc il existe bien un ensemble de solutions en combinant les deux critères, ce qui offre au gestionnaire un large champ d'action de choisir les paramètres et stratégies selon ses convenances.

CHAPITRE 3

Optimisation de stratégie de maintenance par l'analyse de Markov

INTRODUCTION

L'activité de maintenance est, on le sait, source de beaucoup de dépenses mais peut également générer un certain nombre de profits pour peu que les stratégies mises en place aient été correctement réfléchies.

Par la prise de conscience croissante des industriels, la maintenance est passée progressivement du statut d'un mal nécessaire à celui d'une source de productivité. La maintenance est en effet un centre de production de la disponibilité. Si elle est bien gérée, elle permet d'améliorer la fiabilité de l'outil de production et donc d'augmenter sa disponibilité et sa capacité de production.

Les stratégies de maintenance envisagent les attitudes suivantes: attendre la défaillance du système avant d'intervenir pour le réparer (maintenance corrective) ou anticiper l'arrêt du système (maintenance préventive) pour ne pas subir les pannes. Dans les deux cas de figure, le gestionnaire doit supporter des coûts liés à l'arrêt de l'outil de production, et des coûts directs liés aux interventions réalisées sur le système et ce, pour assurer un niveau élevé de disponibilité de son équipement. Une stratégie de maintenance optimale consiste à trouver le compromis entre ces deux attitudes qui maximise la satisfaction du gestionnaire tenant compte du comportement dynamique du système, de ses caractéristiques de fiabilité et des contraintes économiques du gestionnaire.

Tout le monde s'accorde à dire aujourd'hui que la détermination du juste niveau de préventif est un facteur clé dans la rentabilité d'un système.

Dans le cadre de cette thèse, nous allons montrer comment la modélisation markovienne peut aider, pour une approche du problème, à définir ce ratio maintenance corrective / maintenance préventive par une formalisation simple du problème, posant les bases d'une étude d'optimisation sous contraintes technico-économiques.

Parmi tous les paramètres à envisager, celui correspondant au ratio maintenance corrective / maintenance préventive est particulièrement

important puisqu'il lie et conditionne à la fois l'organisation logistique du service de maintenance et le planning de production.

Les travaux rencontrés dans la littérature considèrent généralement des systèmes mono-composants ou des architectures séries ou parallèles. Les systèmes complexes hybrides sont peu étudiés. Le calcul fiabiliste de ce genre de systèmes se heurte à la complexité analytique liée à la manipulation, quand elles existent, de fonctions mathématiques caractérisant la fiabilité de chacun de ses composants.

Dans la résolution des problèmes de fiabilité et de disponibilité, on dispose en réalité des caractéristiques de fiabilité des composants issues de la conception et donc évaluées par le constructeur dans des conditions nominales de fonctionnement (fiabilité intrinsèque). Ces informations peuvent être enrichies par les données issues du comportement en production de ces composants via le suivi de leurs durées de vie réelles enregistrées dans le système d'information de l'entreprise (fiabilité opérationnelle). La question qui se pose alors est de savoir combiner ces deux types d'information pour mieux cerner la fiabilité de ces composants et donc, par agrégation, reconstruire la fiabilité du système complexe (fiabilité prévisionnelle).

Nous nous intéressons au développement d'approches de modélisation des stratégies de maintenance de systèmes multi-composants. Ces approches sont capables de renseigner sur le comportement dynamique et la fiabilité des systèmes à maintenir.

Une fois cette étape franchie, le gestionnaire s'intéresse à la façon de maintenir son équipement de manière à ce qu'il continue à remplir sa mission (une fonction donnée, pour une durée donnée et ce, dans un

environnement donné). Le système sera déclaré défaillant lorsque ses caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception ou s'il ne satisfait pas à une ou à plusieurs attentes du client.

Dans la première partie, nous proposons une approche, illustrative de la détermination à partir d'un modèle de Markov du domaine d'intérêt de la maintenance préventive. Plusieurs situations sont analysées. Nous lions ensuite dans la deuxième partie les processus de maintenance corrective et préventive par une relation directe au niveau du modèle. Nous utilisons cette dépendance pour optimiser l'intervalle d'inspection d'un équipement soumis à des interventions préventives parfaites.

3.1 Concepts généraux de modélisation

3.1.1 Chaîne de Markov

Il existe plusieurs techniques analytiques pour évaluer la fiabilité et la disponibilité des systèmes. Une des plus importantes qui domine ce problème et qui a reçue l'attention considérable et utilisée pendant des années passées est connue comme l'approche de Markov ou modèle de Markov [29] . Plusieurs textes excellents sont disponibles sur le sujet de l'application de la chaîne de Markov pour l'analyse de la fiabilité. Bien que ces techniques puissent être appliquées aux systèmes non-réparables et réparables, dans le deuxième cas ils supposent que le processus de la réparation est instantané ou négligeable par rapport au temps de fonctionnement. Le concept de base du modèle de Markov peut être illustré selon le schéma suivant

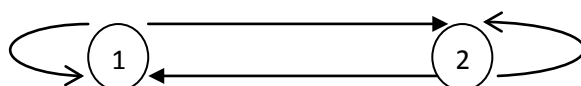


Figure 3.1 *diagramme de transition de Markov*

Dans ce cas deux états systèmes sont identifiables 1, 2 les probabilités de demeurer ou de passer d'un état à un autre en un temps donné sont montrés dans la figure 3.1 et leurs probabilités sont supposées constantes durant tout le temps.

C'est une chaîne de Markov discrète le système est stationnaire et le mouvement entre états se produit dans des états discrets.

La probabilité de passage d'un état à un autre est la même (stationnaire) à tout moment dans le passé et le future. Il est évident qu'à partir de ces deux aspects, l'absence de mémoire et être stationnaire, l'approche de Markov est applicable à tout système dont le comportement peut être décrit par une distribution de probabilité qui est caractérisée par un taux aléatoire constant, i.e., distribution de Poisson et exponentielle, si est seulement si, le taux aléatoire est constant ayant la probabilité de faire une transition entre deux états restant constant pendant tout le temps. Si cette probabilité est fonction de temps ou le nombre de pas est discrets, alors le processus est non stationnaire et désigné comme non Markovien.

Dans le cas général de modèles de Markov, temps et espace peuvent être discrets ou continus.

Dans le cas particulier de système d'évaluation de fiabilité, l'espace est normalement représenté seulement comme une fonction discrète à partir de cela sont représentés les états discrets et identifiables dans lesquels le système et ses composants peuvent y se trouver, alors que le temps peut être soit discret ou continu. Le cas discret est généralement connu comme chaîne de Markov et le cas continu comme processus de Markov. Les seules exigences dont on a besoin pour que la technique soit applicable il faut que le système soit stationnaire, le processus doit manquer de mémoire et les états du système doivent être identifiables [44].

Dans tout problème d'évaluation de fiabilité les conditions initiales ou de l'étape 0 sont connus et le problème d'évaluation de fiabilité s'oriente surtout vers le future.

Un système ou processus pour lequel les valeurs limites des probabilités d'état sont indépendants des conditions initiales est appelé [ergodique]. Si ce n'est pas le cas les états sont connus comme absorbants.

Bien que les probabilités des états stables de n'importe quel système sont indépendants des conditions initiales, le taux de convergence des valeurs des états limites peuvent dépendre des conditions initiales et dépendent d'avantage des probabilités de transition entre les états du système.

❖ Hypothèse

L'état (i) pendant lequel se trouve le système à un instant t ne dépend que des états ($i-1$) ou ($i+1$) le passage d'un état à l'autre se réalise suivant une loi exponentielle, le taux de défaillance (λ) est constant, le taux de réparation (μ) est constant

- l'espace des phases ou états possibles du système est discret (fini dans notre cas)
- les transitions d'un état à un autre peuvent se produire à n'importe quel instant
- la probabilité d'état ne dépend que du présent (propriété de Markov), elle est indépendante de la nature des états occupés antérieurement ainsi de la durée passée dans chacun de ces états.
- La probabilité de plus d'un changement d'état dans un intervalle de temps infiniment petit est indépendante de t et est négligeable

Nous désignons par :

- $P_i(t)$ = probabilité pour que le système se trouve dans l'état i à l'instant t

$$P_i(t) = P(X(t) = i) ; t \in \mathbb{R}^+ \text{ avec } 1 \leq i \leq n \quad (3.1)$$

- $Q_{ij}(t, t')$ = probabilité de transition de l'état i à l'état j entre t' et t

$$Q_{ij}(t, t') = P(X(t') = j | X(t) = i) ; t < t' \text{ et } 1 \leq i, j \leq n. \quad (3.2)$$

- $P_{ij}(t)$ – taux de transition de l'état i à l'état j

$$P_{ij}(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} Q_{ij}(t+h, t) \quad (3.3)$$

❖ Graphe de transition

Un système est composé d'un certain nombre d'éléments (n) et l'on dit que le système est dans l'état i s'il y a i éléments en fonctionnement. Dans l'état n si tous fonctionnent, dans l'état (0) si tous est en panne.

Un graphe de transition fait apparaître la possibilité de passage d'un état à un autre, (voir ci-après)

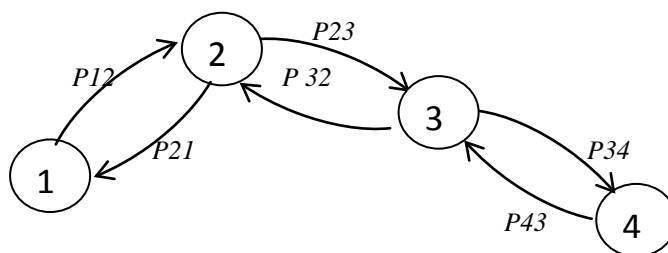


Figure 3.2 Graphe de transition

Ce système comprend trois éléments. Les probabilités de passage d'un état à un autre sont données par les p_{ij} .

Dans le cas de systèmes réparables, on constate que la probabilité de fonctionnement d'un système se stabilise vers une valeur constante au

cours du temps, cette valeur caractérise la disponibilité du système. C'est l'asymptote de la fonction de disponibilité $D(t)$ [42].

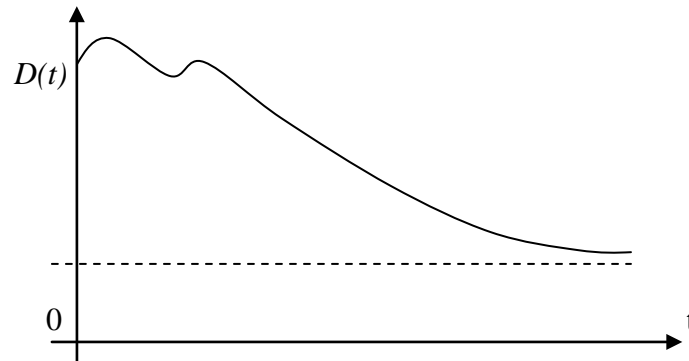


Figure 3.3 Fonction de disponibilité du système

La probabilité d'être dans l'état i à l'instant $(t+dt)$:

$$\begin{aligned}
 P(i \text{ à } t + dt) &= p(i+1, t) \cdot p(i+1, i) \cdot dt + p(i, t) (1 - p(i+1, i) \cdot dt) \cdot (1 - p(i-1, i) \cdot dt) + p(i-1, t) \cdot p(i-1, i) \cdot dt \\
 & \hspace{20em} (3.4)
 \end{aligned}$$

D'où

$$\begin{aligned}
 \frac{p(i, t + dt) - p(i, t)}{dt} &= p_{(i+1, t)} \cdot p(i+1, i) + p_{(i-1, t)} \cdot p(i-1, i) \\
 & \hspace{10em} - p_{(i, t)} \cdot (p(i-1, i) + p(i+1, i)) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

En faisant tendre dt vers 0 on obtient

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_{(i, t)}}{dt} &= p_{(i+1, t)} \cdot p(i+1, i) - p_{(i, t)} [p(i+1, i) + (p(i-1, i) + \\
 & \hspace{10em} + p(i-1, i))] \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

Pour un système on peut écrire :

$$\sum_{i=1}^{i=n} p(i, t) = 1 \quad (3.7)$$

Et on dérivant on trouve :

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{d}{dt} p(i, t) = 0 \quad (3.8)$$

Avec comme condition initiale pour $t = 0$,

$$p_{(n,0)} = 1 \quad \text{et} \quad p_{(i,0)} = 0 \quad (i \neq n)$$

3.2 Optimisation du Système

Le système étudié comporte plusieurs composants. La perte d'une fonction d'un composant est détectée immédiatement et provoque la défaillance de tout le système, ce dernier se mettra en marche dès que le composant défaillant est réparé. Le processus de vieillissement est modélisé par un taux de défaillance déterministe $\lambda(t)$ qui résume de manière générale l'interaction entre les différentes entités constituant le système.

Dans le cadre de la définition d'un schéma de maintenance [40], Nous proposons dans ce paragraphe quelques principes simples de traitement d'un modèle de Markov permettant de juger de l'utilité de la mise en œuvre d'actions préventives [44].

Certains calculs rapides de performance aident à la définition de frontières délimitant les domaines d'emploi des différentes formes de maintenance. Il est possible par exemple, de définir rapidement la limite au delà de laquelle l'utilisation d'une maintenance préventive (en complément d'actions correctives) est préférable à l'emploi d'une maintenance purement corrective [10].

Cependant, malgré la diversité des lois susceptibles d'être associées à ces processus, nous retiendrons, en première approche, la distribution weibull pour sa facilité de mise en œuvre. En présence de lois particulières des études plus fines doivent évidemment accompagner cette modélisation.

De la figure 3.4 Les états R , T , C et P représentent respectivement les états de repos, travail, maintenance corrective et maintenance préventive. Les taux de transition entre états correspondent aux taux de sollicitation (α), de service (β), de défaillance (λ), de réparation (μ), d'inspection (γ) et de révision (δ).

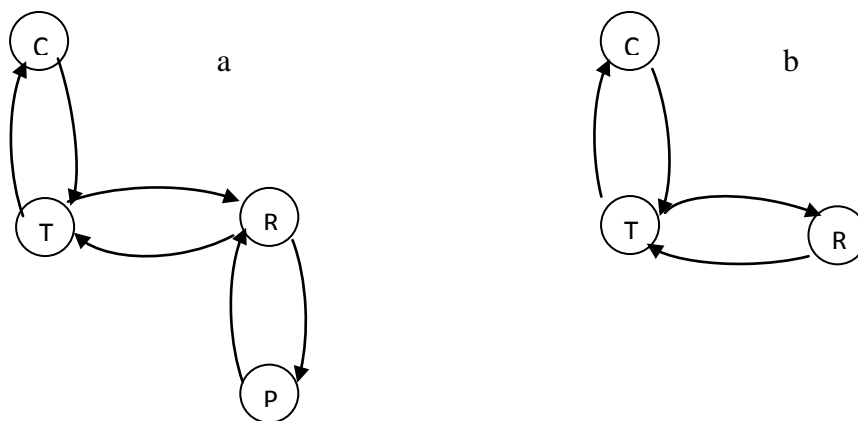


Figure 3.4 Modèles de maintenance a-corrective b- corrective-préventive

Pour les actions de maintenance corrective et curative, processus a priori déterministe, Ce type d'action bascule souvent dans le domaine des processus stochastiques et est souvent modélisable à partir de lois d'Erlang. Pour les processus de défaillance, il est bien admis que la loi exponentielle couvre, hors les phases de "rodage" et celles de vieillissement, une bonne part du spectre de ces processus.

Les processus de réparation sont généralement caractérisés par des temps moyens d'intervention pondérés par des facteurs ayant trait à la disponibilité des équipes d'intervention, à leur compétence, aux stratégies de gestion des rechange, ... Si la loi exponentielle peut encore être parfois utilisée, d'autres lois paraissent souvent mieux adaptées : loi normale tronquée, loi log-normale, ...

Pour les actions préventives qui dépendent de la disponibilité des équipements maintenus, le caractère stochastique est, là aussi, dominant. La transition vers cet état peut donc être vue elle aussi suivre une loi d'évolution exponentielle.

L'objet de ce travail étant essentiellement axé sur une méthodologie d'optimisation, nous resterons sur cette hypothèse de taux constants.

3.3 Calcul de la Disponibilité

En ce qui nous concerne en tant que mainteniciens pour les systèmes réparables, la probabilité de fonctionnement d'un système se stabilise vers une valeur constante au cours du temps cette valeur caractérise la disponibilité du système. C'est l'asymptote de la fonction de disponibilité $D(t)$.

cas 1 - maintenance corrective :

$$D_1 = \frac{\mu(\beta + \alpha)}{\mu\beta + \lambda\alpha + \mu\alpha} \quad (3.9)$$

cas 2 - maintenance corrective et préventive :

$$D_2 = \frac{\delta\mu\beta\alpha}{\mu\beta\delta + \lambda\alpha\delta + \mu\beta\gamma + \mu\alpha\delta} \quad (3.10)$$

Les taux de défaillance et de réparation λ et μ sont susceptibles d'évoluer vers des valeurs plus petites sous l'effet des actions de prévention tels que :

- réduction du risque de défaillance d'éléments "composites" intervenant sur le taux de défaillance du système,
- meilleure préparation des actions correctives.

$$\lambda' < \lambda \text{ et } \mu' < \mu \quad (3.11)$$

Pour être efficace, la maintenance préventive doit fournir une disponibilité du système au moins égale à celle obtenue sans maintenance préventive (sans considération de tous les autres effets possibles d'amélioration).

Nous devons avoir :
$$D_2 \geq D_1 \quad (3.12)$$

En cas d'égalité, il est encore préférable d'opter pour la solution du maintien préventif pour des avantages liés aux arrêts contrôlés et à l'élimination de l'effet surprise à la réduction des pertes de charge (pièces incorrectement traitées).

Pour $D_1 = D_2$:

$$\mu\lambda'\alpha\delta + \mu'\mu\beta\gamma = \lambda\mu'\alpha\delta \quad (3.13)$$

Cette relation permet d'établir les domaines d'efficacité de l'intervention préventive. Ainsi, la relation entre le ratio de maintenance préventive (γ/δ) et celui de maintenance corrective (λ'/μ') permettant de conserver au minimum la même disponibilité opérationnelle en régime permanent, est représentée sur la Figure 3.5 pour une simplification de la lecture des courbes qui vont suivre nous posons :

$$a = \mu\alpha ; \quad b = \mu\beta ; \quad c = \lambda\alpha \quad (3.14)$$

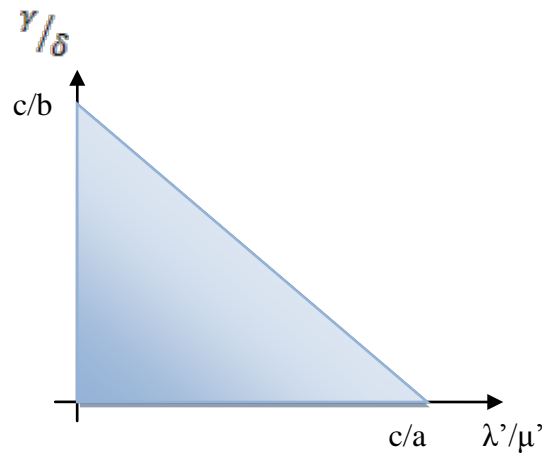


Figure 3.5 *domaine de maintenance préventive*

La droite matérialise l'égalité entre D_1 et D_2 . La partie colorée bleue représente le domaine d'intérêt du ratio de maintenance préventive c'est à dire la zone à l'intérieur de laquelle il est pertinent de réaliser des interventions préventives pour contrecarrer des défaillances et les temps de maintenance corrective qui leur sont associés, établi à partir de la relation précédente

$$\frac{\gamma}{\delta} = \frac{\alpha}{\beta} \left\{ \frac{\lambda}{\mu} - \frac{\lambda'}{\mu'} \right\} \quad (3.15)$$

D'autres informations peuvent être extraites caractérisant le domaine d'intérêt de la maintenance préventive. Pour que l'action de prévention

conserve un caractère bénéfique en termes de disponibilité on peut exprimer :

- le temps maximal que l'on peut consacrer à la révision en fonction du ratio de correctif (λ'/μ') (avec $\gamma = \text{constante}$)

$$\delta = \frac{b \cdot \gamma}{c - a \frac{\lambda'}{\mu'}} \quad (3.16)$$

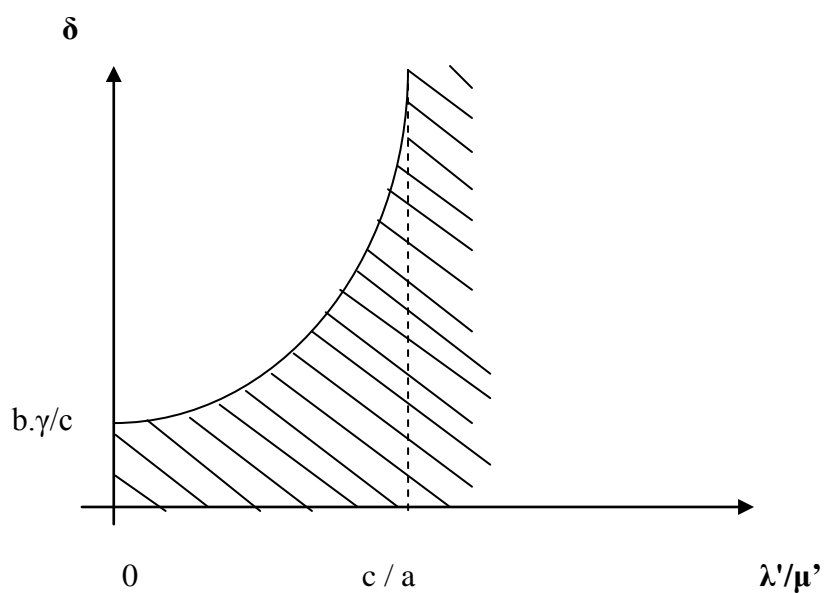


Figure 3.6 Temps maximal de révision

- la fréquence maximale de défaillance en fonction du temps dédié à la révision ($\gamma = \text{constante}$)

$$\lambda' = \frac{c - b \frac{\gamma}{\delta}}{\frac{a}{\mu'}}$$

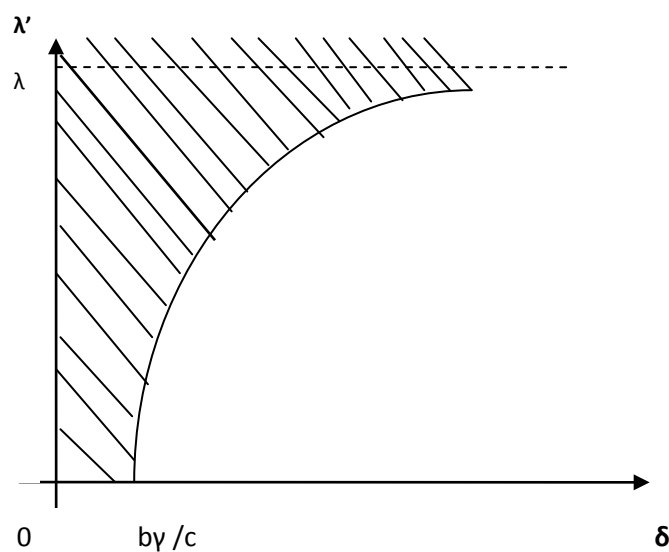


Figure 3.7 fréquence maximale de défaillance

Ces graphes permettent d'accéder rapidement à des renseignements qui, sans être très explicites, demeurent néanmoins difficiles à obtenir par des principes de calcul plus traditionnels. Ce constat est d'autant plus vérifié que la structure physique ou configuration du système est importante.

3.4 Effet de la maintenance préventive sur le taux de défaillance

Dans ce qui a précédé nous pouvons considérer plusieurs liens de dépendance entre paramètres de maintenance préventive et maintenance corrective. Le lien le plus évident, (le seul que nous considérons ici), est celui existant entre taux d'inspection γ et taux de défaillance λ . L'intégration au niveau du modèle d'autres dépendances peuvent être faites selon des principes similaires pour établir l'influence du taux d'inspection sur le taux de défaillance.

Lorsqu'une défaillance est observée, on effectue une réparation minimale sur le système. Une réparation minimale est définie comme la remise en fonction du système en l'état de marche où il était juste avant la panne. Pour des systèmes formés de plusieurs entités, la maintenance minimale

peut être vue comme le remplacement ou la réparation de l'entité défaillante. Le taux de défaillance du système après une réparation minimale reste donc égal au taux de défaillance du système juste avant cette défaillance. Le choix des réparations minimales pour la maintenance corrective est justifié par le fait qu'elles sont souvent faites dans l'urgence et ont pour but essentiel la remise en état de marche du système.

A l'issue d'études de fiabilité. Des remplacements préventifs de composants retenus pour une criticité jugée trop élevée afin de limiter les conséquences de leurs défaillances et d'éviter le dysfonctionnement du système global. Cette action préventive induit certaines conséquences sur le comportement du système et en particulier sur son âge. Suite aux actions de maintenances préventives, le système ne peut être considéré ni comme totalement neuf, ni au même niveau de performance que celui dans lequel il se trouvait juste avant le remplacement préventif des composants critiques.

Ainsi les actions de maintenance préventive sont définies comme étant soit des réparations imparfaites et le taux de défaillance à l'issue d'une maintenance préventive effectuée à l'instant T est définie de la manière suivante :

$$\lambda(t) = \lambda(t - \rho T) \quad (3.17)$$

Où ρ désigne le facteur de réduction de l'âge avec $0 \leq \rho \leq 1$. La valeur de ρ traduit l'impact du remplacement préventif du composant critique sur le nouvel état du système. Les cas extrêmes représentent respectivement une réparation minimale pour $\rho = 0$ et une réparation parfaite remettant le système à l'état neuf pour $\rho = 1$.

La figure 3.8 représente le comportement du taux de défaillance du système global soumis à la politique de maintenance préventive imparfaite au cours du temps et pour une période de réparation préventive donnée (courbe trait plein) comparé au comportement du taux de défaillance du système non maintenu (trait discontinu).

Dans ce cas l'évolution du taux de défaillance représente une courbe en dent de scie, avec la particularité qu'elle subit un léger accroissement après chaque intervention. Ce qui explique parfaitement l'hypothèse d'une maintenance préventive imparfaite où le système n'est ni totalement neuf, ni au même niveau juste avant la réparation.

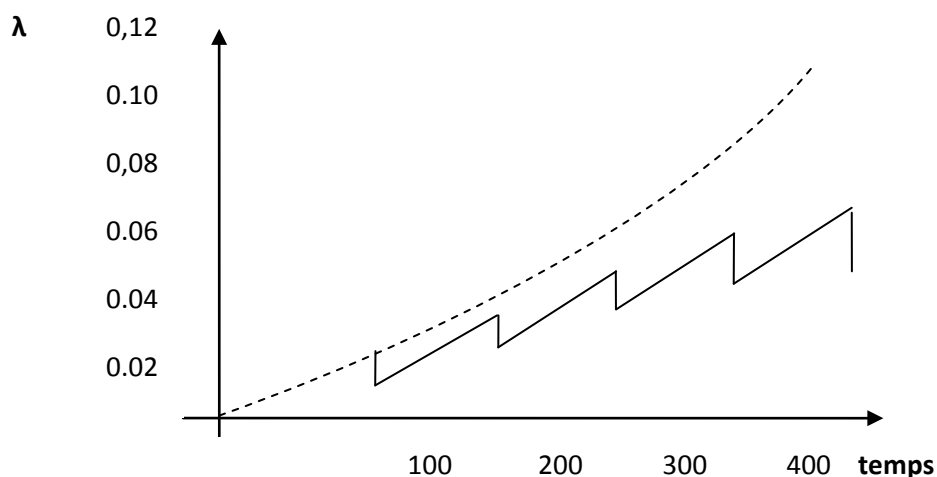


Figure 3.8 Taux de défaillance pour une maintenance préventive imparfaite

La maintenance parfaite est celle qui remet le système, après intervention, dans son état nominal de fonctionnement.

Les effets de cette dernière sur le système correspondent aussi à une courbe avec une allure en "dents de scie" pour les variations du taux de défaillance au cours du temps. voir figure 3.9.

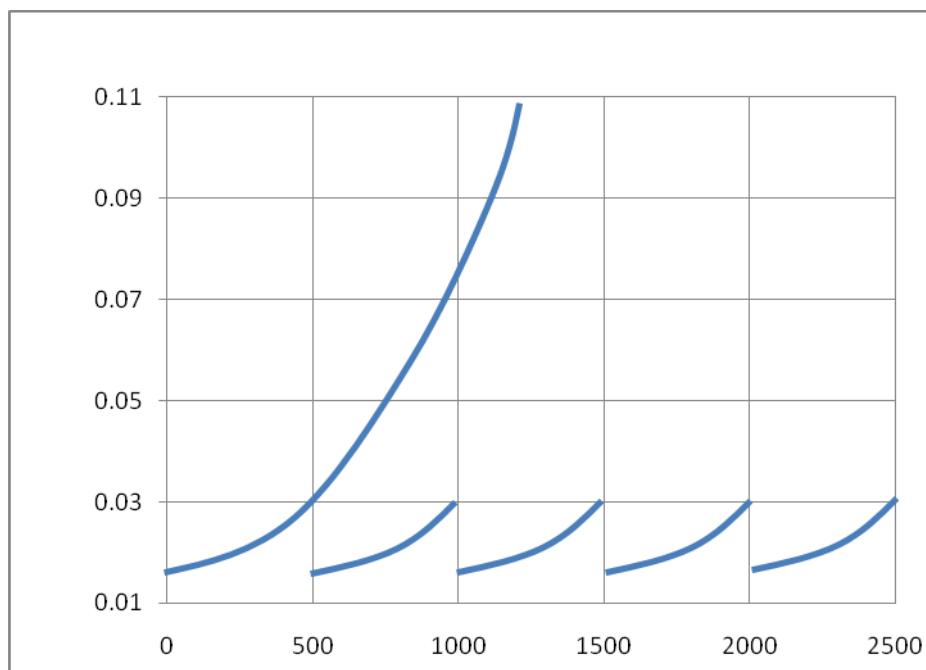


Figure 3.9 *Effet de la maintenance préventive parfaite sur taux de défaillance*

Dans notre démarche de modélisation Markovienne, il est impossible d'intégrer ces fonctions discontinues du taux de défaillance pour le cas de la maintenance préventive parfaite et encore moins pour celle imparfaite. Par contre, on peut utiliser une approximation en introduisant la notion de taux équivalent, une fonction agrégeant cette forme discontinue. Considérons, par exemple, l'aire délimitée par le taux de défaillance variable comme "estimateur de risque". A chaque instant, en effet, λ caractérise la composante de fréquence associée à l'évaluation d'un risque instantané de passage dans l'état de défaillance [37].

Soit (R constant) ce risque :

$$R = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (3.18)$$

Nous approchons le taux de défaillance sur chacun de ses intervalles de continuité par des segments de droite. Sur la Figure 3.10 on peut observer

le calcul permettant d'obtenir la valeur du taux de défaillance équivalent par conservation de surfaces entre S_1 et S_2 .

$$\int_{t_1}^{t_2} \lambda_{\text{réel}}(t) \cdot dt = \lambda_{\text{équivalent}} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.19)$$

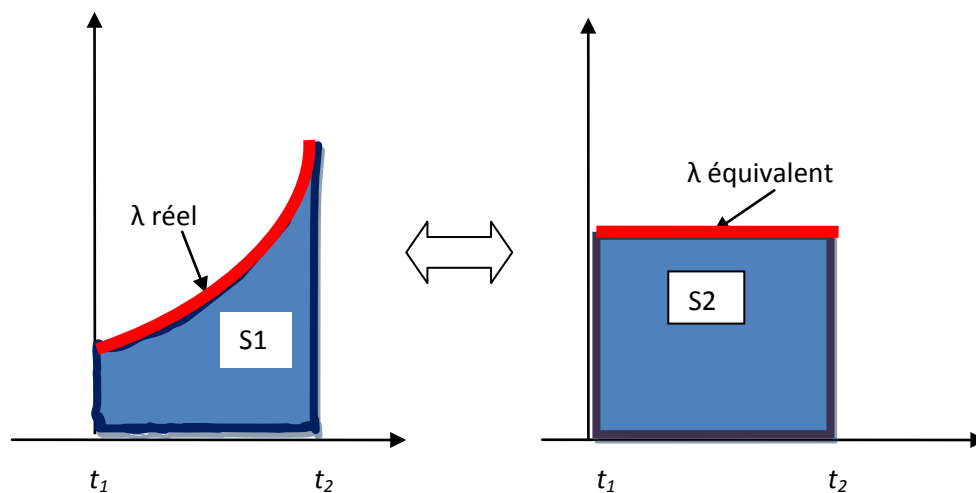


Figure 3.10 détermination d'un λ équivalent par conservation de surface

Après chaque intervention, l'évolution du taux de défaillance obéit à la loi de croissance initiale (l'instant de début d'observation étant fixé à la fin de la période de maturité de l'équipement).

L'aire S_2 du système global est délimitée par le trait en rouge correspondant à une valeur unique du système soumis à une maintenance préventive parfaite.

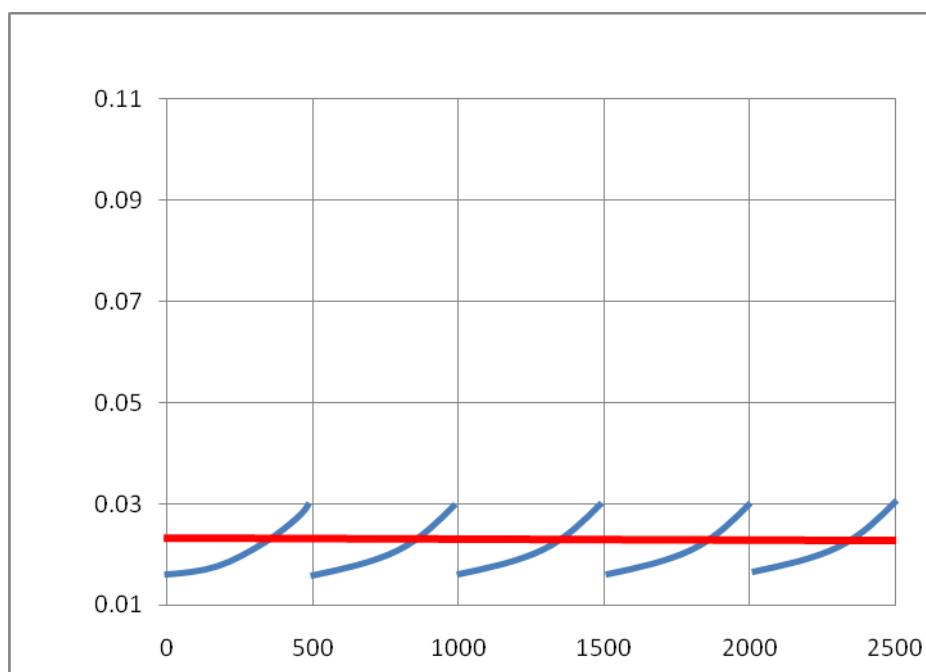


Figure 3.11 *Taux de défaillance équivalent résultant d'une maintenance systématique parfaite*

L'intervalle d'inspection étant fixe et l'évolution du taux de défaillance entre instants d'intervention inchangée dans le temps, la droite d'extrapolation du taux de défaillance résultante est parallèle à l'axe des abscisses. Le système ne vieillit pas. Ce cas de figure concerne les équipements dont les organes d'usure sont changés systématiquement à chaque intervention le modèle associé à cette forme de maintenance est représenté en Figure 3.11.

Il est facile de voir que le niveau de défaillance du système maintenu est directement lié à la durée de l'intervalle entre inspections. Plus le système est inspecté c-a-d plus celui-ci est petit, plus le risque de basculer dans l'état de défaillance diminue.

L'objectif de l'optimisation est l'augmentation de la disponibilité du système autrement dit maximisation des durées d'occupation des états de repos et de travail,

Le système d'équations décrivant le comportement du système en régime permanent est :

$$\begin{cases} P.\delta - R.\gamma = 0 \\ -P.\delta - T.\beta + R(\gamma + \alpha) = 0 \\ -T.\lambda' + C.\mu' = 0 \\ A + T + P + C = 1 \end{cases} \quad (3.20)$$

Posons :

$$\begin{cases} x_1 = R, \\ x_2 = T, \\ x_3 = C, \\ x_4 = P, \\ x_5 = \lambda \text{ et} \\ x_6 = \gamma. \end{cases} \quad (3.21)$$

Avec R, T, C et P probabilités d'occupation des états précités :

$$\begin{cases} \delta.x_4 - x_1.x_6 = 0 \\ -\delta x_4 - \beta.x_2 + x_1(x_6 + \alpha) = 0 \\ \mu.x_3 - x_5 + x_2 = 0 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Le système précédent permet de formuler le problème d'optimisation suivant

Trouver x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 et x_6 maximisant la fonction

$$f = (x_1 + x_2) \quad (3.23)$$

3.5 Application Numérique

Notre système est arrivé dans sa phase d'usure et dont la dégradation suit une loi de Weibull [27] à deux paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_0 = 2,9 \\ \eta_0 = 1000 \end{array} \right\}$$

Avec $\lambda_0 = 0.01$ part de risque acceptée en mode nominal et représentative des défaillances purement aléatoires

Soient : $\alpha = 20$ - le système est sollicité toutes les 3 mn),

$\beta = 4$ - le temps de réponse du système face à une sollicitation est de 15min

$\mu = 0,25$ - la durée moyenne de réparation est de 4 heures

$\delta = 0,125$ - soit une révision d'une durée moyenne de 8 heures.

Le calcul de la valeur de ce taux de défaillance est basé sur le principe de conservation de surface précédemment introduit qui conduit à obtenir différentes valeurs de λ en fonction de l'intervalle d'inspection ($1/\gamma$) considéré.

Cette fonction de dépendance est représentée en Figure 3.12. A chaque valeur de γ correspondra un λ équivalent unique, pour chaque valeur de γ (et donc de λ), on calculera la probabilité de se trouver dans les états de travail, repos, maintenance corrective ou préventive. Nous noterons respectivement ces probabilités T, R, C, P.

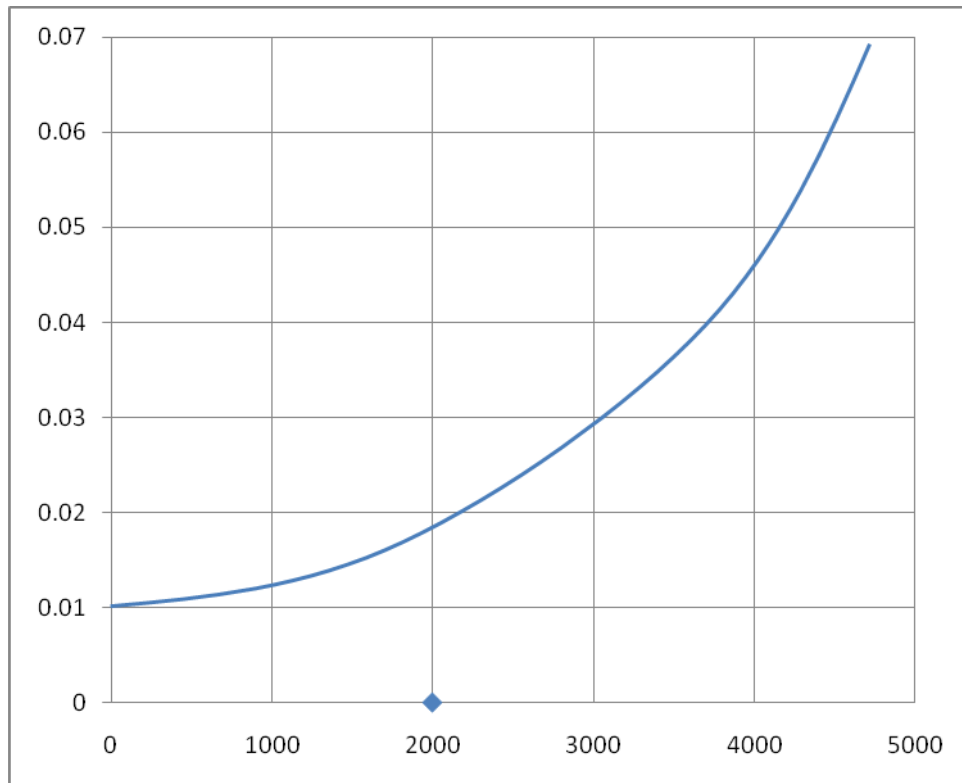


Figure 3.12 Dépendance de $\lambda=f(1/\gamma)$

les valeurs des probabilités d'occupation des états du modèle lorsque le système atteint son régime stationnaire sont calculées. La Figure 3.13 représente la distribution des probabilités sur les différents états du modèle en fonction de la valeur de l'intervalle d'inspection.

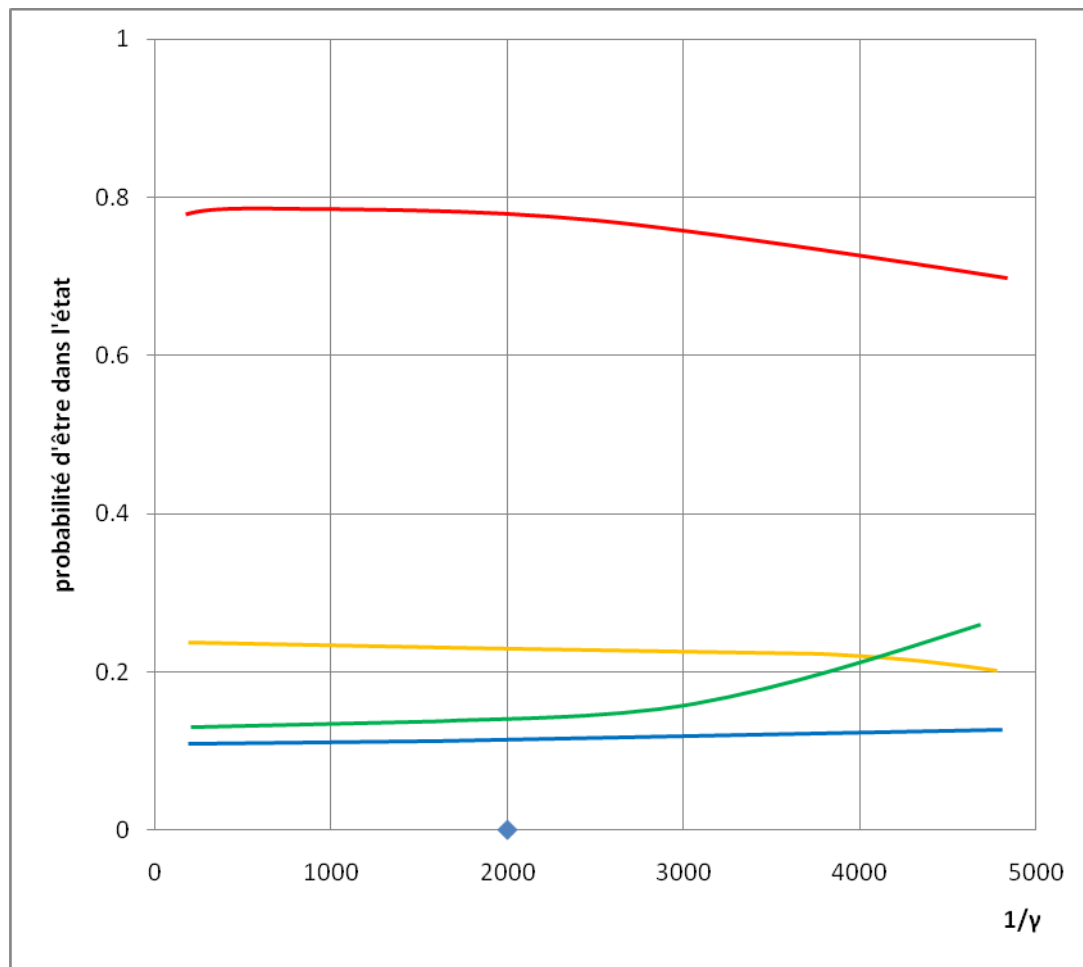


Figure 3.13 *probabilité des états du modèle en fonction de $1/\gamma$*

T — fonction de fiabilité correspondant à l'état travail
 R — // // repos
 C — // // de la corrective
 P — // // // préventive

Nous représentons sur la Figure 3.14 le détail de la zone correspondant à la valeur optimale de la disponibilité.

Remarquons que la zone correspondant à l'extremum est relativement plane.

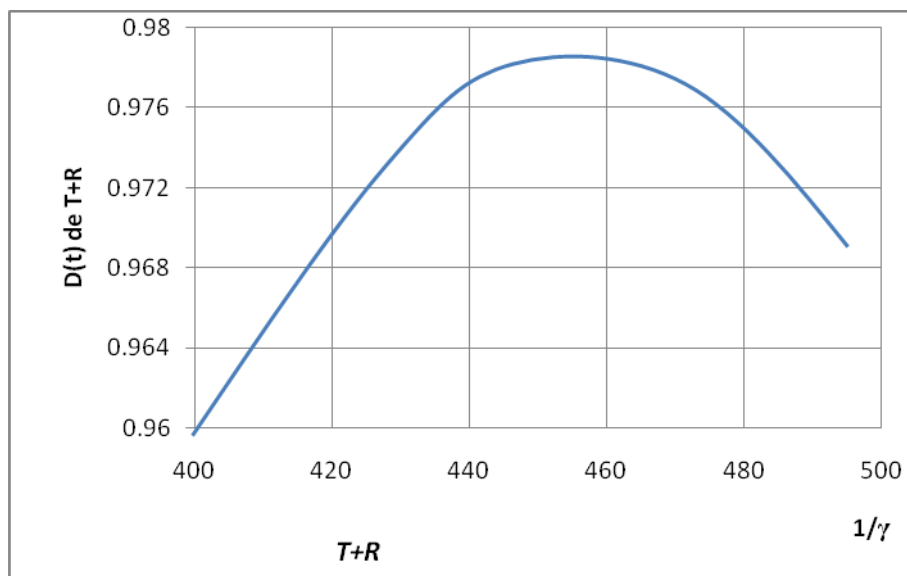


Figure 3.14 Valeur optimale de $T+R$

Ce constat révèle une information intéressante puisqu'il indique que le mainteneur n'est plus tenu de réaliser son intervention à une date fixe mais dispose d'une période sur laquelle il peut intervenir. Sur cette période, le faible rayon de courbure de la fonction objectif n'induit pas de chute significative du niveau de disponibilité. Cette marge de manœuvre permet de programmer l'intervention préventive au moment le plus opportun, par exemple à une date inscrite entre deux missions de production, évitant ainsi l'interruption, toujours néfaste, d'une séquence de travail.

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre a permis de montrer que l'outil markovien pouvait être adapté à l'optimisation de stratégies de maintenance. Nous avons montré qu'il était possible d'extraire de modèles simples, des renseignements utiles à la détermination du domaine d'intérêt de la maintenance préventive.

Nous avons ensuite considéré un lien de dépendance du taux de défaillance vis à vis de l'intervalle d'inspection. La fonction en "dents de scie" du modèle a été linéarisée. Le cas d'une maintenance parfaite a été testé (au sens où l'intervention remet le système à l'état neuf). Les résultats font apparaître un intervalle d'inspection conduisant à une disponibilité opérationnelle optimale du système.

Une suite logique à ce travail a été de considérer le cas d'une maintenance imparfaite correspondant à la situation où, à la suite d'une intervention préventive, le système n'est pas remis dans l'état nominal. Cette situation est très répandue : les pièces d'usure et les organes soumis aux phénomènes de fatigue étant nombreux sur la plupart des équipements des systèmes manufacturiers, les actions de maintenance préventive ne peuvent pas, pour raisons économiques ou de temps, remettre après chaque intervention l'équipement à l'état neuf. Les équipements vieillissent donc.

Au niveau de la modélisation du taux de défaillance, ce phénomène de vieillissement pourrait être pris en compte par la considération d'un taux résiduel persistant après l'intervention. Ce taux est fonction de la valeur du taux de défaillance. Cette extension du travail à des cas plus proches de la réalité montre l'applicabilité de la méthode et sa souplesse en fonction du cas considéré.

CHAPITRE 4

Modélisation du mécanisme hydraulique de levage de la pelleuse

INTRODUCTION

La rivalité entre les différents constructeurs entraînés par les exigences du marché et les mutations subies par les développements des technologies ces dernières décennies ont conduit à des évolutions remarquables dans la construction et l'amélioration des performances des machines.

Les questions touchant le choix de la forme, des dimensions du godet et de la flèche, la détermination des vitesses en régime stable ainsi que les questions générales de la théorie et de calcul de la commande hydraulique des mécanismes avec la masse réduite constante sont évoquées largement dans la littérature, parmi ces travaux notons, en particulier ceux de T. Bachta, Alexandre Preissman et Mischke C.R [9, 8 et 30] qui ont initiés les principales contributions sur les modèles de construction.

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. En découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle.

Dans notre cas, nous en déduisons des lois de conception adaptées aux systèmes de levage

Nous nous intéressons au développement d'approches de modélisation des systèmes à géométrie variable. Ces approches combinent optimisation et simulation et sont capables de renseigner sur le comportement dynamique des systèmes à étudier

a) la fonction objectif :

D'un point de vue mathématique la fonction objectif décrit une certaine surface à $(n+1)$ dimensions, s'il s'agit de plus de trois paramètres elle est déterminée par la fonction hyper-surface. Dans certains problèmes où on est amené à introduire plus d'une fonction dans ce cas on utilise le système de priorité et on porte à chaque fonction certains facteurs adimensionnels. Et comme résultat on aboutit à une fonction de compromis.

b) Domaine de projection :

Dans notre cas deux solutions ont été utilisées dans la résolution du problème monodimensionnel notamment

- la recherche générale qui comporte la réduction de l'intervalle indéterminé jusqu'à deux pas du filet.

- La méthode de section d'or, l'intervalle indéterminé est partagés en deux parties non égales le coefficient de division dans ce cas est $f=0.618^{N-1}$

4.1 Construction du Modèle

Le mécanisme de travail de la pelleteuse-chargeuse peut être présenté comme un système hydrodynamique muni de deux mécanismes indépendants ; celui de levage de la flèche et du godet.

L'analyse du mécanisme de travail de la chargeuse nous montre que le processus de levage de la flèche est essentiel et occupe 25% du temps du cycle de travail. La pression hydraulique du système dépend de la cinématique du mécanisme et atteint son maximum au cours du levage de la flèche avec le godet chargé (fig. 4.1.)

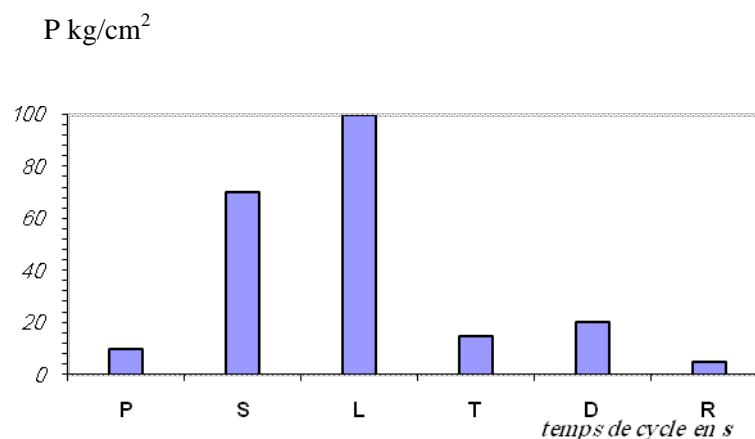


Figure 4.1 Pression du système hydraulique

où

P : pénétration du godet

S : séparation de la charge

L : levage de la flèche

T : translation de la chargeuse

D : déchargement du godet

R : retour de la flèche

4.2 Optimisation du mécanisme

Approche du problème : la projection du mécanisme de levage de la flèche comporte le choix des caractéristiques géométriques optimales celles-ci permettent au mécanisme de travailler avec fiabilité dans n'importe quelles position des parties composantes.

on peut dire que l'élément le plus important est le vérin ainsi le choix porte sur la minimalisation de l'effort maximal dans le vérin durant son mouvement

Données de départ:

La charge réduite du mécanisme, longueur de la flèche, amplitudes de mouvement de la flèche, les courses du piston du vérin.....

Pour les mécanismes à géométrie variable la réduction au centre de rotation instantané des couples statiques des poids des éléments séparés est réalisée à l'aide des rapports de transmission généralisés [19].

La caractéristique essentielle du mécanisme est le rapport de transmission généralisé qui d'une part dépend du rapport du réducteur i_r et d'autre part des paramètres géométrique du mécanisme, à cette condition pour un schéma concret on réalise un schéma à l'échelle. Ensuite on varie l'angle de φ_0 à φ_{\max} avec un pas $\Delta \varphi$ [3] on trouve M_{st} , J , i et en dérivant on obtient leurs intensités $\frac{dM_{st}}{d\varphi}$, $\frac{dJ}{d\varphi}$, et $\frac{di}{d\varphi}$

En examinant ces courbes (fig.4.5.) on peut tracer les voies de réduction du temps de mouvement du mécanisme ou bien de la force de poussée du mécanisme.

Ainsi pour un ensemble donné de paramètres constructifs du mécanisme on trouve la vitesse angulaire de l'élément à réduire en fonction du déplacement, ensuite on peut trouver la vitesse de n'importe quel point du mécanisme et le temps de son mouvement [18]. Une telle approche du problème permet l'optimisation des paramètres du mécanisme, (points de prise de vérins hydrauliques, angles des leviers, angles initiaux et leur mise au point.

La composante statique de la pression du liquide est déterminée par la position de l'organe de travail, et celle dynamique est définie par les propriétés élastiques du système hydraulique et ses paramètres.

L'augmentation de ces deux composants entraîne la diminution de la longévité du mécanisme. La diminution de la pression statique peut être assurée par voie d'optimisation de la cinématique du mécanisme. La diminution de la composante dynamique peut être obtenue par le choix rationnel des éléments tels : la rigidité du système hydraulique, la loi de commutation des distributions et du limiteur de pression.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse des mécanismes à commande hydraulique. D'où la recherche de modèles mathématiques toujours plus exhaustifs.

Cependant la méthode d'optimisation de la cinématique du mécanisme est faite d'après le minimum de pression statique dans le vérin.

Le mouvement de la flèche qui commande le godet est assuré par un mouvement de va-et-vient d'un vérin s'articulant à son tour sur le châssis. Dans différents modes de travail de l'engin, le mécanisme prend une multitude de positions. L'étude de ce dernier porte sur l'optimisation des paramètres des différentes parties composantes du mécanisme.

La fonction objectif recherche dans ce cas un minimum d'effort agissant sur le vérin hydraulique de la flèche et un temps de son cycle de travail le plus court.

A partir des points de fixation du vérin sur le châssis et sur la flèche, les masses des différents éléments et leurs positions relatives, on détermine la position des charnières de fixation de la flèche et du vérin en ayant l'effort minimal dans l'intervalle $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$ ou en fonction de X voir figure 4.3.

T (φ) est une fonction multimodale de ce fait il est plus correct d'utiliser la méthode de la recherche générale. Il faut noter aussi qu'il est nécessaire d'éviter le cas ou

$\sin(\beta + \varphi) = 0$ pour cela nous recommandons :

$$0 < (\beta + \varphi) < \pi$$

4.3 Organigramme de calcul

En raison du volume de calcul que nécessite la résolution du problème, Un programme en fortran (voir annexe) est élaboré dont l'organigramme fonctionnel est illustré dans la figure 4.2. Il comporte deux sous-programmes d'optimisation.

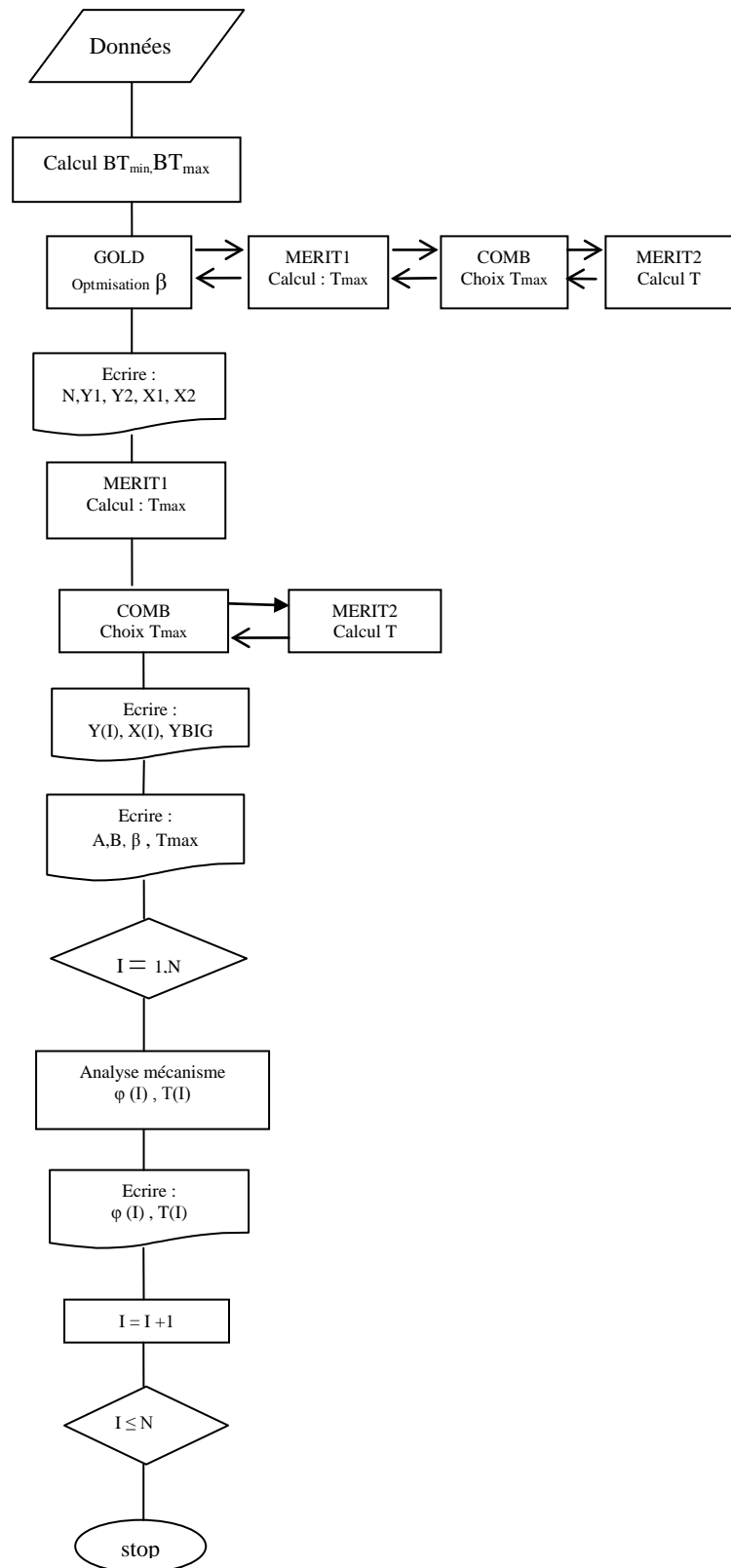


Figure 4.2. Organigramme fonctionnel de l'optimisation du mécanisme

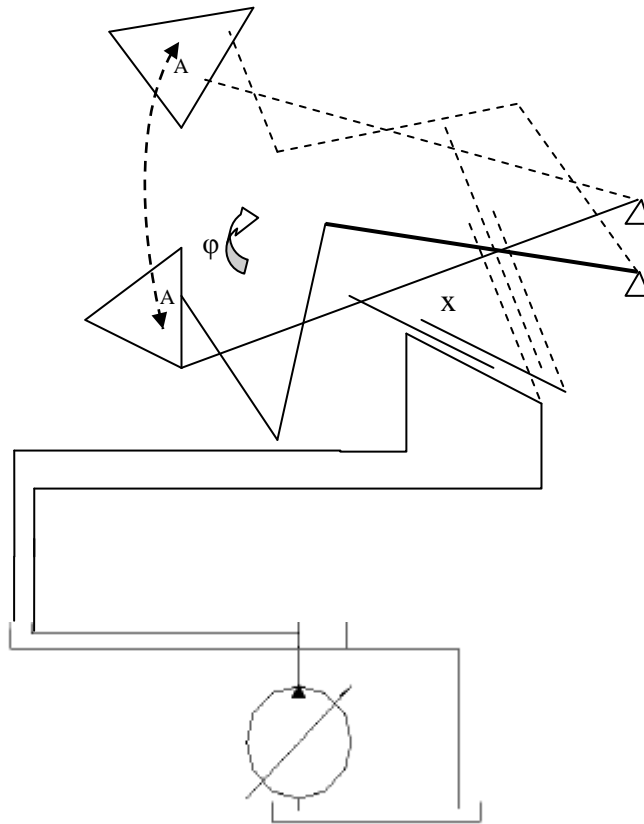


Figure 4.3. Schéma de calcul du mécanisme

Le rapport entre les coordonnées d'entrée et de sortie exprime le rapport généralisé

$$i = X/\varphi \quad (4.1)$$

l'expression du mouvement de la flèche est

$$M = M_{st} + M_d \quad (4.2)$$

M_{st} est le couple des forces statiques relatif au centre de rotation instantané

M_d est le couple dynamique de toutes les masses en mouvement réduit à l'élément récepteur sa valeur change avec la variation de l'angle de braquage

$$M_{st} = \sum_{i=1}^n M_{sti} = \mathcal{F}(\varphi) \quad (4.3)$$

$$M_d = \frac{d(j\omega)}{dt} \quad (4.4)$$

Où J est le moment d'inertie du mécanisme réduit à la flèche

ω est la vitesse angulaire de la flèche

de (4.4) on peut écrire

$$M_d = \omega \frac{dI}{dt} + J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.5)$$

En y substituant $dt = \frac{d\varphi}{\omega}$ on reçoit

$$M_d = \omega^2 \frac{dI}{d\varphi} + J \frac{d\omega}{d\varphi} \quad (4.6)$$

$$J = J_B i^2 + J_0 \quad (4.7)$$

J_B moment d'inertie du bloc de commande

J_0 moment d'inertie de l'élément à réduire

Pour un bloc de commande à action alternative le couple menant est déterminé par :

$$M = (P_p \cdot S_p - P_t \cdot S_t) i \cdot \eta \quad (4.8)$$

P_p et P_t sont les pressions du liquide de travail dans la chambre du piston et de la tige

S_p et S_t sections du piston et de la tige

η est la caractéristique de frottement du mécanisme

Le coefficient de frottement généralisé

$$\eta = f(d\varphi/dt) \quad (4.9)$$

est une fonction de la vitesse de l'élément à réduire. La détermination de J et $\frac{dJ}{d\varphi}$ repose sur l'analyse de la cinématique du mécanisme. De la figure 1 et en utilisant le théorème des cosinus on a l'expression suivante :

$$X^2 = K^2 + p^2 - 2Kp \cos \varphi \quad (4.10)$$

Durant le mouvement de la flèche les paramètres x et φ sont variables en dérivant on reçoit

$$\frac{dx}{dt} = \frac{kp \sin \varphi}{\sqrt{k^2 + p^2 - 2kp \cos \varphi}} d\varphi / dt \quad (4.11)$$

en remplaçant

$$dt = d\varphi / \omega \quad ; \quad \omega = d\varphi / dt \quad (4.12)$$

On a

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{kp \sin \varphi}{\sqrt{k^2 + p^2 - 2kp \cos \varphi}} \omega^2 \quad (4.13)$$

En divisant (11) par ω on obtient le rapport généralisé

$$\dot{x} = \frac{k p \sin \varphi}{\sqrt{k^2 + p^2 - 2kp \cos \varphi}} \quad (4.14)$$

D'où on peut écrire

$$\frac{dx}{dt} = \omega \cdot \dot{x} ; \quad \frac{dx}{d\varphi} = \omega^2 \cdot \dot{x} \quad (4.15)$$

Du même triangle on a

$$k^2 = x^2 + p^2 - 2xp \cdot \cos u \quad (4.16)$$

Ou bien

$$u = \arccos \frac{x^2 + p^2 - k^2}{2xp} \quad (4.17)$$

En dérivant cette formule

$$\frac{du}{dt} = \frac{k \cdot p \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 - \frac{(p^2 - 2kp \cdot \cos \varphi)^2}{4p^2(k^2 + p^2 - 2kp \cdot \cos \varphi)}}} \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.18)$$

En substituant $dt = d\varphi / \omega$ on a

$$\frac{dv}{d\varphi} = \frac{k.p.\sin\varphi}{1 - \frac{(p^2 - 2kp.\cos\varphi)^2}{4p^2(k^2 + p^2 - 2kp.\cos\varphi)}} \omega^2 \quad (4.19)$$

Et en divisant l'expression (18) par ω on obtient le rapport généralisé

$$\dot{i}_v = \frac{k p \sin \varphi}{\sqrt{1 - \frac{(p^2 - 2kp.\cos\varphi)^2}{4p^2(k^2 + p^2 - 2kp.\cos\varphi)}}} \quad (4.20)$$

D'où on a

$$\frac{dv}{dt} = \omega \cdot \dot{i}_v ; \quad \frac{dv}{d\varphi} = \omega^2 \cdot \dot{i}_v \quad (4.21)$$

Du triangle COM et après toutes transformations le rapport généralisé a l'expression suivante

$$\dot{i}_n = \frac{q.c.\sin(\varphi - \tau)}{\sqrt{q^2 + c^2 - 2qc.\cos(\varphi - \tau)}} \quad (4.22)$$

Du triangle CML

on a

$$\dot{i}_\Delta = \frac{q.c.\sin(\varphi - \tau)(q^2 + c^2 - 2qc.\cos(\varphi - \tau) - f^2 + m^2)}{q^2 + c^2 - 2qc.\cos(\varphi - \tau)} \dots\dots$$

$$\dots\dots \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(q^2 + c^2 - 2qc.\cos(\varphi - \tau) - f^2 + m^2)}{2f\sqrt{q^2 + c^2 - 2qc.\cos(\varphi - \tau)}}}} \quad (4.23)$$

De même pour le triangle CLM le rapport généralisé a pour expression

$$\dot{i}_\delta = \frac{qc \sin(\varphi - \tau)}{mf \sqrt{1 - \left(\frac{m^2 + f^2 - q^2 - c^2 + 2qc \cos(\varphi - \tau)}{2mf} \right)^2}} \quad (4.24)$$

Du triangle CML on a

$$\dot{i}_\beta = \frac{qc \sin(\varphi - \tau) (1 - m^2 - q^2 - c^2 + 2qc \cos(\varphi - \tau) - f^2)}{m \sqrt{q^2 - c^2 + 2qc \cos(\varphi - \tau)} \sqrt{1 - \left(\frac{m^2 + c^2 + q^2 - f^2 - qc \cos(\varphi - \tau)}{2mn} \right)^2}} \quad (4.25)$$

Du triangle ACD on a

$$\dot{i}_w = \frac{a.d \sin \beta}{\sqrt{a^2 + d^2 - 2ad \cos \beta}} \dot{i}_\beta \quad (4.26)$$

Du triangle ACD on peut écrire

$$\dot{i}_\gamma = \frac{a^2 \cos \beta \sin \beta \cdot \dot{i}_\beta}{(a^2 + d^2 - 2ad \cos \beta)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \left(\frac{d - 2a \cos \beta}{a^2 + d^2 - 2ad \cos \beta} \right)^2 \right)^{1/2}} \quad (4.27)$$

En ayant la désignation suivante

$$\Psi = \varphi_g + \gamma \quad (4.28)$$

Du triangle ABD on a

$$i_\Psi = \frac{(a^2 + d^2 + r^2 - l^2 - 2ad \cos \beta \cdot ad \sin \beta \cdot i_\beta)}{(4r^2(a^2 + d^2 - 2ad \cos \beta)^2 - (r^2 + a^2 + d^2 - l^2 - 2ad \cos \beta)^2)^{1/2}} \quad (4.29)$$

D'après la figure 2 on a

$$\varphi_g = \Psi - \gamma \quad (4.30)$$

En dérivant et en divisant tout les termes par ω on aura

$$i_{\varphi_g} = i_\Psi + i_\gamma \quad (4.31)$$

Du triangle ABD on peut écrire

$$i_\mu = \frac{ad \sin \beta i_\beta}{rl \sqrt{1 - \left(\frac{r^2 + l^2 + d^2 - a^2 - 2ad \cos \beta}{2rl} \right)^2}} \quad (4.32)$$

la tringle BD assure le mouvement plan dans le mouvement relatif.

Ce dernier est déterminé par la vitesse linéaire v et celle angulaire ω_1 .

$$V = \omega (i_\Psi - i_\gamma) r \sin \mu \quad (4.33)$$

$$\omega_l = \frac{\omega(i_\psi - i_\gamma)r \cos\mu}{l} \quad (4.34)$$

au cours du changement de l'angle de rotation de la flèche de la valeur initiale φ_0 avec un pas $\Delta \varphi$ la longueur de la tige est celle du vérin

$$X = X_0 + \Delta \varphi \cdot i_x \quad (4.35)$$

et pour l'angle ν

$$\nu = \nu_0 + \Delta \varphi \cdot i_x \quad (4.36)$$

Les éléments LD, DB, BA tournent avec la flèche dans le sens d'entraînement avec l'angle $\Delta \varphi$ et dans le mouvement relatif chaque élément tourne avec un angle :

$$\beta = \beta_0 + \Delta \varphi \cdot i_\beta , \quad (4.37)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta \varphi \cdot i_\lambda \quad (4.38)$$

$$\varphi_g = \varphi_{g0} + \Delta \varphi \cdot i_g , \quad (4.39)$$

$$\mu = \mu_0 + \Delta \varphi \cdot i_\mu . \quad (4.40)$$

en effet l'élément DB se déplace linéairement dans la direction du mouvement en ayant le déplacement linéaire

$$X_B = \Delta \varphi (i_\psi - i_\gamma) r \cdot \sin \mu \quad (4.41)$$

et tourne autour de D de sorte que son angle formé avec la flèche sera ;

$$\beta = \beta_0 + \Delta \varphi \frac{(i_\psi - i_\gamma) r \cdot \cos \mu}{l} \quad (4.42)$$

du triangle CLO on a

$$e^2 = m^2 + q^2 - 2mq \cos \beta \quad (4.43)$$

La dérivée nous donne

$$\frac{de}{dt} = 2mq \sin \beta i_\beta \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.44)$$

$$i_e = 2mq \sin \beta i_\beta \quad (4.45)$$

$$\frac{de}{dt} = \omega \cdot i_e ; \quad \frac{de}{d\varphi} = \omega^2 \cdot i_e \quad (4.46)$$

Du triangle LMO on peut écrire

$$\cos \xi = \frac{f^2 + c^2 - e^2}{2fc} \quad (4.47)$$

D'où

$$\xi = \arccos \frac{f^2 + c^2 - e^2}{2fc} \quad (4.48)$$

En dérivant on aura

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{2(m^2 + q^2 - 2mq \cos \beta)^{1/2} mc \sin \beta}{fc} i_\beta \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.49)$$

$$i_{\xi} = \frac{2(m^2 + q^2 - 2mq \cos \beta)^{1/2} mq \sin \beta}{fc} i_{\beta} \quad (4.50)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \omega \cdot i_{\xi} ; \quad \frac{d\xi}{d\varphi} = \omega^2 \cdot i_{\xi} \quad (4.51)$$

On peut accomplir les transformations analogues pour tous les angles et dimensions variables du mécanisme et par suite le rapport généralisé pour chaque élément.

Dans le tableau n°1 nous récapitulons les expressions de base correspondant aux différents angles pour la détermination des différents rapports généralisés

En ayant la loi de mouvement de l'élément de réduction on peut déterminer à tout moment la position de chaque élément et sa vitesse ensuite on peut résoudre les questions de réductions des masses et des couples statiques de toutes les parties composantes du mécanisme par rapport à la flèche.

En utilisant les expressions des rapports généralisés figure 4.3.

$$M_{st} = F_1 \cdot p \cdot \sin \nu = G_i + h_i - F_2 \cdot c \cdot \cos(\tau + \xi) \quad (4.52)$$

$$G_i + h_i = G_c(S_c \cdot \sin \nu_c + p \cdot \sin \xi) + (G_p(S_p \cdot \sin \nu_p + p \cdot \sin \xi) + G_f b_f \sin \nu_f + G_a(b_c \cdot \sin \nu_a + c \cdot \sin(\tau + \xi)) + G_l(m_l \cdot \sin \nu_l + q \cdot \sin \nu_f) + G_t(l_t \cdot \sin \nu_t + q \cdot a \sin \beta)$$

...

$$\sin v_f + G_g \cdot (r_g \cdot \sin v_g + l_f \sin v_f) + G_{ch}(r_{ch} \sin v_{ch} + l_f \sin v_f) \cdot F_2 \cdot c \cdot \cos(\tau - \xi) =$$

(4.53)

$$(G_{ch} \cdot r_{ch} \sin v_{ch} + G_g \cdot r_g \sin v_g) i_{\varphi g} + G_t \cdot l_t \sin v_t \cdot (i_{\sigma} + i_l) + G_l \cdot m_l \sin v_t \cdot i_{\beta} + G_a \cdot b_c \sin v_a i_{\Delta}$$

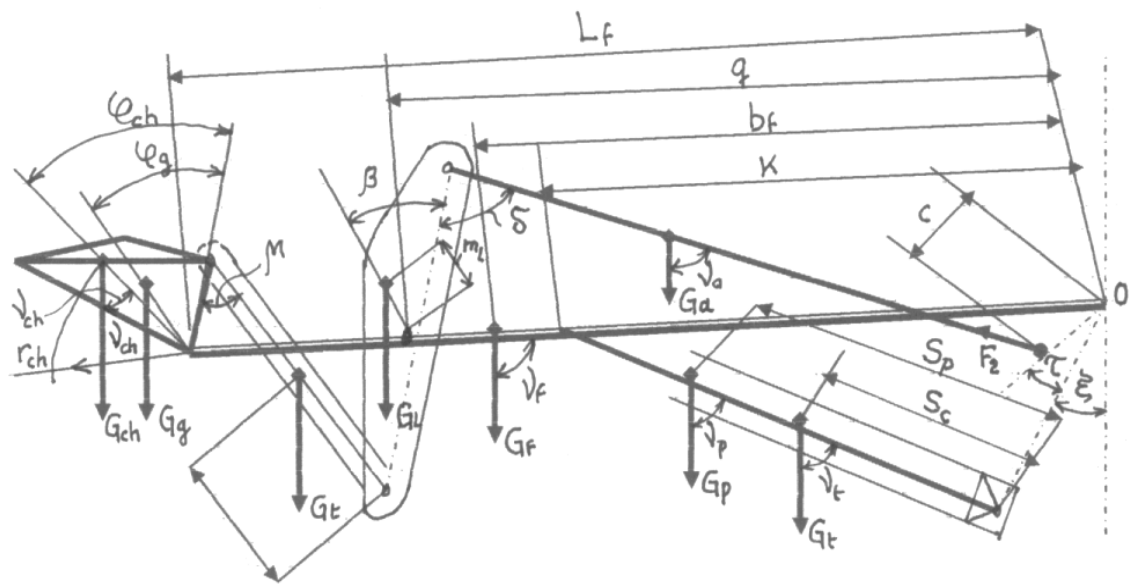


Figure 4.4 schéma de calcul

Où $v_c, v_p, v_f, v_a, v_l, v_t, v_g, v_{ch}$ sont les angles formés par les vecteurs poids de chaque élément du mécanisme et les lignes liées au centre de masse avec les centres de rotation de l'élément en mouvement relatif. En utilisant l'expression (52) on exprime le couple statique en fonction de l'angle de rotation de la flèche.

Tableau 4.1: Expressions pour le calcul de i_i

TRIA NGLE	Fonctions
KOU	$X^2 = K^2 + p^2 - 2 K p \cos \varphi$
KUO	$X^2 = X^2 + p^2 - 2 X p \cos v$
COM	$n^2 = q^2 + p^2 - 2 q c \cos (\varphi - \tau)$
CML	$\Delta = \arccos \frac{n^2 + f^2 - m^2}{2fn}$
CLM	$\delta = \arccos \frac{m^2 + f^2 - n^2}{2mf}$
CML	$\beta = \arccos \frac{m^2 + n^2 - f^2}{2mn}$
ACD	$W^2 = a^2 + d^2 - 2ad \cos \beta$
ACD	$\gamma = \arccos \frac{w^2 + d^2 - a^2}{2wd}$
ABD	$\psi = \arccos \frac{r^2 + w^2 - l^2}{2wr}$
ABD	$\mu = \arccos \frac{r^2 + l^2 - w^2}{2rl}$

On réduit analogiquement le couple d'inertie du mécanisme au centre de rotation de la flèche

$$I = I_{cf} + \frac{G_c}{g} b_f^2 + \left(\left(I_{cc} + \frac{G_c}{g} S_c^2 \right) + \left(I_{cp} + \frac{G_p}{g} S_p^2 \right) \right) i_v + \left(I_{ca} + \frac{G_a}{g} b_c^2 \right) i_\xi +$$

$$i_{ca} + \frac{G_a}{g} (b_c^2 + c^2 - 2b_c c \cos \xi) + \left(I_{cl} + \frac{G_l}{g} m_l^2 \right) i_\beta + I_{cl} + \frac{G_l}{g} (q^2 +$$

$$m_l^2 - 2m_l q c \cos \beta + I_{ct} i_g^2 + \frac{G_t}{g} i_l^2 + I_{ct} + \frac{G_t}{g} ((l_t^2 + a^2 -$$

$$2l_t \cdot a \cos \lambda + q^2)) + \left(I_{cg} + \frac{G_g}{g} r_g^2 + I_{cch} + \frac{G_{ch}}{g} r_{ch}^2 \right) i^2 \varphi_g + I_{cg} +$$

$$\frac{G_g}{g} (l_f^2 + r_g^2 - 2l_f r_g \cos(\varphi_g + \varphi_{ch})) + I_{cch} + \frac{G_{ch}}{g} (l_f^2 + r_g^2 -$$

$$2l_f \cdot r_g \cos(\varphi_g + \varphi_{ch}))$$

(4.54)

Où $I_{cf}, I_{cc}, I_{cp}, I_{ca}, I_{cl}, I_{ct}, I_{cg}, I_{cch}$ sont les moments d'inertie principaux des éléments composant le mécanisme.

La caractéristique essentielle du mécanisme est le rapport de transmission généralisé qui d'une part dépend du rapport du réducteur i_r et d'autre part des paramètres géométrique du mécanisme.

4.4 Résultats et Discussion

En faisant varier les valeurs initiales de position (points de prise de vérins hydrauliques, angles des leviers, angles initiaux et leur mise au point) pour un même bloc de commande [20] (fig4.5).

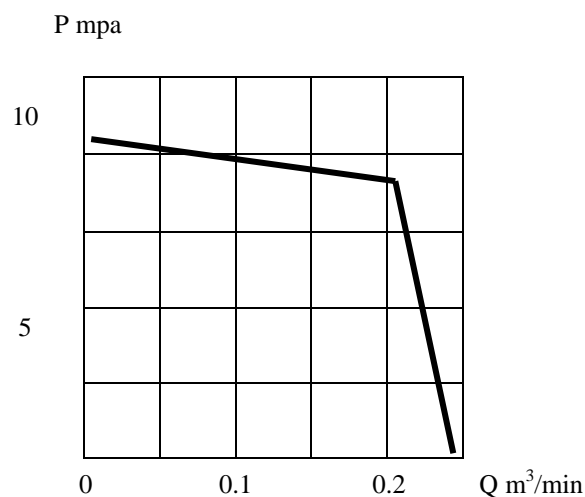


Figure 4.5. Caractéristique du bloc de commande

On peut optimiser les paramètres d'après le critère du minimum de temps de mouvement ou du minimum de l'effort dans le vérin. Les résultats obtenus exécutés sur une chargeuse-pelleteuse montrent le comportement similaire de M_{st} et de i mais l'accroissement de J voir figure 4.6.

$$M_{st}, i, J, \frac{dJ}{d\varphi}, \frac{di}{d\varphi}, \frac{dM_{st}}{d\varphi}$$

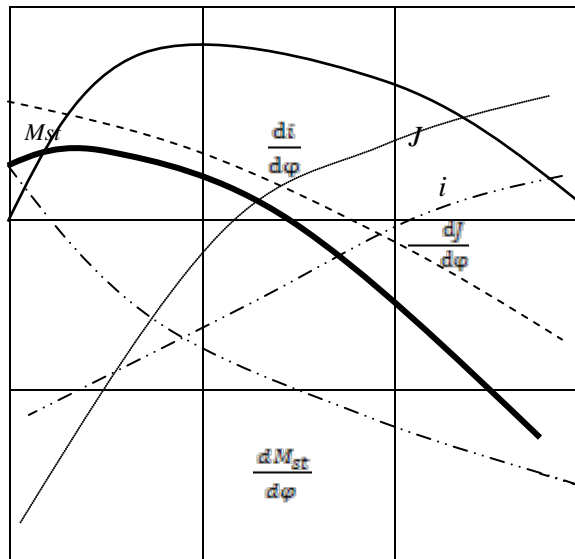


Figure 4.6 paramètres du mécanisme

De là, on peut voir que l'optimisation peut être obtenue à l'aide de

$$i, \frac{di}{d\varphi}, \frac{dJ}{d\varphi}$$

à cette condition pour un schéma concret on réalise un schéma à l'échelle. Ensuite on varie l'angle de φ_0 à φ_{max} avec un pas $\Delta \varphi$ [3] on trouve M_{st} , J , i et en dérivant on obtient leurs intensités $\frac{dM_{st}}{d\varphi}$, $\frac{dJ}{d\varphi}$, et $\frac{di}{d\varphi}$ en examinant ces courbes on peut déceler les différentes voies de réduction du temps de mouvement du mécanisme ou bien de la force du vérin ainsi on exécute l'optimisation du mécanisme.

4.5 Application Numérique

En ayant la valeur de l'effort dans le vérin on peut déterminer la pression statique de la commande hydraulique et par conséquent le choix des vérins et leur nombre.

Le tableau suivant propose les résultats de calcul des valeurs optimales du mécanisme de travail de trois types de chargeuses d'une capacité moyenne répondant en grande partie aux conditions de travail de nos chantiers.

Tableau 4.2 : résultats de l'optimisation pour trois types de machines

paramètres	Capacité de charge, en t		
	2.8	6.7	10.6
W [KN]	41.354	103.03	144.36
L [m]	2.3	2.98	3.64
S ₁ [m]	1.1	1.5	1.4
S ₂ [m]	1.7	2.2	2.74
Φ ₁ [rad]	-0.785	-0.68	-0.68
Φ ₂ [rad]	0.75	0.8	0.785
β [rad]	1.349	1.253	1.208
P [Mpa]	9.96	0.42	8.8
D [m]	0.12	0.18	0.2
T _{max} [KN]	-225.34	-479.60	-552.75

Dans ce qui suit nous proposons les résultats détaillés d'un seul engin obtenu à partir des données suivantes :

le poids de la charge réduite $W = 41.354 \text{ KN}$, longueur de la flèche $L = 2.3 \text{ m}$, $S_1 = 1.1 \text{ m}$, $S_2 = 1.7 \text{ m}$, $\varphi = \pi/9 \div 4\pi/9$ pour $A = 0.585 \text{ m}$; $B = 1.2691 \text{ m}$; $\beta = 1.349 \text{ rad}$

L'effort minimal trouvé dans le vérin parmi tout les cas examinés de la construction est de $T_{max} = -225.34 \text{ KN}$ correspondant à un angle de rotation de la flèche $\varphi = 0.35 \text{ rad}$.

On peut voir la dépendance entre la force statique dans les vérins et l'angle de rotation de la flèche (figure 4.7), la valeur de cette force aux points extrêmes atteint le double, cette différence est provoquée par la variation du rapport généralisé.

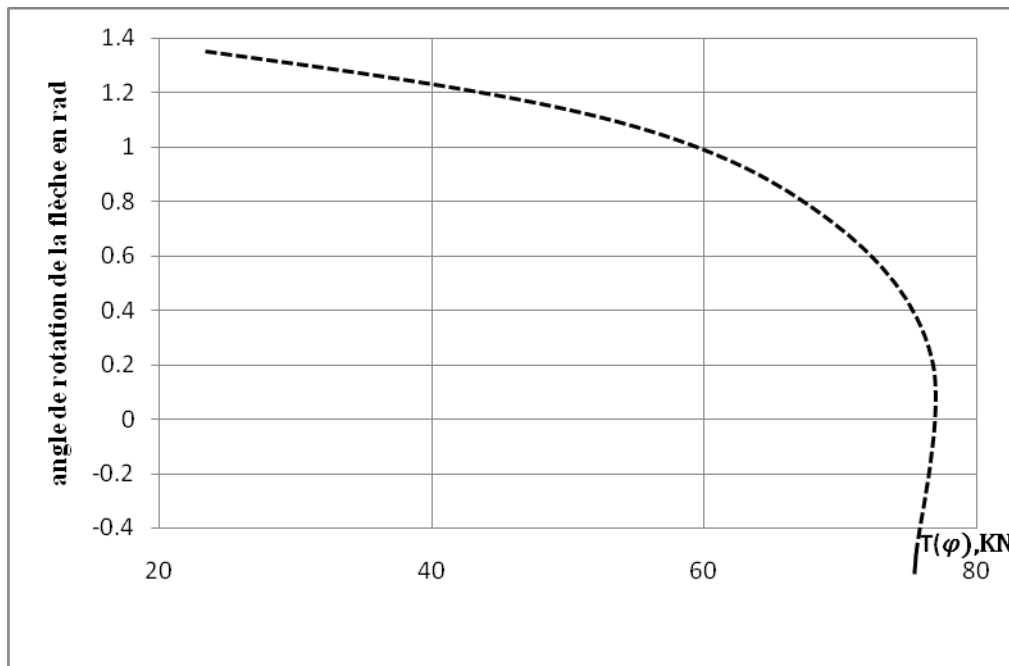


Figure 4.7 résultats de l'analyse du mécanisme

Sur la figure 4.8 est illustrée la dépendance de la vitesse de levage du godet en fonction du temps, la présence du col (écart entre la courbe théorique - en pointillé - et celle expérimentale témoigne de la présence d'une réserve qui permet de réduire d'avantage le temps de cycle du mécanisme.

La comparaison montre une bonne concordance entre des résultats calculés et ceux expérimentaux ce qui explique la fidélité du modèle élaboré. Ce dernier permet d'analyser l'influence des paramètres géométriques notamment la fixation des centres de rotation de la flèche et des vérins par rapport à la vitesse de mouvement. En d'autres termes permet l'optimisation du mécanisme d'après un critère choisi comme la vitesse minimale ou la force motrice.

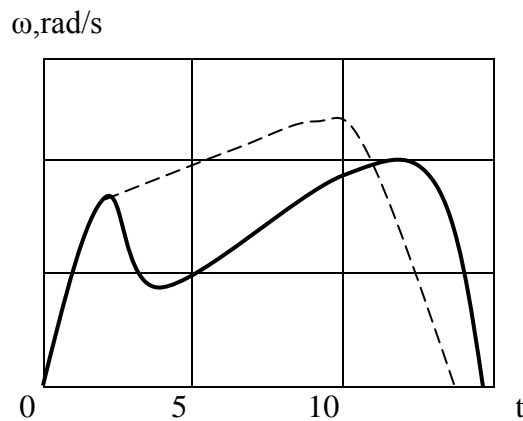


Figure 4.8 vitesse du godet en fonction du temps

CONCLUSION

Nous avons développé, dans ce chapitre un modèle mathématique qui permet d'illustrer l'influence des paramètres géométriques sur l'optimalité du mécanisme en tenant compte de différents critères que le décideur retiendra en fonction de ses priorités.

La méthode élaborée permet d'optimiser le mécanisme de travail à commande hydraulique dans les limites données des paramètres constructifs.

La charge réduite du mécanisme dépend de la position de la flèche et son changement est entièrement déterminé par i

La course du vérin, la pression standard du système hydraulique, les diamètres du piston serviront comme base de données pour d'autres projets.

Grace à cette démarche on peut analyser toute construction à un stade de projection et de cette manière on pourra avoir des gains de temps considérables avant leur exécution.

En effet les constructeurs sont confrontés constamment d'une part à relever un déficit majeur dans la conception des machines celui de

mettre en place une base valide de la théorie de construction des machines et d'autre part ont un souci constant de l'amélioration des performances de leur machines imposé par la question de rivalité entre eux. La démarche proposée ainsi que les résultats qui en découlent peuvent être justifiés par leur intégration dans une démarche industrielle. Il en reste pour nous une priorité de pouvoir mettre en œuvre notre étude théorique sur un prototype et de pouvoir valider la pertinence de nos hypothèses.

CHAPITRE 5

Modélisation de Fiabilité du Système Hydraulique de la Pelleteuse

INTRODUCTION

La modélisation mathématique faite dans le chapitre précédent nous a permis de résoudre les problèmes essentiels relatifs à l'optimisation de l'effort dans le vérin et par conséquent la détermination des paramètres constructifs optimaux du système de commande du godet. Ceux-ci permettent au mécanisme de travailler avec fiabilité dans différentes situations. Le traitement de ce genre de

problèmes se pose essentiellement au stade de projection. D'autres problèmes d'une importance non moindre surgissent en phase d'exploitation, d'une autre nature, mais qui gardent presque les mêmes objectifs, c'est comment préserver les caractéristiques de ces éléments constituants et ce le plus longtemps possible, c-a-d en introduisant le facteur temps, c'est le rôle de la sureté de fonctionnement. Dans ce chapitre nous nous intéressons à la fiabilité du système de commande hydraulique du godet et nous essayons de déceler les parties vulnérables du système, ainsi nous choisissons les voies possibles afin de les éviter ou celles qui mènent à leur amélioration.

La description de cette méthode passe par l'étude AMDEC. Dans cette analyse, chaque composant est pris séparément. On envisage divers modes de dégradation pouvant apparaître (corrosion, rupture...) [29]. On peut à partir de là établir la liste des points critiques, proposer des améliorations, prévoir un plan de rechange et établir des opérations de maintenance corrective ou préventive enfin en découlent des recommandations visant à l'amélioration de tout le système. Ensuite par le biais de la mesure de l'importance de Birnbaum on peut déterminer la fiabilité du composant critique au fonctionnement du système au temps t donné.

5.1 Méthode d'analyse AMDEC

Elle est applicable à un produit, un service ou un procédé, dès sa conception ou pour l'améliorer. C'est une méthode d'analyse préventive de la fiabilité qui permet de recenser et mettre en évidence les défaillances possibles ou potentielles d'un système afin de l'optimiser et détecter les erreurs. elle développe et traite notamment la notion de criticité.

AMDEC produit est orientée vers l'optimisation de la fiabilité. Elle permet notamment de définir les actions préventives et les dispositions d'après-vente.

La méthode est basée essentiellement sur les résultats d'expériences passées (historiques) et sur des données prévisionnelles. Celle procédé s'intéresse à un moyen de production ou à une séquence d'opérations, automatisée ou non, permettant de fabriquer un produit, traiter une information ou rendre un service. L'AMDEC analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité permet de mieux appréhender les risques de défaillance et ainsi de les éviter, en mettant en place :

- des éléments de secours (redondances) ;
- des technologies plus performantes ;
- des méthodes de surveillance des points névralgiques mieux adaptées ;
- une méthode de maintenance plus efficace ;
- des diagnostics de pannes plus rapides.

Elle est applicable à un produit, un service ou un procédé, dès sa conception ou pour l'améliorer, c'est une méthode d'analyse préventive de la fiabilité (outil de prévention) qui permet de recenser et mettre en évidence les défaillances possibles ou potentielles d'un système afin de l'optimiser et détecter les erreurs. L'analyse développe et traite la notion de criticité.

Elle repose sur la notion de décomposition du système en éléments, sur les représentations graphiques de la structure fonctionnelle du système, le recensement des données nécessaires, ainsi que sur les notions de mode défaillance et de criticité.

NB : les erreurs humaines et les effets de l'environnement ne sont pas, en général, pris en compte au cours d'une AMDEC, d'autres méthodes sont nécessaires pour ces cas.

Criticité : c'est la résultante ou la combinaison des trois critères de risques

$$C = F.G.ND = O.S.D$$

Plan d'action : Etablir les actions préventives ou correctives envisageables

permettant de réduire les probabilités de défaillance ou d'en minimiser les effets : composants redondants, modes de fonctionnement de remplacement, appareils de surveillance, alarmes etc.

Les responsables des actions doivent suivre leur mise en œuvre et les résultats obtenus. Faire un compte rendu comprenant un résumé et le rapport détaillé de l'analyse avec les recommandations, les défaillances ayant des conséquences graves, les modifications apportées suite à l'analyse, etc.

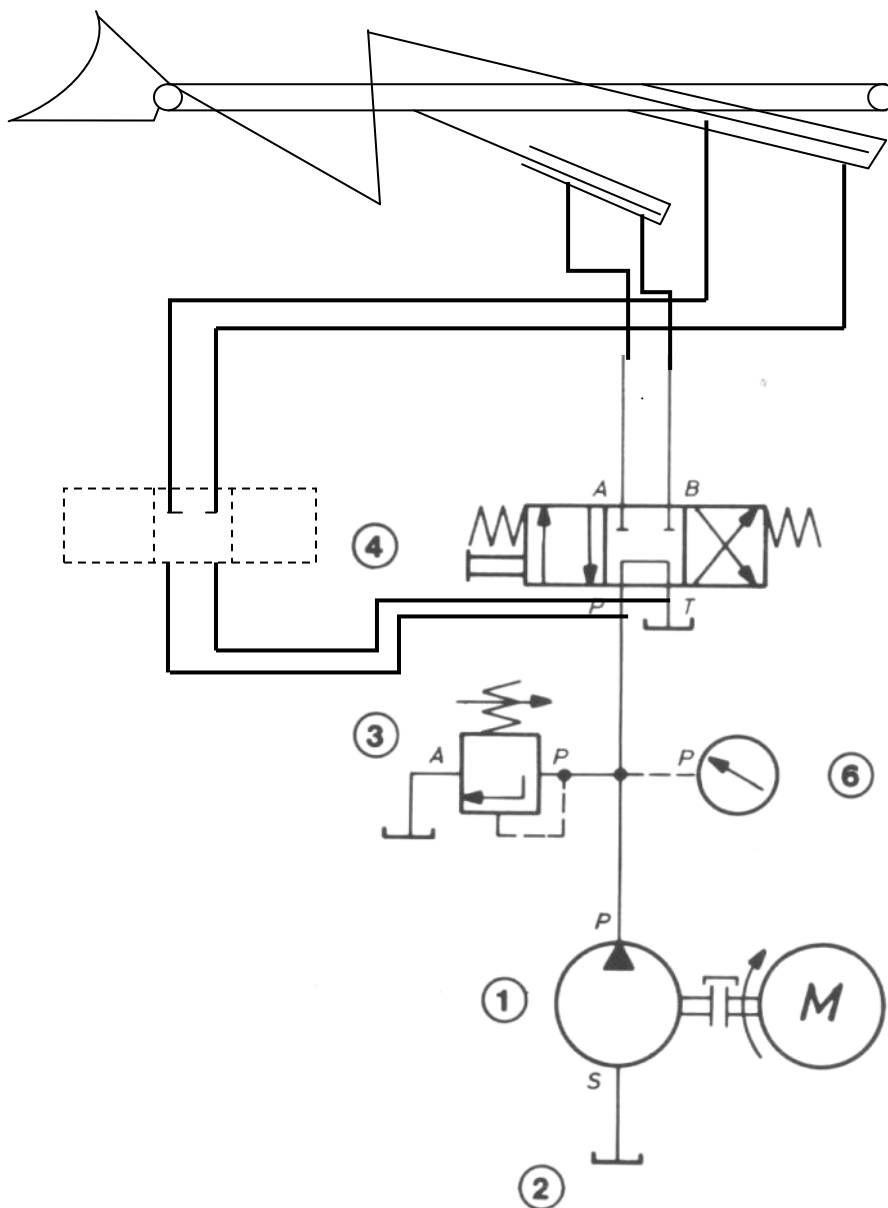


Figure 5.1. Schéma de la commande hydraulique de la pelleuse

faire un recensement des données nécessaires, ainsi que sur les notions de mode défaillance et de criticité.

Elle est réalisable dès la phase étude et se poursuit dans les phases ; développement, puis industrialisation.

Elle est orientée vers l'optimisation de la fiabilité. Elle permet notamment de définir les actions préventives et les dispositions d'après-vente.

5.1.1 Exemple d'application

Notre étude porte sur le système de commande hydraulique d'une pelleuse-chargeuse d'après le schéma de la figure 5.1 ce système est composé principalement de six sous-systèmes (godet, vérin, flexible, distributeur, limiteur de pression et pompe)

Modes de Défaillance, Analyse des Effets et de la Criticité de : circuit hydraulique									
AMDEC produit :		Référence :			Responsable :			Date :	
Nom produit :		Désignation :			Service :			Page :	
Système :			sous-système :			élément :			
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
N°	désignation	fonction	Mode de défaillance	λ	Effet de la défaillance	symptômes observables	Méthode de prévention	criticité	Recommandations et remarques
1.1	godet	Charger La matière	Rupture d'une Articulation	C	Perte de la fonction	visuel	Visite périodique	1	Maintenance préventive
2.1	Limiteur Pression du Godet	Limiter la Pression	Rupture du ressort	C	Fuite d'huile	Présence d'huile	changement systématique	3	Remplacement
2.2	//	//	Sortie Obstruée	A	Suppression et risque de	visuel	examen périodique	1	Nettoyage périodique

					fuite				
3.1	Flexibles Distributeur-verin	Véhiculer l'huile	Rupture du à la Fatigue	D	Godet n'est plus Actionné	Vérin actionné dans un seul sens	Changement Périodique	1	Remplacement Périodique
3.2	//	//	Rupture du à l'usure	D	//	//	//	1	//
4.1	Vérin du godet	Mouvoir Le Godet	-Fuite d'huile au Niveau du Joint	D	Le godet ne bouge pas	Fuite d'huile	Changement périodique des joints	1	Joints en Stock
4.2	//	//	-Fuite du à Tige abimée par Les chocs	C	//	Projection d'huile	Changement du Vérin	1	Examen Périodique
4.3	//	//	- rupture de fixation du à des chocs	B	//	visuel	Changement des axes de L'articulation	1	Axes en stock
5.1	Distributeur de godet	Commander les vérins du godet	-rupture du ressort distributeur	D	-Godet ne fonctionne plus	Levier Mou	Maintenance Préventive	1	-Ressorts en Stock
5.2	//	//	-fuite d'huile du distributeur	D	-Mauvais Fonctionnement du Godet	Présence d'huile	//	2	-changement systématique
5.3	//	//	-tiroir bloqué dans une position	B	-Godet ne bouge plus	levier bloqué	//	1	-joints en stock
5.4	//	//	Levier de commande détérioré	B	//	levier mou	Examen périodique	2	Distributeur en réserve
6.1	Pompe Hydraulique	Débiter L'huile	Manque de pression	C	Godet ne bouge pas	Débit nul	Examen périodique	3	Pompe en réserve

La matrice suivante de criticité met en exergue les éléments nécessitant davantage d'attention de la part du service de maintenance.

Tableau 5.1 *matrice de criticité de la commande hydraulique du godet*

Echelle D'occurrence Classe de Gravité	Quasi impossible	Très improbable	Improbable	Possible
	A	B	C	D
Sans Influence 4				
Peu Critique 3			2-1 6-1	
Critique 2		5-4		5-2
Très critique 1	2-2	1-3 2-3	4-2 1-1	5-1 3-2 4-1 3-1

Il est demandé donc de se pencher davantage sur les problèmes liés aux repères suivants : 5-1, 4-1, 3-1, 3-2 un peu moins sur ceux liés aux numéros 5-2, 4-2, 1-1 et encore moins sur ceux liés aux repères 1-3, 2-3. On peut établir une liste des points critiques et consigner les tâches de prévention adéquates voir tableau 5.2.

Tableau 5.2 liste des points critiques

repères	Points critiques	Préventions
3-1	Flexibles distributeur-vérin	Changement périodique
3-2	Flexibles distributeur-vérin	Changement périodique
4-1	Joints du vérin du godet	Prévoir des joints en stock
5-1	Ressort du distributeur de godet	Prévoir des ressorts en stock
1-1	Articulation godet	Examen périodique
4-2	Tige du vérin du godet	Examen périodique
5-2	Joints de distributeur du godet	Prévoir des joints en stock

5.2 Arbre de défaillance

Souvent utilisé en conjonction avec l'AMDEC, c'est une sorte d'organigramme ou de schéma pour flux permettant de décrire comment un dispositif peut être indisponible ou défaillant, c'est une représentation statique du système.

Elle consiste à considérer une défaillance donnée du système et à construire d'une manière arborescente l'ensemble des combinaisons de défaillance des composants mises en jeu (comportement binaire des événements élémentaires). L'évènement indésirable est au sommet de l'arbre. La figure 3.2. représente les symboles les plus courants.






symbole	signification
	Evènement ou condition
	Evènement élémentaire ne faisant plus l'objet d'analyse
	Porte « OU »
	Porte « ET »
	Renvoi à une autre page

Figure 5.2. Symboles utilisés pour arbres de défaillance

Dans notre cas le sous-système qui fait l'objet de cette étude est le godet de la pelleuse-chargeuse, en effet grâce à cet outil il est possible, connaissant les spécificités du système, d'interpréter les symptômes qui apparaissent sur la machine. Les principales anomalies sont éliminées rapidement

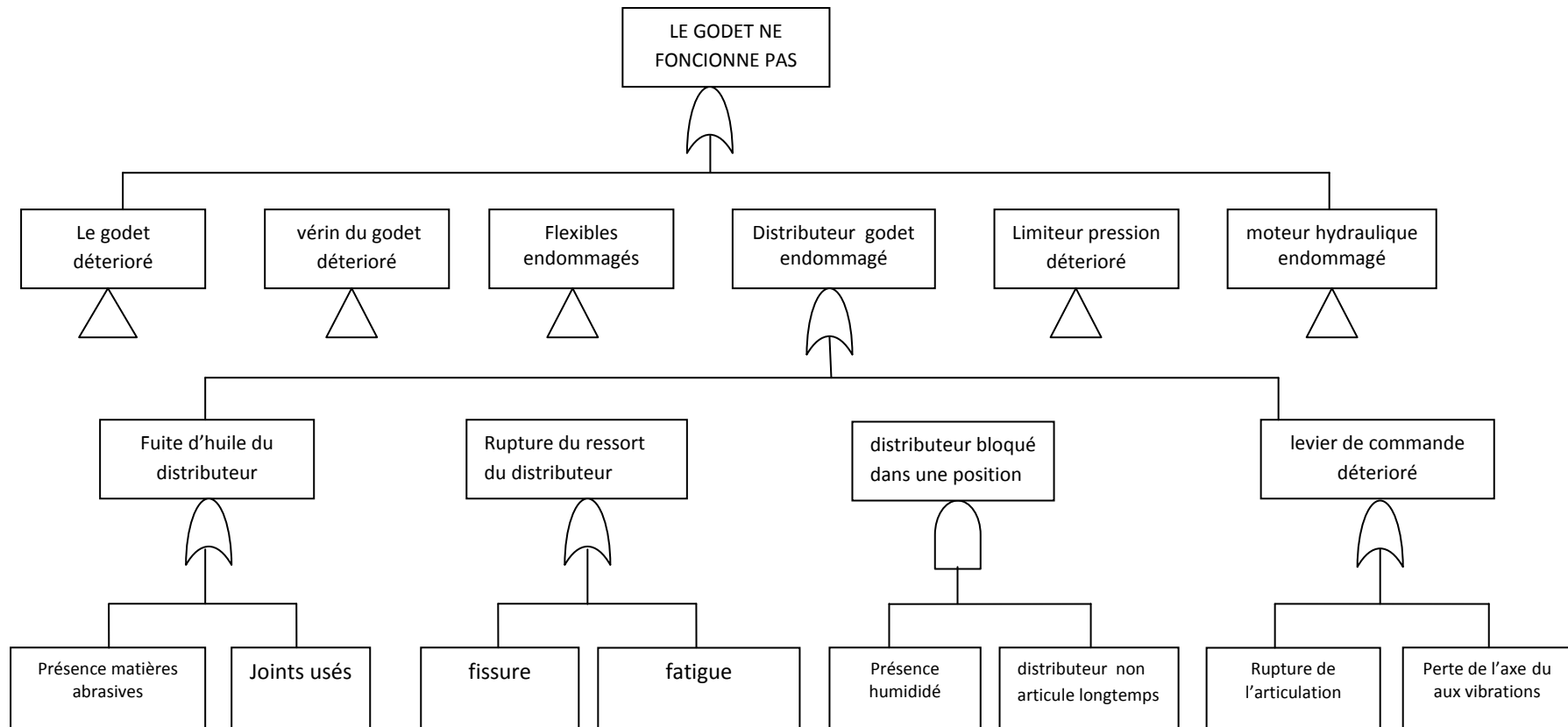


Figure 5.3. Arbre de défaillance relatif à la commande hydraulique de la pelle

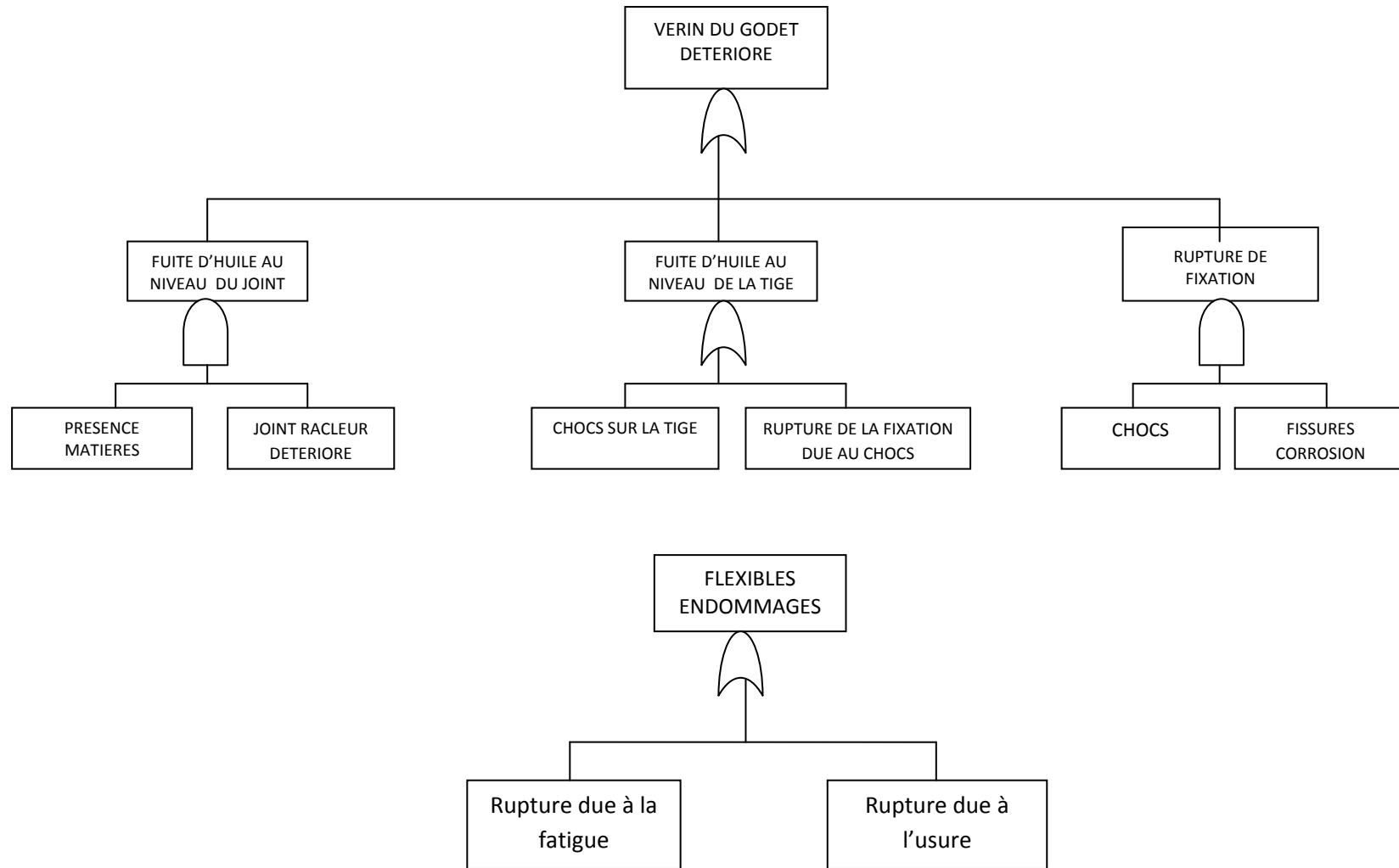


Figure 5.3. Arbre de défaillance relatif à la commande de la pelle (suite)

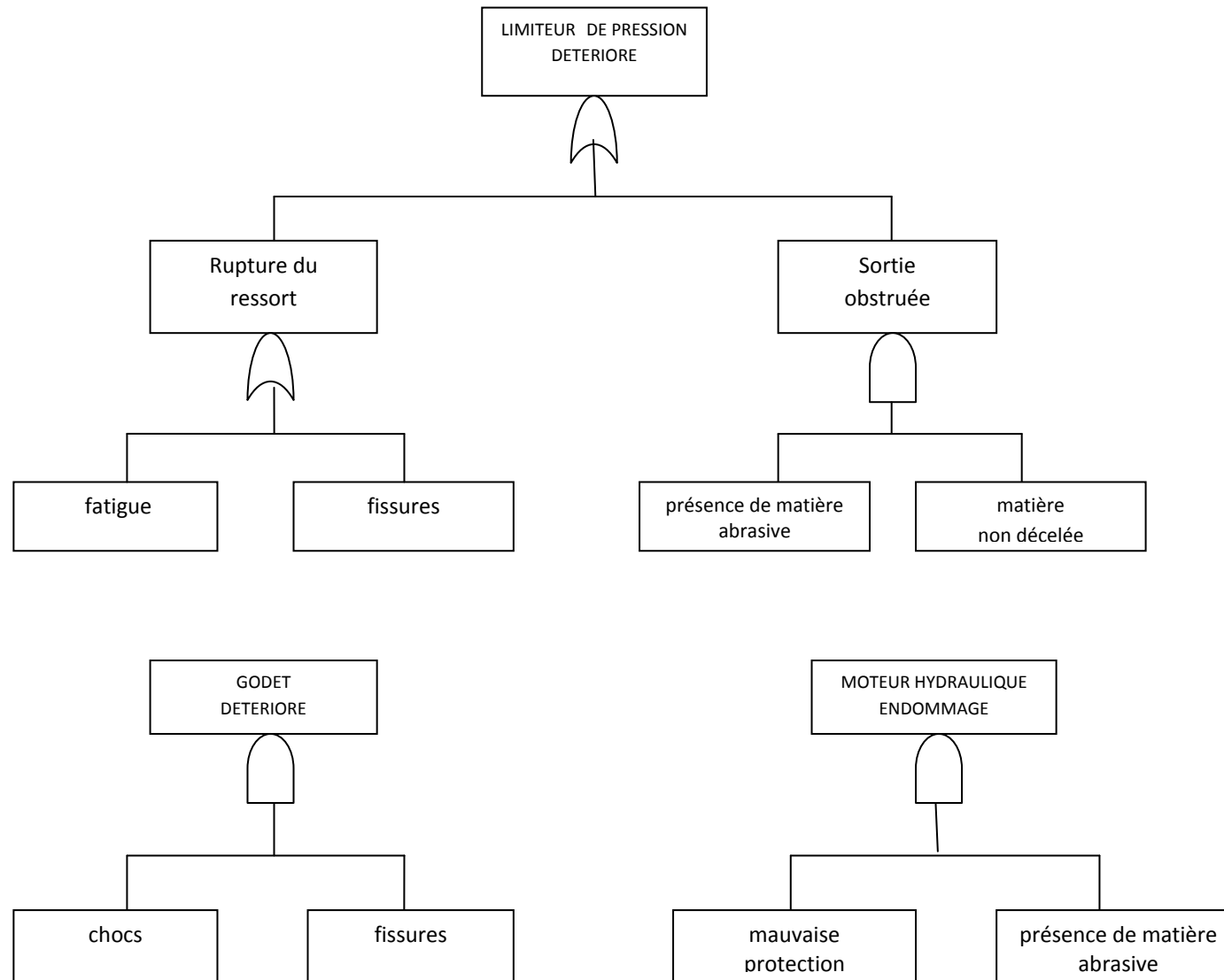


Figure 5.3. Arbre de défaillance relatif à la commande de la pelle (suite)

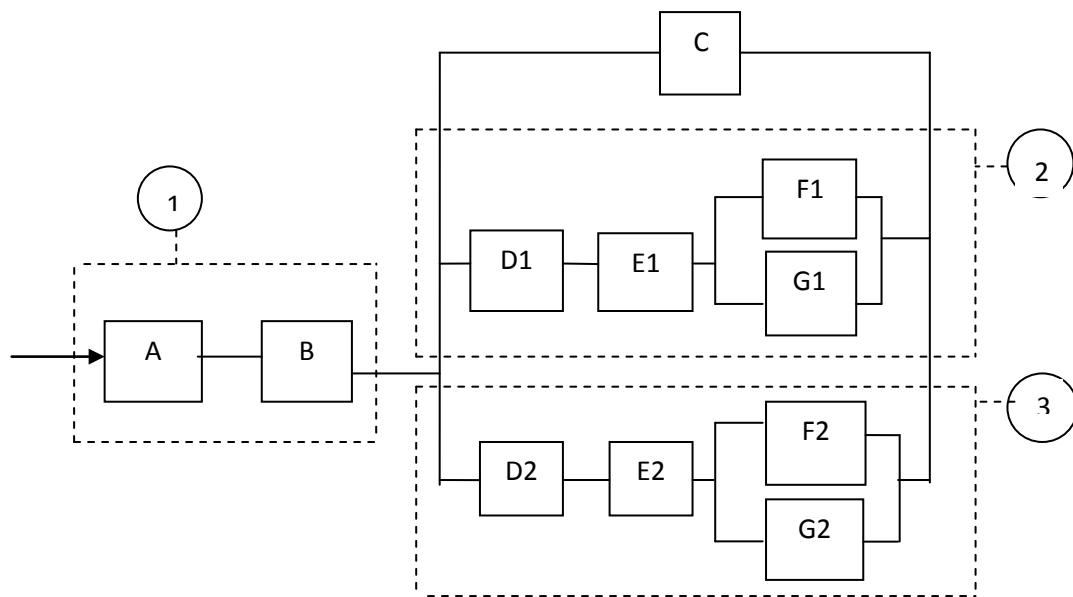


Figure 5.4. Bloc diagramme de fiabilité de la commande hydraulique

Nous avons un système hydraulique sous sa forme la plus simple voir schéma 5.1 [38] une pompe 1 avec un débit constant aspire le fluide d'un réservoir 2 et le refoule dans l'installation. Dans la position médiane du distributeur 4 à commande manuelle on a presque une circulation sans pression du fluide depuis la pompe vers le réservoir 2. En actionnant le distributeur le fluide arrive dans la chambre du piston 5. La vitesse de sortie s'établit en fonction du débit de la pompe et du diamètre du vérin. La pression max et en conséquence, la possibilité de charge du système hydraulique, est réglée sur le limiteur de pression 3.

La figure 5.4 représente le système d'un point de vue fiabilité d'où Le bloc diagramme fiabilité.

Dans cette configuration nous avons retenu seulement les éléments considérés dans l'arbre de défaillance et qui ont présentés une certaine vulnérabilité par rapport aux autres éléments. Nous avançons l'hypothèse que tout les éléments sont soumis à la loi exponentielle.

Dans notre étude nous avons envisagé deux cas : le système hydraulique avec les distributeurs branchés en série d'un point de vue fonctionnel (bloc 2 et 3)

Dans le cas où les distributeurs sont branchés en parallèle le schéma est presque le même, les seuls blocs qui diffèrent sont 2, 3 et sont remplacés par des blocs de type 4 voir figure 5.5. en ayant $D=D_i$; $E=E_i$; $F=F_i$; $G=G_i$.

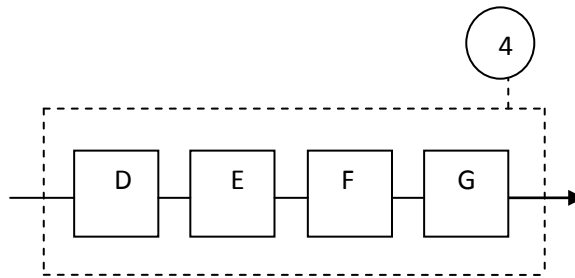


Figure 5.5. bloc diagramme pour le branchement série

5.3 Problématique

Lorsque un système ou sous-système comportant des éléments identiques et se présentant sous différentes configurations et quand un élément est critique au fonctionnement du système à un temps t de la vie du système.

La mesure de l'importance de Birnbaum permet de définir cette valeur critique.

Nous estimons la fiabilité de chaque élément (de 1 à 8) comme suit :

$$R_i(t) = e^{-\lambda.t} \quad (5.1)$$

$$R_A(t) = e^{-0.0003 t}$$

$$R_B(t) = e^{-0.000005t}$$

$$R_C(t) = e^{-10^{-6}t}$$

$$R_D(t) = e^{-0.2.10^{-6}t}$$

$$R_{E_1}(t) = e^{-20.10^{-6}t}$$

$$R_{E_2}(t) = e^{-20.10^{-6}t}$$

$$R_F(t) = e^{-0.5.10^{-6}t}$$

$$R_G(t) = e^{-15.10^{-6}t}$$

de la configuration 1

$$R_{FGi} = 1 - (1 - R_{Fi})(1 - R_{Gi}) \quad (5.2)$$

de même

$$R_{DEFGi} = R_{Di} \times R_{Ei} \times R_{FGi}$$

La fiabilité du système est :

$$R_{sys} = R_A \cdot R_B \cdot [1 - (1 - R_c)(1 - R_{DEFG1})(1 - R_{DEFG2})] \quad (5.3)$$

de la configuration 2 :

$$R_{DEFG} = R_D \cdot R_E \cdot R_F \cdot R_G$$

$$R_{sys} = R_A \cdot R_B \cdot [1 - (1 - R_c)(1 - R_{DEFG})^2] \quad (5.4)$$

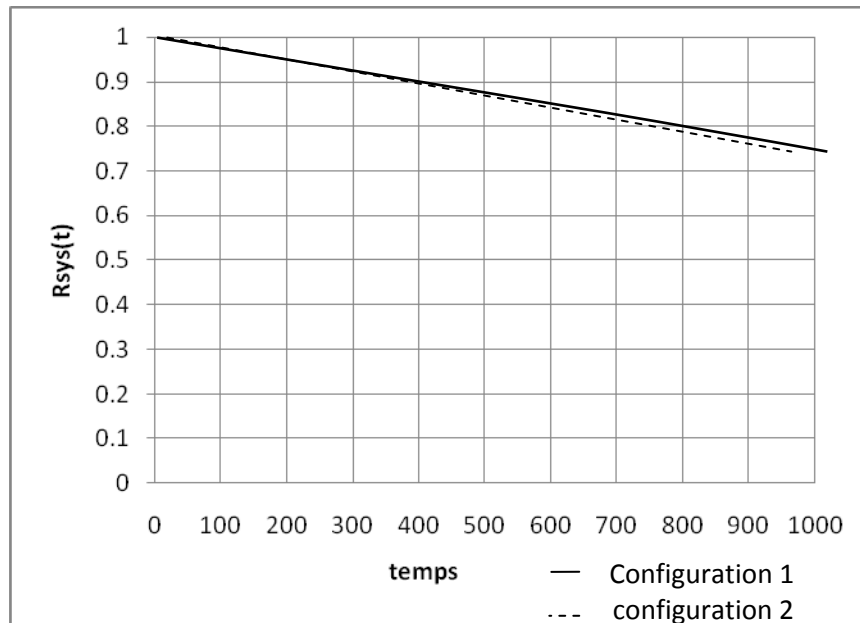


Figure 5.6. fiabilités du système en fonction du temps

Evidemment la fiabilité du système régresse dans le temps voir figure 5.6.

Dans l'estimation de l'importance d'un composant, la plupart des méthodes sont basées en observant la fiabilité (ou non fiabilité) du système quand le composant fonctionne correctement et quand il ne l'est pas. Ces fiabilités sont alors conjointement manipulées algébriquement avec la fiabilité des composants pour obtenir des mesures différentes de l'importance. Dans la littérature il existe plusieurs mesures de l'importance ; celle de Birnbaum, Fussell-vesely, Barlow-Prochan[12,13 et 42] etc.

Dans notre cas nous nous intéressons à la fiabilité (ou probabilité de défaillance) de l'élément critique du système hydraulique de la pelle après un certain temps de travail. Ce qui correspond bien à l'approche de Birnbaum.

5.4 Mesure de l'importance de Birnbaum

Soit un système de n composants $N = (1,2,\dots,n)$, le système et les composants peuvent être dans deux états, opérationnels ou non noté 0 ou 1.

L'état du système dépend uniquement de l'état de ses composants

Soit $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ le vecteur aléatoire représentant l'état des composants, ou X_i est la variable aléatoire indiquant l'état du composant i à l'instant donné.

Et $X_i = 0$ ou $X_i = 1$ Soit $\Phi(X)$ la fonction structure du système , $\Phi(X) = 0$ signifie que le système fonctionne $\Phi(X) = 1$ ne fonctionne pas pour $i = 1, 2, \dots, n$. X_1, X_2, \dots, X_n sont des variables aléatoires binaires distribuées indépendamment

Avec $p[X_i = 1] = q_i$ dans ce cas $E[\Phi(X)]$ est une fonction de $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$

Soit $G(q) = E[\Phi](X)$ alors $G(q)$ - est appelée fonction de non fiabilité (ou indisponibilité) du système.

$I_B^i(t)$ du composant i_i est définie pour être la fiabilité que le i^{eme} composant est critique au fonctionnement du système au temps t . elle peut être exprimée comme :

$$I_B^i(t) = \frac{\partial G(q(t))}{\partial q_i(t)} = G(1_i, q(t)) - G(0_i, q(t)) \quad (5.5)$$

Or

$$I_B^i(t) = \Delta G_i(t)$$

Ou $G(1_i, q(t))$ est l'indisponibilité du système quand i ne fonctionne pas

$$G(0_i, q(t)) \text{ est } // // i \text{ fonctionne}$$

5.4.1 Application numérique

5.4.1.1 configuration 1 :

Branchement de 2 éléments en série et de 2 en parallèle voir figure 5.4.

$$\lambda_D = 0.2 \times 10^{-6} ; \lambda_E = 20 \times 10^{-6} ; \lambda_F = 0.5 \times 10^{-6} ; \lambda_G = 15 \times 10^{-6}$$

Nous estimons la probabilité de défaillance pour un temps $t = 1000$ heures

$$q_1 = 1 - R_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t} = 1.99 \times 10^{-4}$$

$$q_2 = 0.0198$$

$$q_3 = 4.99 \times 10^{-4}$$

$$q_4 = 0.0148$$

$$\phi(X) = (X_1 \vee X_2) \vee (X_3 \wedge X_4) \quad (5.6)$$

ou

\vee est le OU opérateur Booléen

\wedge est le ET opérateur Booléen

$$\phi(X) = [1 - (1 - X_1)(1 - X_2)] \vee (X_3 X_4)$$

or

$$\phi(X) = X_1 + X_2 - X_1 X_2 + X_3 X_4 - X_1 X_3 X_4 - X_2 X_3 X_4 + X_1 X_2 X_3 X_4$$

et

$$G(q) = q_1 + q_2 - q_1 q_2 + q_3 q_4 - q_1 q_3 q_4 - q_2 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 \quad (5.7)$$

Les mesures d'importance de Birnbaum sont :

$$I_B^1(t) = 1 - q_2 - q_3 q_4 + q_2 q_3 q_4 = 0.979$$

$$I_B^2(t) = 1 - q_1 - q_3 q_4 + q_1 q_3 q_4 = 0.998^{**}$$

$$I_B^i(t) = q_4 - q_1 q_4 - q_2 q_4 + q_1 q_2 q_4 = 0.0145$$

$$I_B^i(t) = q_3 - q_1 q_3 - q_2 q_3 + q_1 q_2 q_3 = 4.89 \times 10^{-4}$$

5.4.1.2 configuration 2 :

Branchement en série de tous les éléments voir figure 3.5.

$$q_1 = 1 - R_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t} = 1.99 \times 10^{-4}$$

$$q_2 = 0.0198$$

$$q_3 = 4.99 \times 10^{-4}$$

$$q_4 = 0.0148$$

La fonction structure est obtenue comme suit :

$$\phi(X) = 1(1 - X_1)(1 - X_2)(1 - X_3)(1 - X_4) \quad (5.8)$$

Et

$$G(q) = 1(1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4) \quad (5.9)$$

Les mesures d'importance de Birnbaum pour les éléments de 1 à 4 sont obtenus en utilisant l'équation (5.5) à $t = 1000h$.

$$I_B^1(t) = (1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4) = 0.964$$

$$I_B^2(t) = (1 - q_1)(1 - q_3)(1 - q_4) = 0.984^{**}$$

$$I_B^3(t) = 0.965$$

$$I_B^4(t) = 0.979$$

*** indique la valeur maximale de la mesure d'importance de Birnbaum*

L'élément 2, en l'occurrence, le distributeur a la plus grande mesure d'importance, en conséquence il a tout l'impact sur la fiabilité de l'ensemble du système. Cela confirme les résultats de l'étude précédente AMDEC ou ces

éléments méritent toute l'attention de la part des maintenanciers (voir le tableau 3.1 de matrice de criticité de la commande hydraulique du godet).

Cependant à un stade de conception d'un équipement, le designer peut remplacer l'élément par un autre ayant un taux de défaillance plus petit ou il peut ajouter un élément redondant. Mais durant son exploitation, les recommandations établies par l'AMDEC s'avèrent plus efficaces.

CONCLUSION

Ce chapitre est la suite de celui précédent, après la modélisation du mécanisme de levage de la pelleteuse chargeuse qui nous a permis la détermination et le choix des paramètres constructifs optimaux du système, sous une autre vision celle d'un mécanicien, nous avons essayé de préserver la fiabilité de l'ensemble du système durant toute son exploitation.

En effet nous avons abordé l'étude par l'analyse AMDEC qui nous a permis de déceler les éléments vulnérables du système, chaque composant est pris séparément, en envisageant divers modes de dégradation, on peut établir les points critiques, faire des propositions d'amélioration et prévoir un plan d'action des opérations de maintenance corrective ou préventive en établissant des recommandations visant à mettre en place un suivi efficace de tout le système, ensuite par un concept de fiabilité en utilisant une méthode de mesure de l'importance des composants nous avons pu confirmer les résultats obtenus.

Dans l'estimation de l'importance des composants, la méthode suppose que ces derniers peuvent être en bon état ou non, et elle permet de déterminer l'élément critique au fonctionnement du système pendant un temps donné pour différentes configurations possibles.

Conclusion Générale

Nous avons abordé dans cette thèse un ensemble de problématiques qui porte sur la modélisation de système et de processus dans une entreprise. Nous avons développé des modèles de bases de systèmes d'aide à la décision pour la gestion de processus de maintenance.

Il découle de la littérature que maintenir un système de production exige des ressources humaines compétentes, des outils et du matériel adaptés aux équipements et aux installations à maintenir, un système de gestion de pièces de rechange et un système d'information bien réfléchi. Seul l'ensemble des actions menées à bien indissociablement permet une réussite totale du processus.

Les travaux présentés dans cette thèse exposent une méthodologie qui associe à la fois les critères stratégiques aux critères techniques et économiques.

L'introduction générale nous a permis de situer l'importance des stratégies de maintenance dominée par la recherche permanente de l'amélioration des systèmes de production. Cette constatation nous a amenés à réaliser une étude bibliographique comparative des méthodes analytiques existantes. Ces dernières ne sont pas toujours facilement adaptées aux problèmes industriels concrets. D'où la nécessité de développer de nouvelles approches proposées dans les chapitres de cette thèse.

Nous tenons une seconde fois à préciser le caractère général des modèles mathématiques développés. Ils ne sont pas restreints aux sujets traités et peuvent être appliqués à d'autres cas de figure. Le choix de ces derniers est lié au respect de la thématique proposée.

Dans les chapitres 1 et 2 nous avons présenté des méthodes de stratégie de maintenance liée à des problèmes techniques ce qui a permis l'intégration de critères économiques et techniques dans les modèles élaborés. Les méthodes proposées présentent l'avantage d'être simples applicables à tous systèmes faisant intervenir la contrainte économique.

Dans le chapitre 3, nous avons montré comment l'analyse markovienne peut être utilisée dans la modélisation et l'analyse de problèmes par une définition de ratios de maintenance corrective / maintenance préventive, en posant les bases d'une étude d'optimisation sous contraintes technico-économiques.

Dans le chapitre 4, nous avons développé une approche de modélisation des systèmes à géométrie variable qui permet l'optimisation du mécanisme hydraulique de la pelle d'après le critère du minimum de l'effort dans le vérin. Cette conséquence offre des performances techniques meilleures ce qui permet une réduction de la masse des parties composantes et un gain de temps considérable dans la durée de cycle de la machine.

Le chapitre 5 est la suite du chapitre précédent. Nous avons pu mettre en application un certain nombre de techniques (outils d'aide à la décision) et méthodes (mesure de Birnbaum) dans l'estimation et l'évaluation de la fiabilité des systèmes. Nous avons pu déceler les parties vulnérables du système de commande hydraulique du godet de la pelleuse, et par conséquent proposer des solutions adéquates.

Les perspectives à envisager sont de deux ordres : les extensions d'ordre plus général qui ont lien avec la discipline de maintenance et les seconds qui sont directement liées au travail présenté dans ce mémoire.

Les extensions possibles sont :

- La première extension présentée aux chapitres 1 et 2 consiste à élargir le modèle aux cas des stratégies modifiée et opportuniste et envisager de les intégrer dans une méthode de maintenance par groupe. Un cas qui s'adapte bien aux industries de grande envergure.
- Une extension de ce travail présentée au chapitre 3 est de considérer le cas d'une maintenance imparfaite correspondant à la situation où, à la suite d'une intervention préventive, le système n'est pas remis dans l'état nominal. Cette situation est très répandue : les pièces d'usure et les organes soumis aux phénomènes de fatigue étant nombreux sur la plupart des équipements des systèmes manufacturiers, les actions de maintenance préventive ne peuvent pas, pour raisons économiques ou de temps, remettre après chaque intervention l'équipement à l'état neuf.

Cette extension du travail à des cas plus proches de la réalité montre l'applicabilité de la méthode et sa souplesse en fonction du cas considéré.

- Une autre extension de ce travail présentée dans les chapitres 4 et 5 : il serait intéressant d'utiliser les méthodes des éléments finis dans l'étude des systèmes à géométrie variable du mécanisme de levage de la pelleteuse, les modèles obtenus permettront une meilleure lecture du comportement de la structure du système.

Finalement, cette thèse ouvre la voie à un ensemble de sujets et devrait servir à l'avancement des connaissances dans le domaine de la gestion de la maintenance

Bibliographie

- [1] AFNOR Norme, ‘ *Statistique et Qualité , introduction à la fiabilité* ’, X NF, 06-501, Novembre (1977).
- [2] Ait-kadi. D, CLÉROUX. R, ‘ *Optimal bloc replacement policies with multiple choice at failure* ’, *Naval Research Logistic*, Vol. 35, pp. 99-110, (1988).
- [3] Ait-kadi. D, BEAUCAIRE. C et CLÉROUX. R, ‘ *A Periodic Maintenance Model with Used Equipment and Random Minimal Repair* ’, *Naval research Logistics*, Vol. 35, No.3, pp. 855-865, (1990).
- [4] Ait-kadi. D, ‘ *Pour une conception au juste nécessaire* ’, Rapport technique, Département Génie Mécanique, (1998).
- [5] ait-kadi. D, ‘ *La Gestion de la Maintenance : Concept, outils et stratégie d’implantation* ’, Notes de cours, Université Laval, (1999).
- [6] Ait-kadi. D, ‘ *Les stratégies de maintenance préventives pour la maximisation de la disponibilité des systèmes* ’, Proceedings 3thd International conference, Industrial automation, Montréal, pp. 1.13 – 1.16, (1999).
- [7] Ait-kadi. D, ‘ *La Fiabilité des systèmes* ’, Notes de cours, Département Génie Mécanique, Université Laval, (2000).
- [8] Alexandre. P, ‘ *technique de l’ingénieur* ’(1980)
- [9] Bachta. T, ‘ *Commande hydraulique et hydro-pneumo-automatique* ’, (1972),
- [10] Banerjee PK.et Nichuiv N. ‘ *Inspection policies for repairable systems* ’, , *IIE Transactions*.28(12):1003-1010 - ISSN 0569-5554 (1996)
- [11] Barlow. R.E. et Hunter ‘ *Optimal preventive maintenance policies* ’, *Operation research*, 890-100. (1960)
- [12] Barlow. R.E. et Proschan ‘ *Mathematical Theory of Reliability* ’, John Wiley & Sons Inc., New York. (1965)

- [13] Barlow, R.E. et Proschan '*Planned Replacement*', Studies in Applied Probability & Management Science, Arrow, Karlin and Svarf Edition, Stanford University Press, CA.
- [14] Chapouille. P et De pazzis. R, '*Fiabilité des systèmes*', Edition Masson, Paris, (1968).
- [15] Commission Electrotechnique Internationale, '*liste des termes de base, définitions et mathématiques applicables à la fiabilité*', Publications 271 (1974), 271A (1978), 271B (1983), 271C (1983)
- [16] Davidson. D '*case study of overhaul policy in power station boiler plant*' Thesis university strathclyde
- [17] Dictionnaire des industries Conseil International de la Langue française, (1986)
- [18] Feuvrier. CH '*la simulation des systèmes*' ed. Dundon
- [19] Gabay. A et Zemp. J '*engins de chantier*'
- [20] Industrie Minérale revue ;*les chargeuses transporteuses*
- [21] Jardine,A.K.S. '*determination of optimal maintenance times*'; the plant engineer
- [22] Jardine,A.K.S. '*maintenance replacement and reliability*'. New york (1973)
- [23] Jardine,A.K.S.and Buzacott, J.A '*Equipment reliability and maintenance*'. *European Journal of the Operational Research* (1985)
- [24] Jurgenson. D, Mc call. JJ et Radner. R '*optimal replacement policy*'
- [25] Lam. Y '*a note on the optimal replacement policy*'. Advanced applied probability (1988)
- [26] Lam, Y '*a repair replacement Model*'. Advanced applied probability (1990)
- [27] Love. CE, Guo. R. '*Utilizing weibull failure rates in repair limit analysis for equipment*'
- [28] Lust. T '*plate forme de modélisation de simulation et d'optimisation des actions de maintenance d'un système multi-composants*' (2005)

- [29] Lyonnet. P ‘*maintenance mathématique et méthodes*’ (1988).
- [30] Mischke C.R ‘*an introduction to computer- Aided design*’, (1968).
- [31] Monchy. F,’ *La fonction maintenance, formation à la gestion de la maintenance industrielle*’,Collection Technologies de l'Université à l'Industrie, Édition Masson, 1991.
- [32] Murthy D.N.P ‘*a note on block replacement policy*’. Journal of operational research society(1982).
- [33] Nakagawa. T. ‘*Optimum policies when preventive maintenance is imperfect*’, IEEE Transactions on Reliability R-28 4, p331-332. (1979).
- [34] Nakagawa. T., ‘*Optimal Number of Failure before Replacement Time*’. *IEEE Trans. Reliability*, vol.R-32(1), p.115-116. (1983b).
- [35] Nakagawa. T and Kowada, ‘*Analysis of a system with minimal repair and its application to replacement policy*’. *European journal of Operation Research*, Vol.12, p.176-182. (1983a).
- [36] Nelder. J.A et R. Mead. ‘*A simplex method for function minimization*’. The Computer Journal Vol. 7, p308-313. (1965).
- [37] Pérès. F, Noyes D, ‘*Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair*’,Quality and Reliability Engineering International, Vol 19, pp 129-148 February (2003).
- [38] Schmith. A ‘*le cours d’hydraulique*’ G.L Rexroth GmbH, lohr am Main
- [39] Stadje. W et Zuckerman. D ‘*optimal strategies for some repair replacement models*’. Advanced applied probability replacement preventive maintenance decisions” , , *Journal of the Operational Research Society*.47(11):1366-1376- ISSN 0160-5682 (1996).
- [40] Valdez-Flores. C et Feldman. R.M, ‘*An improved policy iteration algorithm for semi-Markov maintenance problems*’, , IIE Transactions, 24, 1, 55-63 (1992).
- [41] Vatn. J. ‘*Maintenance optimisation from a decision theoretical point of view*’. Reliability Engineering and System Safety 58, p119-126. (1997).

- [42] Vesely. W.E, '*Quantifying maintenance effects on unavailability and risk using Markov Modeling*', , Reliability Engineering and System Safety, 41, 2, 177-187 (1993).
- [43] Villemeur. A, '*Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité - Facteurs Humains – Informatisation*', Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, Édition Eyrolles, Paris, , No 67 (1988).
- [44] White. C.C et White. D.J, '*Markov decision processes*', , European Journal of Operational Research, 39, 1-16 (1989).
- [45] Woodman.RC, '*replacement policies for components that deteriorate*' Journal of the Operational Research Society
- [46] Zwingelstein. G, '*La maintenance basée sur la fiabilité*', HERMES, Paris, (1996).

Annexe 1

Calcul du coefficient du coût c (chapitre 1 page 26)

L'effet de la perte de l'efficacité de l'installation entraîne une augmentation de la consommation du combustible. L'estimation de l'existence du combustible en excès consommé est développée par Siegert.

La perte à travers la chaleur dégagée du

$$\text{combustible consommé} = \frac{K(t_2 - t_1)}{\% \text{ CO}_2 \text{ dégagé}}$$

ou $K = 0.35$ pour combustible

t_1 = température ambiante de l'air

t_2 = température des gaz sortants

les données requises sont :

i) Pourcentage CO_2 des gaz brûlés $= f$

ii) Valeur calorifique du combustible $= c$

iii) Prix par tonne de combustible $= p$

iv) Efficacité de l'installation $= e$

v) Enthalpie de la vapeur sortante
 $= E \text{ Btu/m}^3$

vi) Enthalpie de l'eau alimentant l'installation $= W \text{ Btu/m}^3$

Energie de combustible transféré pour alimenter de l'eau $= E - W$

Energie donnée par le combustible $= \frac{E - W}{e}$

Pourcentage de perte de fuel $= \frac{K.1}{f} \%$

Perte d'énergie de fuel par produit /°F $= \frac{E - W}{e} \times \frac{K.1}{f \times 100}$

Prix par tonne de fuel C coefficient de coût $= \frac{p(E - w)K}{ef \times 2,240 c \times 100}$

ou 2240 facteur de conversion m^3/tonne

Annexe 2

Le programme MINIOPTIM sert à l'optimisation du mécanisme de travail de la pelleuse chargeuse d'après le critère du minimum de pression dans le vérin hydraulique.

Données : $S(1)$, $S(2)$, W , L , (1) et (2)

Résultats d'exécution : A , B , β , T_{max} , $T=f(\varphi)$

Programme principal

```
EXTERNAL GOLD , COMB
EXTERNAL MERIT1, MERIT2
COMMON S(2),  $\varphi(2)$ ,A,B, $\beta$ ,W,L,K1,K2
REAL L,K1,K2
PI = 3.1415926
READ (105,200)NV
200 FORMAT (12)
DO 202 J = 1, NV
READ (105,201) W,L,S(1),S(2),  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ 
201 FORMAT (F10.3)
BTmin=1.0* $\varphi(2)$ 
BTmax= $\varphi$ - $\varphi(1)$ 
CALL GOLD(1,BTmin,BTmax,0.01,Tmax,BBEST, B3,B4,J5)
WRITE (108,104)
WRITE (108,105) A, B,  $\beta$ , Tmax
105 FORMAT (1X,'RESULTATS D'OPTIMISATION ',/1X,25
*(' '),/1X,'A=',F10.4,'M',/1X,'B=',F10.4,'M',/1X,' $\beta$ =',F10.4,
*'RAD',/1X,'TMAX,F10.4,'KN')
WRITE (108,104)
104 FORMAT(1X,25(' '))
WRITE (108,107)
107 FORMAT (4X,' $\varphi$ (rad)',4X,'CHARGE (KN)')
WRITE (108,104)
RANGE = ( $\varphi(2)$ - $\varphi(1)$ )/50.
DO 2 I= 1,51
 $\varphi$ = $\varphi(1)$ +RANGE*(I-1)
T=L*W*cos( $\varphi$ )*SQRT(K2-K1*cos( $\beta$ + $\varphi$ ))/(A*B*sin( $\beta$ + $\varphi$ ))
2 WRITE (108,106) $\varphi$ ,T
106 FORMAT (2,(2X,F10.3))
WRITE (108,104)
202 CONTINUE
STOP
END
```

Sous-programme merit-1

Il permet de déterminer la valeur Tmax

```
SUBROUTINE MERIT 1 (β,Tmax)
  External comb
  Common S(2),phi(2).A.B.BETA.W.L.K1.K2
  REAL L .K1 .K2
  DIMENSION B3 (2000) .B4(2000),
  B = BET
  K1 = (S(1)**2-S(2)**2/(cosβ+φ(2))-cos(β+φ(1)))
  K2 = K1*cos (β+φ(2))+S(2)**
  B = SQRT (ABS(K2**2-K1**2))
  B = SQRT (ABS(K2+B)/2.)
  A = K1*0.5/B
  Call comb(0,φ(1),φ(2),0.1,Tmax,B2,B3,B4,B5,B6,J5)
  Call comb(0, 0.1,Tmax,B2,B3,B4,B5,B6,J5,T6)
  Tmax = -1.0*Tmax
  RETURN
  END
```

Sous-programme merit2

Ce programme permet de déterminer l'effort dans le vérin hydraulique

```
SUBROUTINE MERIT 2 (φ,T)
  Common S(2), φ(2),A, B, β, W, L, K1, K2
  REAL L ,K 1, K2
  T = L*W*cos(φ)*SQRT (K2 - K1*cos (β + φ))/A*B*sin (β + φ)
  Return
  END
```

Sous-programme gold

Ce programme effectue le contrôle général du processus d'optimisation d'après β par la section d'OR

```
SUBROUTINE gold (K, XL, XR, F, YBIG, XL1, XR1, N)
  External merit1
  REAL L ,K 1, K2
  Go to 200
111 IF (K) 32, 31, 32
```

```

32 write ( 108, 33 )
33 format ( 'communication du programme GOLD' , //, '      N      Y1      Y2',
*,13X, 'X1              X2'//)
31 N = 0
XLEFT = XL
XRIGHT = XR
SPAN = XR - XL
DELTA = ABS ( SPAN)
14 X1 = XL + 0.381966*DELTA
X2= XL + 0.618034*DELTA
CALL merit1 (X1 , X2 )
Return
END

```

Sous-programme COMB

Ce programme exécute la recherche de la valeur de Tmax sur une multitude de déplacements

```

SUBROUTINE COMB (X, L, K, XL, XR, F, XBIG, YBIG, XL1, XR1, N)
External merit2
REAL L ,K 1, K2
Go to 100
111 IF (K) 21, 21, 22
22 write (108,23)
23 format ( 'communication du programme COMB' ,//, '      ordonnée
*abscisse      extremum' ,//)
21 N = 0
Ybig = 10.E50
XN = 2./F-1
NN = XN + 1.5
DELTA = (XR - XL) /XN
X(1) = XL
IF (NN - 2000 ) 30 , 30 , 31
31 NN = 2000
30 DO 20 I = 1 , NN
XX = X(I)
CALL merit2 (XX , YY )

```