



HAL
open science

Contribution à l'optimisation des stratégies de maintenance des systèmes

Abdelhakim Khatab

► **To cite this version:**

Abdelhakim Khatab. Contribution à l'optimisation des stratégies de maintenance des systèmes. Automatique. Université de Lorraine; École doctorale IAEM Lorraine - Informatique, Automatique, Électronique - Électrotechnique, Mathématiques de Lorraine, 2019. tel-02390698

HAL Id: tel-02390698

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02390698>

Submitted on 3 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Université de Lorraine

École doctorale IAEM : Informatique, Automatique, Électronique-Électrotechnique,
Mathématique

Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Automatique, Traitement de signal et des images, Génie informatique

CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DES STRATÉGIES DE MAINTENANCE DES SYSTEMES

Abdelhakim KHATAB

Maître de Conférences à l'Université de Lorraine, Lorraine-INP, ENIM

Soutenue le 27 novembre 2019 devant le jury :

Rapporteurs :

Prof. Valérie BOTTA-GENOULAZ INSA de Lyon
Prof. François PÉRÈS Université de Toulouse, INP-ENIT
Prof. Nouredine ZERHOUNI ÉNSMM de Besançon

Examineurs :

Prof. El-Houssaine AGHEZZAF Université de Gand (Belgique)
Prof. Claver DIALLO Dalhousie University, Halifax (Canada)
Prof. Khaled HADJHAMOU INSA de Lyon
Prof. Benoît IUNG Université de Lorraine
Prof. Nidhal REZG Université de Lorraine

*À ma mère
À la mémoire de mon père
À mon épouse et mes enfants
À toute ma famille
À tous mes amis*

Table des matières

Introduction générale	3
I Curriculum Vitae, résumé des activités de recherche scientifique, pédagogiques et administratives	5
1 Curriculum Vitae	7
1 État civil	7
2 Poste actuel	7
3 Formations académiques et diplômes	7
4 Expériences professionnelles	8
4.1 En France	8
4.2 Au Canada	8
4.3 Au Maroc	8
2 Résumé des activités de recherche scientifique	9
1 Travaux de recherche en qualité de doctorant, d'ATER et de Postdoctorant	9
1.1 Travaux de recherche liés à la thèse de doctorat	9
1.2 Travaux de recherche en qualité d'ATER	10
1.3 Travaux de recherche en qualité de Postdoctorant	10
1.4 Production scientifique relatives aux travaux de thèse, d'ATER et de Postdoctorat	11
1.5 Activités d'encadrements scientifiques	13
1.6 Responsabilités scientifiques liées à des projets de recherche	13
2 Travaux de recherche en qualité de MCF	14
2.1 Thématique et axes de recherche	14
2.2 Production scientifique en qualité de MCF	20
3 Autres activités de recherche menées en qualité de MCF	24
3.1 Travaux d'encadrements scientifiques	24
3.2 Évaluation de travaux et projets de recherche	27
3.3 Rayonnement et responsabilité scientifiques	28
4 Prime à la recherche scientifique et promotion	30
3 Résumé des activités pédagogiques et administratives	31
1 Introduction	31
2 Activités pédagogiques en qualité de MCF	31
2.1 Activité d'enseignement	31
2.2 Activités d'encadrements pédagogiques	32
2.3 Responsabilités pédagogiques	32
2.4 Autres activités liées à la pédagogie	32
3 Activités pédagogiques en qualité d'ATER	34
4 Activités pédagogiques en qualité de Postdoctorant	34
5 Activités pédagogiques en qualité de Professeur assistant au Maroc	34

II Synthèse des activités de recherche en qualité de MCF	35
Introduction	36
1 Cadre et objectif généraux	37
2 Travaux de recherche : une sélection de problématiques	38
2.1 Problématiques liées à l'axe A_1 : Stratégies de maintenance des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et dans un contexte de développement durable	38
2.2 Problématiques liées à l'axe A_2 : Modélisation et analyses de performances des systèmes complexes multi-mission	39
2.3 Problématiques liées à l'axe A_3 : Planification intégrée de la production et de la maintenance des systèmes de production	41
3 Organisation de la Partie II	42
4 Stratégies de maintenance des systèmes sous différents environnements d'exploitation	45
1 Introduction	45
2 Modèle probabiliste d'optimisation du coût de maintenance	47
3 Modèle d'optimisation statistique du coût de maintenance	48
4 Résultats numériques	50
5 Conclusion	54
5 Stratégies de maintenance des systèmes de seconde main	57
1 Introduction	57
2 Définition et modélisation mathématique du problème	58
2.1 Coûts d'acquisition et de remanufacturing	59
2.2 Coût de maintenance	60
2.3 Durée moyenne $\mathbb{E}(\mathcal{T})$ d'un cycle de remplacement	62
3 Le modèle d'optimisation	62
4 Exemples numériques	64
4.1 Structures des coûts d'acquisition et de remanufacturing	64
4.2 Expériences numériques	68
5 Conclusion	72
6 Stratégies de garantie basées sur des pièces de rechange neuves et reconditionnées	75
1 Introduction	75
2 Définition et modélisation mathématique du problème	77
2.1 Fonction de fiabilité pour une population mixte	78
2.2 Nombre moyen de remplacements durant la période de garantie et par unité vendue	78
2.3 Coût d'acquisition des composants de rechange	79
2.4 Fond de réserve	79
2.5 Coût unitaire total et bénéfice par produit vendu	80
2.6 Volume des ventes versus la demande totale en produit neuf	80
2.7 Coût de récupération	81
3 Le modèle d'optimisation du bénéfice total net moyen	81
4 Expériences numériques : résultats et discussions	81
4.1 Impact du ratio η	83
4.2 Impact du paramètre de forme β de la distribution Weibull	84
4.3 Impact de la période de garantie ω	86
4.4 Impact du coût de récupération S_1	86
5 Conclusion	88
7 Maintenance sélective tenant compte de la qualité stochastique des actions de maintenance	89
1 Introduction	89
2 Description du système, et modèles de temps et de couts maintenance	91
3 Modélisation de la qualité d'un niveau de maintenance imparfaite	92
4 Évaluation de la fiabilité de la mission suivante	94

5	Le problème d'optimisation stochastique de la MS	96
5.1	Coût total en maintenance	96
5.2	Temps total en maintenance	97
6	Exemples numériques	98
6.1	Expérience 1 : cas d'un système avec un seul composant	98
6.2	Expérience 2 : cas d'un système multi-composant	100
7	Conclusion	102
8	Maintenance conditionnelle sélective des systèmes multi-composant	103
1	Introduction	103
2	Description du système	105
2.1	Modèle de dégradation du composant	105
2.2	Fiabilité d'un composant à opérer la prochaine mission	106
3	Niveaux de maintenance des composants : structures des durées et des coûts	107
4	Modélisation mathématique du problème de la CBSM	108
4.1	Coût total et temps requis en maintenance pendant la durée de l'arrêt	109
4.2	Coût total moyen d'inspection durant la prochaine mission	109
4.3	Coût total moyen de pénalité	110
4.4	Modèle d'optimisation CBSMP	111
5	Résultats numériques	111
5.1	Exemple 1 : cas d'un système réduit à un seul composant	112
5.2	Exemple 2 : cas d'un système série-parallèle	113
5.3	Exemple 3 : Impact des ressources en maintenance	114
6	Conclusion	116
9	Optimisation intégrée de la production et de la maintenance imparfaite d'un système de production	117
1	Introduction	117
2	Modèle de planification intégrée de la production et de la maintenance préventive imparfaite	119
3	Reformulation linéaire du problème IPImPMPP	123
4	Méthode de résolution	124
5	Exemples numériques	127
6	Conclusion	128
III	Projet de recherche et Conclusion générale	130
10	Projet de recherche	132
1	Introduction	132
2	Perspectives des travaux de recherche	133
2.1	Stratégies de maintenance des systèmes complexes	133
2.2	Planification intégrée des stratégies de production et de maintenance	136
2.3	Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation	137
3	Perspectives de collaboration, de responsabilité et de rayonnement scientifiques	138
3.1	Perspectives de collaborations scientifiques	138
3.2	Perspectives de responsabilité et rayonnement scientifiques	141
4	Conclusion	142
	Conclusion générale	144

Liste des figures

4.1	La fonction de fiabilité sous deux environnements d'exploitation	48
4.2	Fiabilités théoriques et estimées dans les deux environnements : cas de l'estimateur J-Sh .	51
4.3	Fiabilités théoriques et estimées dans les deux environnements : cas de l'estimateur Log .	51
4.4	Expected total maintenance cost rate time : case where $n = 500, T_1 = 5$	52
4.5	Intervalle de confiance estimé pour l'âge optimal de remplacement \hat{T}_0 versus T_1 : cas de l'estimateur Log et $n = 1000$	53
4.6	Intervalle de confiance estimé pour l'âge optimal de remplacement \hat{T}_0 versus T_1 : cas de l'estimateur J-Sh et $n = 1000$	53
5.1	Évolution du taux de pannes du système sujet à une maintenance préventive imparfaite. .	61
5.2	Le ratio $\frac{C_{up}(\alpha, u)}{C_{up0}}$ versus le paramètre d'amélioration α : cas où $\varphi = 0.22$	66
5.3	Exemple des coûts d'acquisition et de remanufacturing	67
5.4	Représentation du coût $C_{Aup}(\alpha, u)$ en fonction de l'âge initial u pour différentes valeurs de α	67
5.5	Le coût total moyen par unité de temps $C(R_0, u^*, \alpha^*, N)$ versus le nombre N de cycles : cas de l'Expérience 1.	69
5.6	Solutions optimales pour différentes valeurs de l'âge initial u	73
6.1	Courbes paramétrées du profit total moyen : cas où $\omega^* = 0.27$ et $p^* = 9.45$	82
6.2	Surfaces et Contours paramétrés du profit total moyen : cas où $\omega^* = 0.27$ et $p^* = 9.45$. .	83
6.3	Solutions optimales pour différentes valeurs de η	84
6.4	Solutions optimales pour différentes valeurs de β	85
6.5	Solutions optimales pour différentes valeurs de S_1	87
7.1	Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas où $\mu_{\Phi_{ijl}} = 0$ et $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.01$	93
7.2	Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas où $\mu_{\Phi_{ijl}} = 1$ et $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.20$	94
7.3	Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas des niveaux intermédiaires de maintenance imparfaite.	94
7.4	Fonctions de densité des coefficients Φ_{ijl} intermédiaires de réduction d'âge : cas de l'expérience 1.	99
7.5	Système série-parallèle de l'expérience 2.	100
8.1	Variations de la fiabilité conditionnelle optimale du système vs les ressources en maintenance.	115
9.1	Exemple illustratif d'un plan de MP avec des set-up de production.	121

Liste des tables

2.1	Quantification de la production scientifique : période avant MCF	11
2.2	Quantification de la production scientifique : période de MCF	21
2.3	Informations relatives aux publications parues dans les revues internationales et référencées JCR : période de MCF	21
2.4	Liste des revues auxquelles j'ai participé en tant qu'évaluateur.	27
2.5	Liste des conférences auxquelles j'ai agi comme évaluateur.	28
2.6	Liste des collaborations internationales et nationales	29
3.1	Principales matières dispensées au niveau M2 : MCF à l'Université de Lorraine.	33
3.2	Principales matières dispensées : ATER à l'INSA de Lyon.	34
4.1	Paramètres de génération des données de durées de vie.	52
4.2	Valeurs optimales théoriques et estimées de l'âge de remplacement	54
4.3	Valeurs optimales théoriques et estimées du coût total moyen de maintenance par unité de temps.	55
5.1	Intervalles optimaux de MP : cas de l'Expérience 1.	69
5.2	Valeurs optimales de α , u , R_0 et N : cas de l'Expérience 2	69
5.3	Optimal PM intervals : cas de l'Expérience 2	70
5.4	Impact du remanufacturing sur les stratégies d'acquisition et de maintenance.	70
5.5	Valeurs optimales obtenues en variant δ_2 : cas de l'expérience 3.	71
5.6	Cycles de MP pour les solutions optimales obtenues en variant δ_2 : cas de l'expérience 3.	71
5.7	Optimal PM intervals : case of $u = 5$ and $R_0 = 90\%$	71
5.8	Optimal PM intervals : case of $u = 5$	72
5.9	Impact de l'âge initial u sur la solution optimale.	72
6.1	Paramètres utilisés dans les expériences numériques.	82
6.2	Solutions optimales pour différentes valeurs de η	83
6.3	Solutions optimales pour différentes valeurs de β	85
6.4	solutions optimales pour différentes valeurs de ω	86
6.5	Solutions optimales pour différentes valeurs de S_1	87
7.1	Moyenne & écart type des coefficients Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas de l'expérience 1.	99
7.2	Fiabilité obtenue dans les cas déterministe et stochastique : cas de l'expérience 1.	99
7.3	Paramètres des composants du système de l'expérience 2.	100
7.4	valeur moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas du système de l'expérience 2.	101
7.5	Ecart type $\sigma_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas du système de l'expérience 2.	101
7.6	Valeurs des temps et des coûts correspondants aux réparation minimales et aux remplace- ment préventif et correctif des composants : cas de l'expérience 2.	101
8.1	Coefficients de réduction de dégradation des niveaux de maintenance.	112
8.2	Résultats de l'exemple 1 : impact du coût de pénalité.	113
8.3	Résultats de l'exemple 1 : impact du coût d'inspection.	113
8.4	Données des composants du système de l'exemple 2.	114
8.5	Données d'inspection, de maintenance et de pénalité du système de l'exemple 2.	114

9.1	Exemple illustratif d'un plan intégré de production et de maintenance imparfaite.	121
9.2	Résultats obtenus pour les instances résolues du problème.	127

Introduction générale

Ce mémoire expose une synthèse de mes activités de recherche scientifique, pédagogiques et administratives. Ces activités couvrent principalement les quatre périodes de thèse, d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER), de Postdoctorat et de Maître de Conférences.

Après un diplôme de l'École Normale Supérieure (ENSET de Mohammedia au Maroc) en 1992, j'ai occupé un poste de Professeur Assistant pendant quatre années. Durant cette période, mes activités s'inscrivent principalement dans les deux cadres pédagogique et administratif. Mes enseignements concernent essentiellement des matières telles que l'électronique, la technologie d'électronique, l'automatisme et l'informatique industrielle.

Ensuite, j'ai préparé un Diplôme des Études Approfondies (DEA) au Laboratoire d'Automatique Industrielle¹ (LAI) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Après un stage de recherche, au sein de ce même laboratoire, j'ai préparé ma thèse de doctorat de septembre 1997 à décembre 2000 au sein de l'équipe Sûreté, Supervision des Systèmes de Production (3SP). Mes travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de la théorie de contrôle par supervision (*Supervisory Control Theory*) de Ramadge & Wonham et la théorie des automates. Nous avons alors travaillé sur le développement d'une approche statique de contrôle des Systèmes à Événements Discrets Temporels (SEDT). Nos résultats sont ensuite appliqués au recouvrement des défaillances d'un système de production sujet à des aléas.

Après l'obtention du doctorat, j'ai occupé un poste d'ATER de décembre 2000 à août 2002 au sein du même laboratoire où j'ai continué à développer et affiner mes travaux de recherche sur le contrôle des SEDT. Après cette première période d'ATER au LAI, j'ai également occupé un poste d'ATER de septembre 2002 à août 2004 au département informatique de l'INSA de Lyon. Pendant cette période, j'ai pu collaborer en recherche avec l'équipe Systèmes Embarqués Communicants (SEC) du Centre d'Innovation en télécommunication et Intégration de services (CITI) de l'INSA de Lyon.

Pendant la période datant d'avril à août 2005, j'ai réalisé un Postdoctorat au département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue au Canada. Durant cette période, j'ai collaboré avec Prof. M. Nourelfath sur des sujets de recherche liés à l'analyse de performance des systèmes de production en utilisant des outils issus de la théorie de Ramadge & Wonham combinés à l'algèbre tensorielle (dite encore de Kronecker).

De septembre 2005 à août 2008, j'ai été recruté en qualité de postdoctorant au département de Génie Mécanique et Construction à la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval (Québec, Canada) où j'ai travaillé en collaboration avec Prof. D. Ait-Kadi et Prof. M. Nourelfath. C'est alors pendant cette période que j'ai réalisé une reconversion thématique pour ainsi initier des travaux de recherche portant sur des problématiques liées à la fiabilité et à la maintenance des systèmes.

C'est en septembre 2008 que j'ai rejoint l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM) en qualité de Maître de Conférences (MCF) de la section 61. Depuis, mes activités d'enseignement se déroulent principalement à l'ENIM, tandis que mes activités de recherche sont réalisées au Laboratoire de Génie Informatique de Production et de Maintenance² (LGIPM) au sein de l'équipe Management de la

1. Actuellement, ce laboratoire n'existe plus. Ses membres ont rejoint le laboratoire Ampère de l'INSA de Lyon.

2. Avant janvier 2018, l'acronyme LGIPM désignait : Laboratoire de Génie Industriel de Production et de Maintenance

Production et de la Maintenance (MPM).

Ce parcours en quatre étapes du Maroc au Canada, en passant et en retournant en France, m'a permis d'enrichir mes expériences aussi bien sur le plan de la recherche scientifique que sur le plan de la pédagogie, sans oublier naturellement le plan personnel. Ce parcours est aussi un indice de mobilité géographique et de reconversion thématique. En effet, comme il a été signalé dans les paragraphes ci-dessus, mon domaine initial de recherche est la synthèse de contrôleurs des Systèmes à Événements Discrets (SED). Depuis mon expérience de postdoctorat au Canada, mon domaine de recherche concerne la fiabilité et la maintenance des systèmes. Il va sans dire que cette reconversion thématique nécessite la maîtrise et le déploiement de nouveaux concepts et d'outils mathématiques. Elle nécessite également du temps et de la patience.

Ce mémoire présente les détails concernant, plus particulièrement, les trois dernières étapes de mon parcours. Ce mémoire est alors structuré en trois parties. La première partie présente mon curriculum vitæ et résume l'ensemble de mes activités de recherche, pédagogiques et administratives. La seconde partie traite de nos contributions scientifiques en qualité de MCF. Elle est composée, en plus d'un chapitre introductif, de six chapitres dont chacun expose une contribution à une problématique bien spécifique de recherche. Plus de détails concernant l'organisation et la structure de la seconde partie seront exposés ultérieurement. La troisième partie est dédiée à mon projet de recherche en termes de perspectives de nos travaux de recherche, de collaborations, de responsabilités et de rayonnement. Cette partie du mémoire présente une conclusion générale.

Première partie

Curriculum Vitae, résumé des activités de recherche scientifique, pédagogiques et administratives

Chapitre 1

Curriculum Vitae

1 État civil

Abdelhakim KHATAB

Adresse Professionnelle :

École Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM)
1, route d'Ars Laquenexy. BP 65820. 57078 Metz Cedex 03.
Bureau 0B14
Tel. : +33 (0) 3 72 74 86 80
Courriel : abdelhakim.khatab@univ-lorraine.fr

2 Poste actuel

- Maître de Conférences
- Section CNU : 61
- Établissement d'affectation : Université de lorraine/Lorraine-INP/École Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM)
- Laboratoire de rattachement : Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance (LGIPM)
- Équipe de Recherche : Management de la Production et de la Maintenance (MPM) du département Logistique & Maintenance

3 Formations académiques et diplômes

Doctorat en Automatique Industrielle

- Établissement : Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
- Laboratoire : Automatique Industrielle¹ (LAI)
- Période : 1997 - 2000
- Titre : Contrôle et contrôle stabilisant des Systèmes à Événements Discrets Temporels : Application au recouvrement des défaillances des systèmes de production
- Jury : Prof. Daniel NOYES (rapporteur), Prof. Jean-Pierre ELLOY (rapporteur), Prof. Guy JUANOLE (rapporteur), Dr. Michel COMBACAU (Examinateur), Prof. Max-Olivier HONGLER (Examinateur), Dr. Laurent PIETRAC (Examinateur), Prof. Eric NIEL (Directeur de thèse)

1. Actuellement, ce laboratoire n'existe plus. Ses membres ont rejoint le laboratoire Ampère de l'INSA de Lyon.

DEA en Automatique Industrielle

- Établissement : Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
- Laboratoire : Automatique Industrielle (LAI)
- Responsable : Prof. Eric NIEL
- Période : 1996 - 1997
- Titre : Diagnostic des Systèmes à Événements Discrets Temporels

Diplôme de l'École Normale Supérieure (ENS)

- Établissement : École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET), Mohammedia, Maroc
- Période : 1987 - 1992
- Option : Génie électrique

4 Expériences professionnelles

4.1 En France

- Depuis 2008 : Enseignant chercheur MCF à l'ENIM.
- Juin 2018 - juin 2021 : Membre expert (nommé à la suite d'une sélection de candidatures) du groupe Génie Civil, Industriel et des Systèmes (groupe référencé 1509) du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada (*Natural Sciences and Engineering Research Council : NSERC*).
- Depuis juin 2018 : Professeur Associé (*Adjunct Professor*) au Department of Industrial Engineering de l'Université de Dalhousie, Halifax, Canada.
- 2002 - 2004 : ATER²(temps complet) au département informatique de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.
- 2000 - 2002 : ATER³ (temps complet) au département Génie Industriel de l'INSA de Lyon.
- 1999 - 2000 : Vacataire à l'École Supérieure de Chimie Physique (CPE) de Lyon.
- 1998 - 2000 : Vacataire au département de Génie Mécanique et Construction de l'INSA de Lyon.

4.2 Au Canada

- Septembre 2005 - Août 2008 : Chercheur Postdoctorat au département de Génie Mécanique et Construction, Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Québec, Canada.
- Avril-août 2005 : Chercheur Postdoctorat au département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada.
- 2005 - 2006 : Chargé de cours au département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada.
- 2007 (Avril - Juin) : Membre de la commission d'experts pour le montage, à l'École Supérieure d'Ingénieurs en Textile et Habillement (ESITH) de Casablanca-Maroc, d'un Master en Hygiène, Santé, Sécurité et Développement durable (Master HSQE).

4.3 Au Maroc

- 1992 - 1996 : Professeur assistant à l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Mohammedia.
- 1994 - 1996 : Professeur vacataire au Centre de l'Enseignement des Sciences Appliquées (CESA) de Casablanca.
- 1994 : Professeur vacataire au sein du Conseil National de Jeunesse et Avenir (CNJA).

2. Pendant cette période, j'étais rattaché au Centre d'Innovations en Télécommunications et Intégration de services (CITI) de L'INSA de Lyon.

3. Pendant la période 2000-2002, j'étais rattaché au Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'INSA de Lyon.

Chapitre 2

Résumé des activités de recherche scientifique

1 Travaux de recherche en qualité de doctorant, d'ATER et de Postdoctorant

1.1 Travaux de recherche liés à la thèse de doctorat

Mes travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Sûreté, Supervision des Systèmes de Production (3SP) du Laboratoire d'Automatique Industrielle (LAI) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.

L'objectif de ces travaux de thèse consiste à développer une approche formelle pour le contrôle des Systèmes à Événements Discrets Temporels (SEDТ). Le cadre de travail repose sur la théorie de contrôle par supervision (*supervisory control theory*) de Ramadge & Wonham et des automates à états finis. Dans ce domaine de recherche, les premiers travaux se basent essentiellement sur la théorie des langages (langage engendré par un automate) et ont montré leurs limites quand le nombre d'états d'un automate devient important (problème d'explosion combinatoire).

A partir de ce constat, nous avons alors proposé une approche de contrôle dite par retour d'état statique basée sur l'exploitation simultanée d'un modèle automate non-temporel et d'un modèle automate temporel. Le premier modèle intègre explicitement des variables auxiliaires et permet une représentation concise des SEDТ et de palier, également, le problème de l'explosion combinatoire. Le contrôle exploite essentiellement les différentes informations relatives aux états. Les spécifications (contraintes à respecter) sont formulées sur la base de la logique des prédicats et leurs fonctions de transformation. Une extension de la définition de la contrôlabilité, initialement définie dans la théorie de Ramadge & Wonham, est proposée en termes d'invariance et d'atteignabilité des prédicats. Nous avons alors montré qu'elle sert de condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'un contrôleur par retour d'état statique.

Ensuite, en se plaçant dans le cadre de l'assurance d'un fonctionnement sûr, nous avons développé une extension aux SEDТ des concepts de stabilité et de stabilisation. Dans ce contexte, la stabilité est définie comme étant la propriété d'un système (automate à états finis) à rejoindre à partir de n'importe quel état un sous-ensemble prédéterminé d'états. En revanche, la stabilisation caractérise la possibilité de contrôler un système et de le conduire depuis un état particulier vers un sous-ensemble d'états prédéfini. Ces résultats sont ensuite exploités pour élaborer un cadre formel et la mise au point de techniques visant l'accroissement des performances et des possibilités de reconfiguration des systèmes de production sujets aux aléas incontrôlables.

1.2 Travaux de recherche en qualité d'ATER

Après avoir soutenu ma thèse, j'ai continué, en tant qu'ATER de décembre 2000 à août 2002, mon activité de recherche au sein de l'équipe 3SP du LAI. Pendant cette période, en plus de l'encadrement de stages de DEA, j'ai également affiné ma recherche bibliographique concernant les approches existantes de synthèse de contrôleurs utilisant d'autres formalismes de modélisation. Parmi ces approches, je me suis intéressé particulièrement à celles basées sur les réseaux de Petri et celles basées sur les automates d'Alur et Dill. Dans l'objectif de développer des algorithmes de synthèse de contrôleurs plus efficaces et plus robustes, j'avais également investi les approches et les techniques d'abstraction de modèle et de vérification de propriétés de vivacité et de sécurité des systèmes temps réel. Ce travail de recherche exploratoire a facilité mon intégration en qualité d'ATER (de septembre 2002 à août 2004) au département informatique de l'INSA de Lyon.

En effet, en tant qu'ATER au département informatique de l'INSA de Lyon, j'ai pu collaborer en recherche avec Dr. J.-P. Babau, alors responsable de l'équipe Systèmes Embarqués Communicants (SEC) au Centre d'Innovations en télécommunication et Intégration de services (CITI¹). Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de la modélisation et la vérification de propriétés des systèmes temps réel. L'objectif consiste d'une part à développer des modèles des systèmes temps réel, et d'autre part à proposer des techniques d'abstraction de modèles pour la vérification et la validation des propriétés de vivacité et de sécurité. Plus explicitement, étant donné un modèle de spécification (modèle de contraintes) et un modèle de conception (modèle d'exécution) d'un système temps réel, il s'agit de développer des approches formelles garantissant l'adéquation entre les deux modèles de conception et de spécification.

1.3 Travaux de recherche en qualité de Postdoctorant

Après une première expérience en recherche scientifique réalisée en France, j'ai collaboré en qualité de postdoctorant avec Dr. M. Nourelfath, Professeur au département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Pendant cette période datant d'avril à août 2005, nos travaux de recherche portaient sur le contrôle et l'analyse de performance des systèmes de production. Ces travaux de recherche ont été subventionnés partiellement par la Fondation de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (FUQAT). En se basant sur la théorie de la mesure, la théorie de contrôle par supervision (*Supervisory control theory*) de Ramadge & Wonham, l'algèbre tensorielle et les processus stochastiques, une approche formelle a été développée pour la modélisation et l'évaluation de la performance d'un contrôleur synthétisé pour des systèmes de production composé de plusieurs machines. L'approche proposée considère une machine comme un automate stochastique représenté par un processus de Markov homogène. Les premiers résultats concernent le cas d'un seul type de produit ; cas où une machine est capable de produire un seul type de produit. Ces résultats ont été ensuite étendus au cas le plus général qui est du multi-produit.

De septembre 2005 à août 2008, j'ai été recruté en qualité de postdoctorant au département de Génie Mécanique et Construction à la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval (Québec, Canada). Durant cette période, j'ai réalisé une reconversion thématique en recherche scientifique. J'ai alors initié et investi des travaux de recherche dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, et plus particulièrement en fiabilité et maintenance des systèmes. Cette reconversion thématique a nécessité le développement de nouvelles compétences et la maîtrise de nouveaux outils mathématiques particulièrement en calcul probabiliste et des processus stochastiques, en plus de la maîtrise de nouveaux concepts.

Durant cette seconde période postdoctorale, j'ai travaillé en collaboration avec Dr. Daoud Ait-Kadi et Dr. Mustapha Nourelfath, Professeurs à l'Université Laval. J'ai également initié un travail de collaboration en recherche avec Dr. Abdelhakim Artiba, alors Professeur à l'École de Technologie Supérieure (ETS) de Montréal, et Dr. Nabil Nahas, actuellement Professeur à King Fahd University of Petroleum and Minerals (KAFUPM). Dans nos premiers travaux, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à l'optimisation des stratégies de maintenance sélective pour des systèmes multi-composant. Le système

1. Associé à l'INRIA, le CITI développe des activités de recherche fondamentale et appliquée dans les domaines des réseaux et des télécommunications.

est supposé pouvoir effectuer une séquence de missions sachant qu'entre deux missions consécutives, un arrêt d'une durée limitée est programmé et durant lequel des actions de maintenances peuvent être réalisées. Sachant que les ressources en maintenance sont limitées, le problème consiste à effectuer le meilleur choix parmi toutes les composantes à maintenir, et ce dans l'objectif de maximiser la fiabilité du système pour la prochaine mission. Ce problème est un problème combinatoire dont la complexité est inhérente à la non-linéarité de la fonction objectif et au nombre de composants constituant le système. C'est pour ainsi dire que lorsque ce nombre est considérable, les méthodes exactes deviennent très difficiles à exploiter. Nous avons alors proposé des méthodes de résolution basées sur des heuristiques et des métaheuristiques. Les premières approches proposées dans ce projet de recherche considèrent des systèmes binaires ; des systèmes ne possédant que deux états de fonctionnement, soit normal ou de panne. Nous avons alors proposé une extension de nos résultats aux systèmes multi-état. Un système multi-état possède plusieurs états chacun est caractérisé par une performance donnée. Les états extrêmes du système sont les états de panne complète et de performance nominale. Pour l'évaluation de la fiabilité du système multi-état, nous avons exploité la méthode UMGF (*Universal Moment Generating Function*). Ce projet de recherche est toujours d'actualité et nous continuons à y contribuer.

Lors de mon séjour postdoctoral à l'Université Laval, un autre projet de recherche avait également été réalisé. L'objectif de ce projet consiste à développer une méthode formelle pour l'évaluation de la performance des systèmes multi-composant sujets à des défaillances aléatoires et une stratégie de maintenance où les composants sont soumis à des règles de priorité établies en maintenance. L'approche proposée permet le calcul de la disponibilité stationnaire d'un système K -parmi- $N : G$ dont chaque composant est caractérisé par ses propres taux de défaillance et de réparation. Nous avons considéré le cas où un nombre limité de réparateurs est disponible avec une priorité de réparation spécifiée entre les N composants du système. Un algorithme de construction automatique du diagramme de transition d'état du système est développé. La disponibilité stationnaire de chaque composant et celle du système sont évaluées en utilisant un modèle de Markov multidimensionnel. Nous avons pu montrer comment ce modèle peut être représenté comme un réseau d'automates stochastiques avec des transitions dépendantes de l'état du système. Pour déterminer l'automate stochastique du système K -parmi- $N : G$, nous avons développé une approche formelle basée sur l'algèbre tensorielle (dite encore de Kronecker) généralisée. Pour l'évaluation de l'efficacité de notre approche, un modèle de simulation de Monte Carlo a été développé et une comparaison des résultats analytiques et de simulation a été réalisé. Cette problématique de recherche est également encours d'investigation.

1.4 Production scientifique relatives aux travaux de thèse, d'ATER et de Postdoctorat

Avant de lister la production scientifique relatives aux travaux de thèse, d'ATER et de Postdoctorat, la table (2.1) permet de résumer quantitativement les publications par type (revue, conférence, ...).

Revue internationale	Nombre
Reliability Engineering & System Safety (RESS)	2
International Journal of Control (IJC)	2
Conférences internationales	Nombre
IFAC (WODES,MCPL), IEEE SMC, ESREL,...	20
Chapitres de livres	Nombre
Collection IC2, Ed. Hermes	1

Table 2.1 – Quantification de la production scientifique : période avant MCF

Revue internationale avec comités de lecture

- R1** A. Khatab, N. Nahas, M. Nourelfath "Availability of K-out-of-N : G systems with non-identical components subject to repair priorities". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 94, 2009, pp. 142-151.
- R2** N. Nahas, A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath "Extended great deluge algorithm for the imperfect preventive maintenance optimization of multi-state systems". Reliability Engineering

and System Safety, Vol. 93, 2008, pp. 1658-1672.

- R3** A. Khatab, M. Nourelfath "Evaluation of language measure parameters for discrete event manufacturing systems with multiproduct machines". *International Journal of Control*, Vol. 80 (10), 2007, pp. 1562-1575
- R4** A. Khatab, M. Nourelfath "Analytical approach to evaluate language measure parameters for discrete-event supervisory control". *International Journal of Control*, Vol. 79 (7), 2006, pp. 688-706

Conférences internationales avec actes et comités de lecture

- C1** A. Khatab, D. Ait-kadi, A. Artiba. "Optimization of selective maintenance for multi-mission series-parallel systems. 7^{ème} Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation (MO-SIM'08), Paris, France, 2008.
- C2** A. Khatab, D. Ait-kadi, A. Artiba. Simulated annealing method for selective maintenance optimization of multi-mission series-parallel systems. *European Safety and Reliability Conference (ESREL'08)*, Valencia, Spain, 2008.
- C3** A. Khatab, M. Nourelfath. Discrete event multiproduct manufacturing systems : language measure parameters evaluation. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 07)*, Beijing, China, 2007.
- C4** A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath. Heuristic-based methods for solving the selective maintenance problem in series-parallel systems. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 07)*, Beijing, China, 2007.
- C5** A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath. Algorithme du recuit simulé pour la résolution du problème d'optimisation de la maintenance sélective des systèmes parallèle-série". *Conférence Internationale du Génie industriel (CIGI)*, Trois-Rivières, Québec, Canada, 2007.
- C6** A. Khatab, M. Nourelfath. Using functional transitions and Kronecker algebra for availability evaluation of parallel systems under repair policies. *International Conference on Probabilistic Safety Assesment and Management (PSAM)*, New Orleans, Louisiana, USA, 2006.
- C7** A. Khatab, Nabil Nahas, M. Nourelfath " Availability evaluation of multicomponent systems under repair policies : a generalized kronecker-based approach". *IEEE International Conference on Services Systems and Services Management (ICSSSM)*, Troyes, France, 2006.
- C8** A. Khatab, M. Nourelfath. Modular state feedback controller for the supervisory control of timed discrete event systems. *8th IASTED international Conference on Intelligent Systems and Control (ISC)*, Cambridge, MA, USA, 2005.
- C9** A. Khatab, M. Nourelfath. Computation of language measure parameters for discrete-event supervisory control. *8th IASTED international Conference on Intelligent Systems and Control (ISC)*, Cambridge, MA, USA, 2005.
- C10** A. Khatab, E. Niel "A state-based reasoning for the supervisory control of Timed Discrete Event Systems. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Hamamet, Tunisia, 2002.
- C11** M. Nourelfath, A.khatab. Ant Colony Optimization for Multi-state Series-Parallel System Expansion-scheduling. *7th IEEE Computer Society, Wokshop On Discrete Event Systems WODES*, Reims, France, 2004.
- C12** A. Alkhodre, A. Khatab, J-P. Babau, J-J. Schwarz. Formal development of real time systems : specification,design and validation. *28th IFAC/IFIP Workshop on Real-Time Programming (WRTP)*, Istanbul, Turkey, 2004.
- C13** A. Khatab, E. Niel. A state based approach for the failure recovery for Timed Discrete Event systems. *IEEE Computer Society, Workshop on Discrete Event Systems (WODES'02)*, Zaragoza, Spain, 2002.
- C14** A. Khatab, L. Pietrac, E. Niel. Techniques de recouvrements des défaillances des systèmes de production. *4^{me} Congrès International de Génie Industriel*, Aix-Marseille, France, 2001.
- C15** A. Khatab, E. Niel. A state-based approach for the supervisory control of Timed Discrete Event Systems. *Symposium on the Supervisory Control of Discrete Event Systems (SCODES)*, Paris, Actes INRIA, Editeurs B. Caillaud et X. Xie, 2001.

- C16** A. Khatab, E. Niel. A state approach for the failure recovery for the Timed Discrete Event Systems. *2nd International Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL)*, Grenoble, France, 2000.
- C17** M. Combacau, P. Berruet, P. Charbonaud, A. Khatab. Supervisory and monitoring of production systems. *2nd International Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL)*, Grenoble, France, 2000.
- C18** A. Khatab, E. Niel. Spécifications formelles pour la commande par supervision des Systèmes à Événements Discrets Temporels. *Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR'99)*, Paris, 1999.
- C19** A. Khatab, E. Niel. Predicates and Predicate transformers for the supervisory control of Timed Discrete Event Systems. *7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A)*, Barcelona, Spain, 1999.
- C20** A. Khatab, E. Niel. The supervisory control of Timed Discrete Event systems In the Operational Safety context. *IEE Control, Workshop on Discrete Event Systems, (WODES'98)*, Cagliari, Italy, 1998.

Chapitre d'ouvrage

- CH1** E. Niel, L. Pietrac, A. Khatab, S. Chafik. Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de Production. *Collection IC2, Ed. Hermes 2002*, participation chapitre "Synthèse de lois de commande sûre".

1.5 Activités d'encadrements scientifiques

Au cours de la préparation de ma thèse et pendant la période d'ATER au Laboratoire d'Automatique Industrielle à l'INSA de Lyon, j'ai assuré des encadrements scientifiques de stages de recherche en DEA d'Automatique Industrielle, ainsi que de projets de fin d'études au sein du laboratoire LAI de l'INSA de Lyon. Ces encadrements sont listés comme suit.

DEA1 DEA de Mr. C. Tolba (1999-2000)

- Titre : Approche statique pour le contrôle des Systèmes à Événements Discrets
- Taux d'encadrement : 100%

DEA2 DEA de Mr. J. Zhinong (2000-2001)

- Titre : Développement d'un outil de simulation pour la synthèse des contrôleurs, par retour d'état statique, des Systèmes à Événements Discrets.
- Taux d'encadrement : 100%

DEA3 DEA de Mme. T. Lechani (2002-2003)

- Titre : Effet mémoire dans les Réseaux de Petri Colorés Stochastiques, application en bioinformatique.
- Taux d'encadrement : 100%

PFE1 PFE de Mme. A. Szabo (2001-2002)

- Titre : Développement d'un outil pour la modélisation des Systèmes à Événements Discrets Temporels (approche automates).
- Taux d'encadrement : 100%

PFE2 PFE de Mme. L. Ivanove (2001-2002)

- Titre : Synthèse de contrôleurs pour les Systèmes à Événements Discrets : étude comparative (Réseaux de Petri et automates).
- Taux d'encadrement : 100%

1.6 Responsabilités scientifiques liées à des projets de recherche

P1 Synthèse de contrôleurs modulaires des Systèmes à Événements Discrets Temporels

- Financement : Fondation de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (FUQAT, Québec, Canada, 2005).
- Montant : 3000\$.
- Responsabilité : Porteur du projet.

2 Travaux de recherche en qualité de MCF

Mon recrutement en qualité d'enseignant-chercheur MCF au sein du laboratoire LGIPM avait pour objectif de renforcer les activités de recherche de l'équipe de recherche Fiabilité & Maintenance (FM) dans le domaine de la fiabilité et des stratégies de maintenance. Après mon arrivée au LGIPM, une restructuration a été réalisée au niveau des équipes de recherche. C'est ainsi que l'équipe FM est renommée équipe Management de la Production et de la Maintenance (MPM). J'ai alors contribué au développement et à la consolidation de ses thématiques de recherche. J'y ai également initié et contribué à l'émergence de nouvelles problématiques de recherche. Par ailleurs, je suis impliqué dans la vie scientifique du laboratoire et plus particulièrement celle de l'équipe de recherche MPM. En effet, mon implication se matérialise à travers des présentations, la proposition et le suivi ainsi que l'encadrement de sujets de stages de masters recherche et de doctorants. Je suis également impliqué dans le montage et la gestion de projets de recherche en y intégrant des collègues de l'équipe, et la participation aux projets proposés par mes collègues. Depuis mon recrutement, j'ai également réalisé des visites et séjourné dans des laboratoires de recherche à l'étranger. J'ai aussi été à l'initiative d'invitations de chercheurs étrangers qui sont venus séjourner dans notre équipe. Cela nous a permis de consolider nos collaborations et de capitaliser nos échanges scientifiques par des publications et le montage de projets d'intérêts communs.

Les réalisations de nos travaux de recherche font régulièrement l'objet de publications dans des revues et conférences internationales reconnues dans le domaine de la fiabilité et de la maintenance des systèmes, ce qui contribue au rayonnement aux niveaux national et international de notre établissement et plus particulièrement au rayonnement du laboratoire et de l'équipe MPM. Nous accordons aussi une importance particulière à l'organisation de conférences internationales et la proposition de sessions spéciales dans des conférences nationales et internationales. Je participe régulièrement aux réunions du groupe de travail H2M (Health Management and Maintenance) du GdR-MACS pour positionner les travaux de l'équipe MPM au sein de la communauté scientifique nationale. Dans ce groupe de travail, je suis responsable et coordonnateur de l'axe T₇ (Stratégies de maintenance).

Enfin, j'ai monté des collaborations internationales et participé à d'autres types d'activités dont le détail sera exposé dans la suite de ce chapitre. Dans un premier temps, nous présentons les axes de recherche ainsi que les problématiques qui s'y affèrent. Nous spécifierons et ferons également références aux résultats et contributions réalisés. Ensuite, j'exposerai l'ensemble de ma production scientifique réalisé depuis mon recrutement en qualité de MCF.

Par ailleurs, je souhaite mentionner que je bénéficie d'une Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR) de catégorie "A" depuis octobre 2015.

2.1 Thématique et axes de recherche

Notre thématique de recherche est structurée autour de trois axes complémentaires de recherche. Le premier axe de recherche investit les problèmes d'optimisation des stratégies de maintenance des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et dans un contexte de développement durable. Le deuxième axe de recherche concerne l'optimisation de performance des systèmes complexes qui opèrent selon une série de missions et d'arrêts programmés. Enfin, le troisième axe de recherche traite des problèmes liés au développement de modèles d'optimisation de la planification intégrée de la production et de la maintenance des systèmes de production. Chaque axe de recherche ainsi que les principales problématiques qui le composent sont décrits dans ce qui suit. Dans cette description, nous adoptons la notation P_iA_j pour désigner la problématique i de l'axe de recherche j . Nos réalisations en termes d'articles de revues, d'articles de conférences, de chapitres de livres et d'ouvrages sont, respectivement, référencés par des lettres R, C, CH et O. Ces réalisations sont exposées dans la section 2.2 du présent chapitre. Les travaux d'encadrement de thèse de doctorat sont référencés par TD et exposés à la section 3.1.1. Les travaux d'encadrement de masters de recherche sont référencés par MR et exposés à la section 3.1.2.

2.1.1 Axe A_1 : Stratégies de maintenance des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et dans un contexte de développement durable

Cet axe vise à développer des approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision pour l'amélioration des performances des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et de développement durable. Cet axe est scindé selon deux types de problématiques de recherche dont le premier type a pour objectif de développer des stratégies de maintenance en tenant compte de l'impact de la dégradation du système sur la qualité de l'environnement. Il permet également d'aborder le cas inverse où l'environnement est supposé avoir un impact sur les performances du système. Le second type de problématiques abordées vise à développer des stratégies de maintenance et de garantie tenant compte particulièrement l'impact des activités de remanufacturing ou de la qualité des pièces de rechange sur les décisions de planification des actions de maintenance et sur la durée de garantie. L'ensemble des quatre problématiques qui relèvent de ce premier axe de recherche sont détaillées dans ce qui suit.

Problématique P_1A_1 : Stratégies de maintenance basées sur les données hétérogènes de durées de vie

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été développés autour de la modélisation, l'analyse et la mise en place de politiques de maintenance pour les systèmes sujets à des défaillances aléatoires. Ces travaux occultent souvent les réalités industrielles par des hypothèses restrictives telles que la connaissance a priori des distributions paramétriques des durées de vie des systèmes, et l'homogénéité des conditions d'exploitation. Ces hypothèses constituent une source de biais parce qu'elles conditionnent l'analyse statistique des politiques de maintenance.

Dans cette problématique de recherche nos travaux ont donc pour finalité de relaxer les deux hypothèses ci-dessus mentionnées, et de permettre ainsi la prise en compte et la mise en valeur des informations découlant directement des données de durées de vie issues de l'exploitation des systèmes dans les différents environnements, et ce sans passer par un modèle paramétrique intermédiaire.

Dans cette problématique de recherche, l'objectif de nos travaux consiste en le développement de modèles statistiques et d'outils efficaces pour l'analyse des politiques de maintenance basées sur les données de durées de vie hétérogènes. Dans nos premiers résultats obtenus, nous avons proposé une démarche complète de modélisation et d'analyse des stratégies de maintenance en partant des données de durées de vie jusqu'à l'obtention des politiques optimales de maintenance en passant par une phase d'estimation des lois de probabilité régissant les durées de vie du système. Les politiques de maintenance considérées sont appliquées à des équipements (neufs ou usagés) qui fonctionnent dans des environnements d'exploitation distingués par des niveaux différents de sévérité. Dans ce contexte, des modèles mathématiques sont proposés permettant d'évaluer et d'analyser théoriquement les coûts unitaires d'une stratégie de maintenance. Ces coûts unitaires sont complètement estimés par la méthode statistique non-paramétrique du noyau de Parzen.

Les travaux de recherche développés dans cette problématique de recherche ont fait l'objet d'une thèse de doctorat [TD4] préparée et soutenue en 2014 par Mr. I. Sidibé (voir section 3.1.1), d'un article d'une revue internationale avec actes et comités de lecture [R15], et de 3 articles de conférences internationales avec actes et comités de lecture [C35,C41,C43] (voir section 2.2).

Problématique P_2A_1 : Stratégies de maintenance pour des systèmes dont la dégradation impacte la qualité de l'environnement

Cette problématique de recherche part du constat naturel que la dégradation des composants d'un système de production influence non seulement la qualité du produit mais aussi celle de l'environnement. Ainsi, afin de réduire l'impact de la dégradation du système sur la qualité de l'environnement, de nombreuses taxes ont été introduites par la législation. Pour satisfaire les exigences relatives aux normes législatives, les entreprises doivent alors développer et mettre en

œuvre des méthodes et des stratégies innovatrices permettant de maximiser leurs profits d'une part, et d'exploiter rationnellement les ressources matérielles disponibles d'autre part. Cette exploitation doit être réalisée en tenant compte des contraintes liées à la protection de l'environnement.

L'objectif de cette problématique de recherche vise alors à développer des approches permettant la modélisation et l'analyse de performance des systèmes de production industriels tenant compte explicitement de l'impact de la dégradation du système sur la qualité de l'environnement.

Les premiers développements réalisés dans ce domaine de recherche ont permis l'élaboration de stratégies de maintenance conditionnelle pour un système de production de biens et de services. La détérioration du système est supposée continue, croissante et impact la qualité de l'environnement. A partir d'un seuil spécifié, le niveau de dégradation du système est jugé excessif, et par conséquent induit un coût de pénalité. Dans ce contexte, nous avons proposé deux stratégies de maintenance dont l'objectif est de contrôler la dégradation du système de manière à réduire son impact sur l'environnement. Deux modèles d'optimisation de maintenance sont alors développés et analysés. Ces modèles permettent de déterminer les dates optimales d'inspection qui minimisent le coût total moyen par unité de temps, ou qui maximisent la disponibilité stationnaire du système. Le coût total moyen est engendré par les coûts des actions d'inspection et de maintenance et inclus explicitement des coûts de pénalités dus au niveau excessif de dégradation de l'environnement.

Dans ces travaux de recherche, deux autres modèles d'optimisation de la maintenance sous contrainte ont été proposés. Il s'agit de problèmes d'optimisation où l'objectif est soit de minimiser le coût total moyen par unité de temps sous une contrainte de disponibilité, ou encore de maximiser la disponibilité stationnaire du système sous une contrainte de budget.

Les résultats développés dans cette problématique de recherche ont fait l'objet d'une thèse de doctorat [TD5] préparée et soutenue en 2012 par Mr. H. Chouikhi, d'un article d'une revue internationale avec actes et comités de lecture [R18], et de 3 articles de conférences internationales avec actes et comités de lecture [C44,C48,C50].

Problématique P_{3A_1} : Impact des opérations de remanufacturing sur les stratégies de maintenance des systèmes en fin de vie

Cette problématique de recherche s'inscrit dans un contexte de développement durable et vise à donner une seconde vie aux systèmes usagés (dits aussi en fin de vie). Nous nous intéressons à développer un cadre formel pour l'élaboration de stratégies d'inspection, de maintenance et de garantie dédiées à de tels systèmes. Ces stratégies permettent d'exploiter ces systèmes, dans leur seconde vie, tout en répondant à des niveaux requis de performance.

Ces travaux de recherche sont développés dans le cadre d'une collaboration scientifique avec des partenaires universitaires :

- Dr. C. Diallo de l'université de Dalhousie à Halifax au Canada,
- Dr. U. Venkatadri de l'université de Dalhousie à Halifax au Canada, et
- Dr. I. B. Sidibé du Centre de Formation et de Perfectionnement en Statistique (CFP-Stat) à Bamako au Mali.
- Prof. D. Ait-Kadi de l'Université Laval à Québec au Canada.

Cette problématique de recherche constitue un maillon fondamental de la chaîne logistique inverse. Notre contribution se focalise sur l'établissement d'une approche de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision permettant la récupération et le remanufacturing d'un système en fin de vie afin de lui procurer "une seconde vie". Les opérations de remise à niveau, dites encore de remanufacturing, sont des actions d'amélioration qui peuvent être effectuées sur les systèmes en fin de vie récupérés pour

les rajeunir et les rendre aptes à opérer un nouveau cycle de vie. Ces opérations sont coûteuses mais améliorent la fiabilité de ces systèmes et peuvent par conséquent réduire leurs coûts de maintenance.

Nos premiers travaux conduits ont permis le développement de modèles mathématiques d'optimisation pour la détermination conjointe de l'âge optimal d'acquisition (niveau de vieillesse), du remanufacturing (niveau de reconditionnement) et d'une stratégie de maintenance préventive. Dans ces travaux de recherche, le système est acquis et remanufacturé, si nécessaire, avant d'être remis en service et maintenu de manière préventive. Les conditions d'optimalité sont formellement établies et discutées pour des structures générales de coûts des actions d'acquisition et de remanufacturing. Les stratégies de maintenance adoptées sont basées sur des actions de maintenance imparfaite. D'autres résultats obtenus considèrent les incertitudes quant à l'âge des systèmes en fin de vie. Cette incertitude a été modélisée par une variable aléatoire de distribution supposée connue.

L'ensemble des résultats développés dans cette problématique de recherche a fait l'objet de trois articles de revues internationales avec actes et comités de lecture [R8,R9,R10], et de 2 articles de conférences internationales avec actes et comités de lecture [C28,C34].

Problématique P_4A_1 : Impact de l'usage des pièces de rechange reconditionnées sur les politiques de maintenance et de garantie

Cette problématique de recherche vise à proposer des approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision quant aux stratégies intégrées de maintenance et de garantie. Cette problématique de recherche est basée sur l'hypothèse qui stipule qu'il est difficile de disposer d'une quantité suffisante de pièces de rechanges reconditionnées à partir de démantèlement de systèmes en fin de vie. De ce fait, l'utilisation simultanée de pièces de rechange neuves et remanufacturées ou reconditionnées peut s'avérer obligatoire. Les actions de maintenance sont alors réalisées en utilisant une mixture de pièces de rechange neuves et reconditionnées et les politiques de maintenance et de garantie en sont tributaires.

Dans cette problématique, nos premières investigations ont abouti au développement d'une approche permettant la détermination d'une politique de garantie optimale où un mélange de pièces de rechange neuves et reconditionnées est utilisé pour effectuer des remplacements en cas de défaillance des produits sous garantie. Dans l'objectif de maximiser le bénéfice total, des modèles d'aide à la décision sont alors développés pour déterminer la durée de garantie optimale, le prix de vente, ainsi que l'âge et la proportion des pièces reconditionnées à utiliser.

Les premiers résultats développés ont fait l'objet d'un article de revue internationale avec actes et comités de lecture [R16], un chapitre de livre [CH3] et d'un article de conférence internationale avec actes et comités de lecture [C23].

2.1.2 Axe A_2 : Modélisation et analyse des performances des systèmes complexes multi-mission

Cet axe de recherche est dédié aux systèmes complexes supposés conçus pour réaliser des missions telles qu'entre deux missions un arrêt est planifié pour une durée déterminée. De tels systèmes sont souvent rencontrés plus particulièrement dans les industries maritime, nucléaire, de transport ou encore militaire. Afin d'améliorer les performances du système à exécuter sa prochaine mission, les composants du système peuvent être maintenus pendant les arrêts planifiés. Cependant, les ressources en maintenance sont souvent limitées en termes des durées allouées aux arrêts, du nombre d'opérateurs en maintenance, et de budget. De ce fait, seul un nombre limité de composants sont sélectionnés pour subir des opérations de maintenance. Une telle stratégie de maintenance est dite sélective. L'objectif étant de développer des modèles d'optimisation pour obtenir la meilleure sélection de composants à maintenir, et permettant de maximiser la fiabilité du système pour la prochaine mission ou encore de minimiser les coûts de maintenance. Cette sélection est normalement réalisée sous des contraintes de ressources en maintenance ou de niveau de fiabilité du système à achever sa mission suivante.

Cet axe de recherche regroupe des collaborateurs universitaires :

- Prof. E.H. Aghezzaf de l’université de Gand en Belgique
- Dr. C. Diallo de l’université de Dalhousie, Halifax au Canada
- Dr. U. Venkatadri de l’université de Dalhousie, Halifax au Canada
- Prof. D. Ait-Kadi de l’université Laval, Québec au Canada.
- Prof. Z. Sarri de l’université de Abou Bakr Belkaid de Tlemcen en Algérie.

Nous avons initié et abordé plusieurs problématiques dont les deux principales sont détaillées dans ce qui suit.

Problématique P_1A_2 : Impact des incertitudes des actions maintenance et du profil des missions sur la planification de la maintenance sélective.

Cette problématique de recherche part du constat que dans des situations réelles, diverses incertitudes sont inévitables et doivent être considérées dans les prises de décision, en général, et en maintenance des systèmes, en particulier. Dans le contexte de la maintenance sélective, la qualité des actions de maintenance ainsi que les durées de missions et les durées des arrêts constituent les principales données entachées d’incertitudes. Ignorer ces incertitudes potentielles peut ainsi conduire à des décisions inefficaces pouvant exposer les systèmes à des risques et entraîner des pertes humaines, environnementales et économiques.

La plupart des travaux sur les problèmes de maintenance sélective reposent sur l’hypothèse stipulant que les durées des missions et celles des arrêts planifiés sont toutes déterministes et connues à l’avance. Ces hypothèses peuvent cependant ne pas être valables dans de nombreuses situations réelles. En effet, il est souvent difficile, voire impossible, d’estimer avec précision les durées exactes des arrêts et des missions. Par exemple, dans le contexte militaire, l’heure de début de la prochaine mission (bataille) ne peut pas être prévue avec précision, ce qui conduit à la nature stochastique de la durée des arrêts entre deux missions (batailles) consécutives. Dans le domaine du transport aérien, les arrêts entre deux vols d’un même avion peuvent soudainement augmenter ou diminuer en raison d’un changement météorologique. De même, les durées ainsi que la qualité des actions de maintenance sont également stochastiques en raison de la variation de l’efficacité et des temps de réparation des opérateurs en maintenance.

Nous avons alors développé plusieurs modèles d’optimisation de maintenance sélective qui intègrent explicitement ces différentes incertitudes. Dans nos travaux, les durées des missions et celles des arrêts, en plus de la qualité des actions de maintenance, sont considérées comme des variables aléatoires avec des distributions de probabilité appropriées. Les modèles d’optimisation élaborés sont souvent non-linéaires et stochastiques et nécessitent des outils efficaces de résolution.

Les résultats développés ont fait l’objet d’une thèse [TD3] (section 3.1.1) préparée et soutenue en 2016 par Mme. I. Djelloul, de 4 articles de revues internationales avec actes et comités de lecture [R5, R11, R12, R14], et de 9 conférences internationales avec actes et comités de lecture [C21, C25-C27, C30-C32, C38, C42].

Problématique P_2A_2 : Maintenance conditionnelle sélective des systèmes complexes

La majorité des modèles de maintenance sélective sont basés sur les distributions d’âge des composants. Dans ce cas, le taux de pannes est la mesure, généralement utilisée, pour identifier l’état de fonctionnement d’un composant du système. Par conséquent, les conditions de fonctionnement des composants du système ne sont pas prises en compte. Cependant, de nombreux composants subissent des dommages et se détériorent avec l’âge et l’usage, en particulier dans le cas des infrastructures de génie civil, et des systèmes hydrauliques et mécaniques.

Cette problématique de recherche vise à proposer des modèles de maintenance sélective pour des systèmes où la dégradation d'un composant dépend aussi bien de son âge que de son usage. L'objectif est de développer des approches permettant un monitoring approprié des composants afin de mesurer les dégradations et suivre leur évolution. Les décisions en maintenance sont ainsi prises à temps avant d'atteindre des situations indésirables sur les plans aussi bien humain et environnemental qu'économique.

Tenir compte de l'état des composant dans la prise de décision en maintenance nécessite, au lieu des politiques de maintenance traditionnelles basées sur le temps (*Time-based maintenance* : TBM), l'adoption des stratégies de maintenances dites intelligentes basées sur l'état (*Condition-Based Maintenance* : CBM).

La majorité des approches existantes en CBM ont adopté un modèle de coût asymptotique pour optimiser les politiques de maintenance, et ce sans tenir compte des contraintes de ressources en maintenance. Ces modèles d'optimisation reposent sur un horizon temporel infini et ne sont point appropriés pour la catégorie de systèmes considérée dans notre axe de recherche. Les systèmes que nous considérons sont, en effet, conçus pour opérer une séquence de missions et d'arrêts programmés sur un horizon de temps fini.

Partant de ce constat, nos premiers résultats ont permis de développer une nouvelle approche de maintenance sélective dite maintenance conditionnelle sélective (*Condition-Based Selective Maintenance* : CBSM). Cette approche propose une démarche de modélisation et d'aide à la décision. La modélisation de la dégradation des composants est basée sur les processus stochastiques. Les composants sont sujets à des inspections et subissent des actions de maintenance imparfaites.

Les résultats développés ont fait l'objet d'un article de revue internationale avec actes et comités de lecture [R6], et de 1 conférence internationale avec actes et comités de lecture [C ?].

2.1.3 Axe A_3 : Planification intégrée de la production et de la maintenance des systèmes de production

L'objectif de cet axe de recherche est de développer un cadre formel pour la modélisation, l'analyse et l'aide à la décision des systèmes de production. Il s'agit de développer des approches permettant de considérer de manière simultanée différents objectifs souvent contradictoires telles que ceux de production et de maintenance. Il s'agit aussi de développer des approches permettant d'intégrer explicitement des critères supplémentaires tels que de qualité et de remanufacturing. Deux principales problématiques de recherche sont considérées. La première se focalise sur des systèmes de production mono-produit et où l'horizon de temps est infini. Dans la seconde problématique, il est question de systèmes de production à capacité de production finie, multi-produit et multi-période et où la planification est réalisée sur un horizon de temps fini.

Dans cet axe de recherche, nous avons, à présent, abordé deux problématiques. La première investit l'impact de la maintenance imparfaite sur la planification conjointe de la production et de la maintenance. Dans la deuxième problématique, nous avons abordé le problème de la quantité économique de production (*Economic Production Quantity* : EPQ) conjointement avec une stratégie de maintenance conditionnelle. Ces deux problématiques sont par la suite brièvement décrites. Les travaux de recherche de cet axe sont réalisés en collaboration principalement avec Prof. E.H. Aghezzaf de l'Université de Gand en Belgique.

Problématique P_1A_3 : Impact de la maintenance imparfaite sur la planification conjointe de la production et de la maintenance dans un système de production

Cette problématique de recherche se focalise sur les approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision permettant l'intégration de la planification de la production et de la maintenance imparfaite dans un système de production sujet à des défaillances aléatoires. Contrairement à la majorité

des approches existantes, dans cette problématique de recherche nous considérons des stratégies de maintenance préventive imparfaite qui sont capable, lorsqu'elles sont réalisées, de ramener le système de production à un état de fonctionnement qui se situe entre deux états extrêmes : "aussi mauvais qu'ancien : *as bad as old*" et "aussi bon que neuf : *as good as new*". Dans ce contexte, nous avons développé un modèle d'optimisation prenant compte de la capacité finie de production. Le modèle proposé est naturellement formulé sous la forme d'un problème d'optimisation mixte, non linéaire en nombre entier. Pour résoudre ce modèle d'optimisation, une reformulation linéaire à nombre entier mixte est proposée. Cette reformulation, bien qu'elle nous permette de résoudre le problème de la planification intégrée à l'optimalité pour toutes les instances, elle reste assez exigeante en termes de temps de calcul. Pour pallier ce problème, nous avons proposé une procédure de *fix-and-optimize*.

Les travaux de recherche menés dans cette problématique ont fait l'objet de la thèse en cours de préparation. Il s'agit de la thèse de doctorat de Mr. Le Tam [TD2] (section 3.1.1). Ces travaux ont également fait l'objet d'un article de revue internationale [R13], d'un chapitre de livre [CH2], et de deux articles de conférences internationales avec actes et comités de lecture [C24,C33].

Problématique P_2A_3 : Planification intégrée de la production et de la maintenance conditionnelle dans un système de production

Grâce au développement des technologies de capteurs, les programmes de maintenance conditionnelle (CBM) peuvent être établis et optimisés sur la base des données collectées grâce au suivi des conditions d'exploitation. Les activités CBM peuvent augmenter considérablement le temps de fonctionnement d'une machine. Cependant, elles devraient être menées de manière coordonnée avec le plan de production. D'un autre côté, la taille du lot de production devrait également être optimisée en prenant en compte les activités de maintenance conditionnelle.

Dans cette problématique de recherche l'objectif est de développer un cadre formel de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision permettant la planification intégrée de la production et de la maintenance conditionnelle des systèmes de production.

Dans ce contexte, nous avons débuté nos travaux de recherche par étudier l'impact de la maintenance conditionnelle sur la taille des lots de production dans un système de production mono-produit. La dégradation du système est modélisée par des processus stochastiques stationnaires. Nous avons alors proposé un modèle d'optimisation conjointe de la quantité économique de production (EPQ : *Economic Production Quantity*) et de la maintenance conditionnelle. Ce modèle permet également de prendre en considération la qualité de la production. Pour cela, nous nous sommes basés sur une hypothèse réaliste selon laquelle la dégradation du système impacte la dégradation de la qualité des produits. En se basant sur la théorie de renouvellement, le modèle d'optimisation est formulé sur la base d'un critère économique représenté par un coût moyen par unité de temps. Ce coût inclut les coûts d'inspection et de maintenance, de setup, de stockage et des coûts liés à la non-qualité de la production.

Les travaux de recherche menés dans cette problématique ont fait l'objet d'un article de revue internationale en cours d'évaluation, et d'un article de conférence internationale avec actes et comités de lecture [C22].

2.2 Production scientifique en qualité de MCF

Avant de lister la production scientifique réalisée depuis mon recrutement en qualité de MCF, les tables (2.2) et (2.3) permettent d'avoir une vue globale sur le bilan de mes travaux de recherche scientifique. La table (2.2) permet de quantifier les publications par type (revue, conférence,...), alors que la table (2.3) permet de renseigner les détails de l'éditeur ainsi que l'impact facteur des publications parues dans des revues internationales et référencées JCR.

Dans la liste suivante des publications réalisées, les noms des auteurs soulignés sont ceux des étudiants encadrés lors de la préparation de doctorat.

Revues internationales	Nombre
Reliability Engineering & System Safety (RESS)	5
Journal of Manufacturing Systems (JMS)	2
Journal of Intelligent Manufacturing (JIM)	4
International Journal of Production Research (IJPR)	4
Journal of Quality in Maintenance Engineering (JQME)	1
Applied Stochastic Models in Business and Industry (ASMBI)	1
Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part O : Journal of Risk and Reliability (JRR)	1
Conférences internationales	Nombre
IFAC (MIM, INCOM), ESREL, IEEE IESM, ...	52
Chapitres de livres	Nombre
Springer series in Communications in Computer and Information Science	2
Livres	Nombre
Wiley-ISTE	1

Table 2.2 – Quantification de la production scientifique : période de MCF

Titre de la revue & Éditeur	IF 2017
Reliability Engineering & System Safety (RESS), Elsevier	3.153
Journal of Manufacturing Systems (JMS), Elsevier	2.770
Journal of Intelligent Manufacturing (JIM), Springer	3.035
International Journal of Production Research (IJPR), Taylor & Francis	2.325
Applied Stochastic Models in Business and Industry (ASMBI), Wiley	1.095
Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part O : Journal of Risk and Reliability, Sage	1.084

Table 2.3 – Informations relatives aux publications parues dans les revues internationales et référencées JCR : période de MCF

Revues internationales avec comités de lecture

- R5** C. Diallo, U. Venkatadri, **A. Khatab**, Z. Liu. Optimal selective maintenance decisions for large serial k-out-of-n :G systems under imperfect maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, DOI 10.1016/j.res.2018.03.023, Vol 175C, pages 234-245, 2018.
- R6** **A. Khatab**, C. Diallo, E.H. Aghezzaf, U. Venkatadri. Condition-based selective maintenance for stochastically degrading multi-component systems under periodic inspection and imperfect maintenance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability. DOI 10.1177/1748006X18765521, 2018.
- R7** **A. Khatab**. Maintenance optimization in failure-prone systems under imperfect preventive maintenance. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 29, pages 707-717, 2018.
- R8** C. Diallo, U. Venkatadri, **A. Khatab**, S. Bhakthavatchalam. State of the art review of quality, reliability and maintenance issues in closed-loop supply chains with remanufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 55, Issue 5, pages 1277-1296, 2017.
- R9** I. Sidibé, **A. Khatab**, C. Diallo. Preventive maintenance optimization for a stochastically degrading system with a random initial age. *Reliability Engineering and System Safety*, 159, pages 255-263, 2017.
- R10** **A. Khatab**, C. Diallo, I. Sidibé. Optimizing upgrade and imperfect preventive maintenance in failure-prone second-hand systems. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, pages 1-21, 2017.
- R11** **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf, C. Diallo, I. Djelloul. Selective maintenance optimization for series-parallel systems alternating missions and scheduled breaks with stochastic durations. *International Journal of Production Research*, Vol. 55, Issue 10, pages 3008-3024, 2017.
- R12** **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf, I. Djelloul, Z. Sarri. Selective maintenance optimization for systems operating missions and scheduled breaks with stochastic durations. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, pages 168-177, 2017.

- R13** E.H. Aghezzaf, **A. Khatab** and P. Le Tam. Optimizing Production and Imperfect Preventive Maintenance Planning's Integration in Failure-Prone Manufacturing Systems. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 145, pages 190-198, 2016.
- R14** **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf. Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 150, pages 182-189, 2016.
- R15** I. Sidibé, **A. Khatab**, C. Diallo, K.H. Adjallah. Kernel estimator of maintenance optimization model for a stochastically degrading system under different operating environments. *Reliability Engineering and System Safety*, 147, pages 109-116, 2016.
- R16** Chari N., C. Diallo, U. Venkatadri, **A. Khatab**. Modeling and analysis of a warranty policy using new and reconditioned parts. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 32, Issue 4, pages 539-553, 2016.
- R17** **A. Khatab**. Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 26, Issue 3, pages 601-608, 2015.
- R18** H. Chouikhi, **A. Khatab**, N. Rezg. A condition-based maintenance policy for a production system under excessive environmental degradation. *Journal of Intelligent Manufacturing*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25, Issue 4, pages 727-737, 2014.
- R19** **A. Khatab**, D. Ait-Kadi, N. Rezg. Availability optimization for stochastic degrading systems under imperfect preventive maintenance. *International Journal of Production Research*, Vol. 52, Issue 14, pages 4132-4141, 2014.
- R20** **A. Khatab**, D. Ait-Kadi, N. Rezg. Kronecker algebra for series-parallel multi-state systems reliability evaluation. *International Journal of Production Research*, Vol. 50, Issue 13, pages 3572-3578, 2012.
- R21** **A. Khatab**, N. Rezg, D. Ait-Kadi. Optimum block replacement policy over a random time horizon. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 22, Issue 6, pages 885-889, 2011.
- R22** **A. Khatab**, N. Rezg, D. Ait-Kadi. Optimal replacement with minimal repair policy for a system operating over a random time horizon. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 17, Issue 4, pages 415-423, 2011.

Chapitres de livre

- CH2** L. T. Phuoc, E.H. Aghezzaf, **A. Khatab** (To appear). Solving the Integrated Production and Imperfect Preventive Maintenance Planning Problem : A Comparative Analysis of Relax-and-Fix/Fix-and-Optimize, Dantzig-Wolfe Decomposition and Lagrangian Relaxation Techniques. Springer series in Communications in Computer and Information Science.
- CH3** C. Diallo, U. Venkatadri, **A. Khatab**, S. Bhakthavatchalam (To appear). Optimizing combination warranty policies using remanufactured replacement products from the seller and buyer's perspectives. Springer series in Communications in Computer and Information Science.

Ouvrage collectif

- O1** N. Rezg, S. Dellagi, **A. Khatab**. Joint Optimization of Maintenance and Production Policies, 144 pages, Wiley-ISTE, ISBN : 978-1-84821-553-5, 2014.

Article dans des conférences internationales avec comité de lecture (sélection)

- C21** K. Chaabane, **A. Khatab**, C. Diallo, E.H. Aghezzaf, U. Venkatadri. Outsourcing selective maintenance problem in failure prone multi-component systems. In proceeding of the 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM), Bergamo, Italy, 2018.
- C22** **A. Khatab**, C. Diallo, E.H. Aghezzaf, U. Venkatadri, Optimizing the integrated economic production quantity for a stochastically deteriorating production system under condition-based maintenance. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Saarbrücken, Germany, 2017.
- C23** C. Diallo, U. Venkatadri, **A. Khatab**, S. Bhakthavatchalam. Optimal combination rebate warranty policy with second-hand products. *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)*, Porto, Portugal, 2017.

- C24** L. T.Phuoc, E.H. Aghezzaf, **A. Khatab**, C.H. Le. Integrated Production and Imperfect Preventive Maintenance Planning : An Effective MILP-based Relax-and-Fix/Fix-and-Optimize method. *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)*, 2017.
- C25** C. Diallo, **A. Khatab**, U. Venkatadri, E.H. Aghezzaf. A joint selective maintenance and multiple repair-person assignment problem. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Saarbrucken, Germany, 2017.
- C26** **A. Khatab** and E.H. Aghezzaf Selective maintenance for failure-prone multi-state systems when the durations of missions and scheduled breaks are stochastic. *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)*, Italy, 2016.
- C27** **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf, I. Djelloul and Z. Sari. Selective maintenance for series-parallel systems when durations of missions and planned breaks are stochastic. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM)*, Troyes, France, 2016.
- C28** I. Sidibé, **A. Khatab**, C. Diallo and D. Ait-Kadi. A maintenance optimization model for a second hand stochastically deteriorating systems under different operating environments. *International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, Algeria, 2015.
- C29** Bhakthavatchalam. S., Diallo. C, U. Venkatadri and **A. Khatab**. Quality, Reliability, Maintenance Issues in Closed-Loop Supply Chains : A Review. *IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM)*, Ottawa, Canada, 2015.
- C30** I. Djelloul, **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf and Z. Sari. Optimal selective maintenance policy for series-parallel systems operating missions of random durations. *International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, Metz, France, 2015.
- C31** I. Djelloul, **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf and Z. Sari. Optimisation de la maintenance sélective pour un système multi-composants opérant des missions de durées aléatoires et sujet à des actions de maintenance imparfaite. *International Conference on Integrated Design and Production (CPI)*, Tangier, Morocco, 2015.
- C32** **A. Khatab**, E.H. Aghezzaf and C. Diallo. Maintenance optimization of series-parallel systems operating missions with scheduled breaks. *IEEE International Conference on Microelectronics (ICM)*, Casablanca, Morocco, 2015.
- C33** L. T.Phuoc, Aghezzaf E. H., **A. Khatab**. Benders decomposition to solve integrated production and preventive maintenance planning problems. *International Conference of Modeling and Simulation (MOSIM)*, Nancy, France, 2014.
- C34** **A. Khatab**, C. Diallo, D. Ait-Kadi. Joint Optimal Upgrade level and Imperfect Preventive Maintenance Strategies for Refreshed End-of-life Systems. *International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)*, Oxford UK, 2014.
- C35** I. Sidibé, **A. Khatab**, C. Diallo. Maintenance optimization model for stochastically degrading systems under different operating environments. *International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE)* and *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS)*, Istanbul, Turkey, 2014.
- C36** **A. Khatab**, M..Dahane, E. H..Aghezzaf, D. Ait-Kadi. Joint maintenance and production planning optimization model for production systems with operation-dependent failure rate. *International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE)* and *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS)*, Istanbul, Turkey, 2014.
- C37** F. Belkaid, M. Dahane, Z. Sari, **A. Khatab**. Efficient approach for joint maintenance planning and production scheduling under consumable ressources constraints. *International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE)* and *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS)*, Istanbul, Turkey, 2014.
- C38** I. Djelloul, **A. Khatab**, M. Souier, Z. Sari. A genetic algorithm for optimal joint inspection and maintenance of stochastic degrading systems. 5th international conference on Metaheuristics and nature inspired computing (META), Marrakech, Morocco, 2014.

- C40** **A. Khatab**, D. Ait-Kadi, H. Oteyaka, N. Rezg. Availability optimization model for stochastically degrading systems under preventive replacement and minimal repair. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Rabat, Morocco, 2013.
- C41** **I. Sidibé**, **A. Khatab**, K.H. Adjallah. Kernel estimation based method for the optimization of the system age preventive replacement policy. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Rabat, Morocco, 2013.
- C42** **A. Khatab**, M. Dahane, D. Ait-Kadi, Genetic algorithm for selective maintenance optimization of multi-mission oriented systems. *European Safety & Reliability conference (ESREL)*, Amsterdam, Netherland, 2013.
- C43** **I. Sidibé**, **A. Khatab**, K. H. Adjallah. Kernel estimation based method for the optimization of the system age preventive replacement policy. *IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IFAC IMS)*, Sao Paulo, Brazil, 2013.
- C44** **H. Chouikhi**, **A. Khatab**, N. Rezg, A condition-based maintenance policy for a production system under excessive environment degradation. *IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM)*, Bucharest, Romania, 2012.
- C45** **A. Khatab**, Adjallah K. H., Lee J., N. Rezg. Hybrid hazard model for condition-based maintenance optimization for systems subjected to stochastic degradations. *IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM)*, Bucharest, Romania, 2012.
- C46** **A. Khatab**, D. Ait-Kadi, N. Rezg. Optimal replacement policy under time-varying minimal repair costs and a random time horizon. *Joint International Probabilistic Safety Assessment and Management conference (PSAM) and European Safety & Reliability conference (ESREL)*, Helsinki, Finland, 2012.
- C48** **H. Chouikhi**, **A. Khatab**, N. Rezg. Condition-based maintenance for availability optimization of production system under environment constraints. *International Conference of Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM)*, Bordeaux, France, 2012.
- C49** **A. Khatab**, D. Ait-Kadi, N. Rezg. A condition-based maintenance model for availability optimization for stochastic degrading systems. *International Conference of Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM)*, Bordeaux, France, 2012.
- C50** **H. Chouikhi**, **A. Khatab**, N. Rezg. A maintenance policy for a production system under environment constraints. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'11)*. Metz, France, 25-27 Mai, 2011.
- C51** **A. Khatab**, N. Rezg, D. Ait-Kadi, A preventive replacement policy for a system under random time horizon. *European Safety and Reliability (ESREL)*, Rhodes, Greece, 2010.
- C52** **A. Khatab**, N. Rezg, D. Ait-Kadi. Optimal block replacement policy for a system operating under a random time horizon. *International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM)*, Seattle, Washington, USA, 2010.

3 Autres activités de recherche menées en qualité de MCF

Depuis mon recrutement en qualité d'enseignant chercheur MCF, j'ai pu m'impliquer et assurer d'autres activités liées à la recherche scientifique. Ces activités ont été réalisées à mon initiative ou en collaboration avec des collègues aux niveaux national et international. Ces activités sont décrites dans le reste de ce chapitre.

3.1 Travaux d'encadrements scientifiques

Depuis mon recrutement en qualité de Maître de Conférences, j'ai pu réaliser des encadrements de travaux de recherche au niveau doctorat et au niveau Master 2 recherche. Je suis particulièrement impliqué dans deux Master M2 recherche, notamment le parcours Recherche du Master M2 de *Génie des Systèmes industriels (GSI)* et le Master M2 *Knowledge Integration in Mechanical Production*, spécialité *Conception, Industrialisation, Innovation (KIMP-CII)*. Depuis mon arrivée au sein du laboratoire LGIPM, je suis impliqué dans l'encadrement de cinq thèses. La première a été soutenue en décembre

2012 et le docteur a été recruté à la fin de sa thèse en tant qu'enseignant chercheur Maître-Assistant à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) en Tunisie. La deuxième a été soutenue en mai 2014 et le doctorant est Enseignant-chercheur au Centre de Formation et de Perfectionnement en Statistique (CFP-STAT) de Bamako au Mali. La troisième thèse est réalisée en collaboration avec Prof. Zaki Sari et Dr. Souier Mehdi de l'Université Aboubakr Belkaid à Tlemcen en Algérie. Elle a été soutenue en novembre 2016, et la docteure a été recrutée sur un poste d'Enseignant-chercheur Maître-Assistant à l'École Préparatoire en Sciences et Techniques d'Alger (EPSTA) à Alger en Algérie. La quatrième thèse est codirigée avec Prof. El Houssaine Aghezzaf de l'Université de Gand en Belgique ; la date de soutenance est prévue fin 2020. La cinquième thèse est réalisée dans le cadre d'un contrat doctoral ; elle a débuté en octobre 2017 et la date de soutenance est prévue pour fin 2020. En plus de ces encadrements de thèse de doctorat, j'ai pu m'impliquer dans l'encadrement scientifique de huit Masters M2 recherche. Le détail de ces encadrements est exposé comme suit.

3.1.1 Encadrements de de thèses de doctorat

TD1 Thèse de Mme. Kenza Chaabane (2017-2020)

- Titre : Optimisation conjointe de la conception et de la maintenance des systèmes industriels multi-missions : une approche intégrée
- Taux d'encadrement : 50%
- Directeur de thèse : Dr. Sofiene Dellagi, UFR MIM, Université de Lorraine.
- production scientifique : 1 article de conférence (INCOM2018).

TD2 Thèse de Mr. Phuoc Le Tam (2013-2020, thèse en cours)

- Titre : Integrated production planning and maintenance scheduling.
- Taux d'encadrement : 50%
- Directeur de thèse : Prof. E. H Aghezzaf, Université de Gand, Belgique.
- Production scientifique : 2 articles de conférences (MOSIM, ICORES), 1 article de journal (RESS) et 1 chapitre de livre (Springer).

TD3 Thèse de Mme. Imène Djelloul (2013-2016)

- Titre : Contribution à l'optimisation des stratégies d'inspection et de maintenances des systèmes industriels
- Taux d'encadrement : 50%
- Directeur de thèse : Prof. Zaki Sari, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Co-Directeur de thèse 2 : Dr. Mehdi Souier, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Production scientifique : 3 articles de conférences (MIM, CIE, META) et 2 articles de journaux (JMS, IJPR).
- Devenir du doctorant : Enseignant-chercheur, École Préparatoire en Sciences et Techniques d'Alger (EPSTA), Algérie.

TD4 Thèse de Mr. Ibrahima dit Bouran Sidibé (2012-2014)

- Titre : Analyse non paramétrique des politiques de maintenance basées sur des données de durées de vie hétérogènes
- Taux d'encadrement : 80%
- Directeur de thèse : Pr. Kondo Adjallah, Université de Lorraine, ENIM.
- Production scientifique : 3 articles de conférences (INCOM, IMS, CIE) et 3 articles de revues (RESS (2) et JMS).
- Devenir du doctorant : Enseignant-chercheur au Centre de Formation et de perfectionnement en Statistique, Bamako, Mali.

TD5 Thèse de Mr. Houssan Choukhi (2009-2012)

- Titre : Optimisation des stratégies de maintenance verte pour les systèmes de production de biens et de services

- Taux d'encadrement : 50%
- Directeur de thèse : Pr. Nidhal Rezg (université de Lorraine)
- Production scientifique : 3 articles de conférences (INCOM, IESM, MOSIM) et 1 article de journal (JIM)
- Devenir du doctorant : Maître-assistant à l'École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie).

3.1.2 Encadrements de Masters 2 recherche

Pour les encadrements de Master 2 recherche, la période d'encadrement est spécifiée en année universitaire. En pratique, elle dure du mois de février au mois de juillet. Rappelons que ces encadrements concernent les deux Master 2 GSI et KIMP-CII.

MR1 Master 2 GSI de Mme. El Omari Wiam (2016-2017)

- Titre : Optimisation des stratégies de maintenance pour les systèmes offshore
- Taux d'encadrement : 100%

MR2 Master 2 KIMP-CII de Mr. Napoléoni Paul (2013-2014)

- Titre : Gestion de connaissances en maintenance industrielle.
- Taux d'encadrement : 50%.
- Co-Directeur : Prof. Ali Siadat (ENSAM, Metz).
- Partenaire industriel : SNCF.

MR3 Master 2 GSI de Mr. Kaboré Brice (2012-2013)

- Titre : Optimisation de l'heure d'arrivée des bateaux.
- Taux d'encadrement : 100%
- Partenaire industriel : Electricité de France (EDF), Voies navigable de France (VNF).

MR4 Master 2 KIMP-CII de Mr. Campos Ciro Gonzales (2011-2012)

- Titre : Étude d'une architecture de système distribué sûr de services e-diagnostic et e-maintenance
- Taux d'encadrement : 50%
- Co-Directeur : Pr. Kondo Adjallah (ENIM, Metz)

MR5 Master 2 KIMP-CII de Mr. Guiselin Aurélien (2011-2012)

- Titre : Contribution à la définition d'un indicateur d'efficacité de la maintenance de la voie ferrée basé sur le REX.
- Taux d'encadrement : 50%.
- Co-Directeur : Pr. Kondo Adjallah (ENIM, Metz).
- Partenaire industriel : SNCF.

MR6 Master 2 KIMP-CII de Mr. EL Marraki Mohamed (2011-2012)

- Titre : Optimisation de la maintenance sélective des systèmes à architecture série-parallèle.
- Taux d'encadrement : 50%.
- Co-Directeurs : Dr. Mohammed Dahane (ENIM, Metz).

MR7 Master 2 KIMP-CII de Mr. Gonzalez Salazar Sergio André (2010-2011)

- Titre : Optimisation de l'organisation de la maintenance sous diverses contraintes
- Taux d'encadrement : 50%
- Co-Directeur : Pr. Kondo Adjallah (ENIM, Metz).
- Partenaire industriel : SNCF.

MR8 Master 2 KIMP-CII de Mme. Amani Soumaia (2010-2011)

- Titre : Étude technico-économique des coûts de maintenance des voies ferrées
- Taux d'encadrement : 35%.
- Co-Directeurs : Pr. Kondo Adjallah (35%) (ENIM, Metz), Pr. Ali Siadat (30%) (ENSAM, Metz).
- Partenaire industriel : SNCF.

3.2 Évaluation de travaux et projets de recherche

3.2.1 Évaluation de travaux de thèse

Membre examinateur de jury de la thèse de Mr. Boudhar Hamza (28 janvier 2015)

- Titre : Optimisation de la politique de remanufacturing des pièces de rechange dans le cadre d'une maintenance intégrée à une chaîne logistique en boucle fermée.
- Thèse de l'Université de Lorraine.

Membre rapporteur de jury de la thèse de Mr. Verleye Derek (08 Octobre 2015)

- Titre : Optimization of Large-Scale Water Supply Networks for Energy Efficient Operations : Models and Algorithms
- Thèse de doctorat (Ph.D) Université de Gand, Belgique.

Membre examinateur de jury de la thèse de Mme. EL Ghadouali Asmae (16 Mars 2015)

- Titre : Assistance à la décision basée sur le respect d'exigences sécuritaires ou de reconfigurabilité
- Thèse de doctorat de l'Université de AbdelMalek Essaadi, Tanger, Maroc.

3.2.2 Évaluation de projet de recherche

Membre expert auprès de l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (2014).

3.2.3 Évaluation d'articles de revues internationales

La liste des revues pour lesquelles j'ai agi comme évaluateur est présentée dans la table (2.4). Cette table précise également l'éditeur de chaque revue.

Titre de la revue	Éditeur
Journal of Intelligent Manufacturing (JIM)	Springer
Journal of Quality in Maintenance Engineering (JQME)	Emerald
Reliability Engineering & System Safety (RESS)	Elsevier
Journal of Manufacturing Systems (JMS)	Elsevier
International Journal of Production Research (IJPR)	Taylor & Francis
IEEE Transactions on Reliability	IEEE
IIEE Transactions (anciennement IIE Transactions)	Taylor & Francis
International Journal of Production Economics (IJPE)	Elsevier
Journal des Systèmes Automatisés (JESA)	
IEEE Transactions on Industrial Electronics	IEEE
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics : Systems	IEEE
European Journal of Operational Research (EJOR)	Elsevier
Applied Stochastic Models in Business and Industry (ASMBI)	Wiley
Applied Mathematical Modelling (AMM)	Elsevier
Applied Mathematics and Computation (AMC)	Elsevier
Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part O : Journal of Risk and Reliability	Sage
Journal 4OR (Journal of Canadian Operational Research Society : CORS)	CORS
British Journal of Mathematics & Computer Science	ScienceDomain int.
Structure and Infrastructure Engineering	Taylor & Francis

Table 2.4 – Liste des revues auxquelles j'ai participé en tant qu'évaluateur.

3.2.4 Évaluation d'articles de conférences nationales et internationales

Parmi les conférences nationales et internationales auprès desquelles j'ai agi comme évaluateur d'articles figurent celles listées dans la table (2.5).

IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM)
 International Conference of Modeling and Simulation (MOSIM)
 Congrès International de Génie Industriel (CIGI)
 International Conference on Logistics Operations Management (GOL)
 IEEE International Conference on Microelectronics (ICM)
 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)
 International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)
 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM)
 IEEE international Conference of Industrial Informatics (INDIN)
 Colloque international de la logistique et le Supply Chain Management (Logistiqua)
 World Conference on Complex Systems (WCCS)
 etc.

Table 2.5 – Liste des conférences auxquelles j’ai agi comme évaluateur.

3.3 Rayonnement et responsabilité scientifiques

3.3.1 Comités scientifique et d’organisation de conférences

- Membre du comité scientifique de ”International Conference on Industrial Engineering and Systems Management” (IESM 2011, 2013, 2017)
- Membre du comité scientifique du ”Congrès International de Génie Industriel” (CIGI 2015)
- Membre du comité scientifique de ”International Conference on Communications Computing and Control Applications” (CCCA 2012)
- Membre du comité scientifique du ”Colloque international de la logistique et le Supply Chain Management” (Logistiqua, depuis 2013)
- Membre du comité scientifique de la ”World Conference on Complex Systems” (WCCS 2014,2015)
- Membre du comité scientifique de la ”IEEE International Conference on Logistics Operations Management” (IEEE GOL, 2014, 2016)
- Membre du comité scientifique de la ”International Conference on Operations Research and Enterprise Systems” (ICORES depuis 2015)
- Membre du comité scientifique de la ”Conférence Internationale Conception et Production Intégrées” (CPI, 2015)
- Co-Président du comité d’organisation de la ”Conférence Internationale Conception et Production Intégrées” (CPI, 2015)
- Membre du comité d’organisation de la ”International Conference of Modeling and Simulation” (MOSIM, 2010)

3.3.2 Co-chair et organisateur de sessions spéciales dans des conférences internationales

- Co-chair de la session spéciale ”Recent advances in reliability modeling, maintenance and production optimization in manufacturing systems” organisée à ”International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2017)” (Co-chairs : Dr. C. Diallo, Prof. E.H. Aghezzaf, Dr. U. Venkatadri)
- Co-chair de la session spéciale ”New approaches in systems reliability evaluation and maintenance optimization” organisée à la ”International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2013)” (Co-chairs : Dr. M. Dahane, Prof. D. Ait-Kadi)
- Co-chair de la session spéciale ”Reliability & Maintenance : Modelling and optimisation” organisée à la ”Conférence internationale de Conception & Production Intégrées (CPI 2013)” (Co-chairs : Dr. M. Dahane, Prof. E.H. Aghezzaf)
- Co-chair de la session spéciale ”Maintenance et Fiabilité” à la ”International Conference of Modelling and Simulation (MOSIM 2014)” (Co-chairs : Dr. M. Dahane, Prof. E.H. Aghezzaf)

- Co-chair de la session spéciale "Remanufacturing et logistique inverse" organisée à la "International Conference of Modelling and Simulation (MOSIM 2014)" (Co-chairs : Dr. M. Dahane, Prof. E.H. Aghezzaf)
- Co-chair de la session spéciale "Quality, Reliability, Maintenance and Support Models for Remanufacturing End-of-Life Products" organisée à la "IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM 2015)" (Co-chairs : Dr. C. Diallo, Prof. E.H. Aghezzaf)
- Chair de la session "Reliability & Maintenance" à la "IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM 2016)"
- Chair de la session "Stochastic Systems-1" à la "International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE44 2014)"
- Chair de la session "Scheduling-2" à la "International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE44 2014)"
- Chair d'une session "Maintenance and reliability" du Track T2 à la "International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2011)"

3.3.3 Séjours scientifiques (Professeur invité) à l'étranger

- École de Technologie Supérieure (ETS), Montréal, Canada (Prof. A. Gharbi)
- Université de Gand, Gand, Belgique (Prof. E. H. Aghezzaf)
- École Nationale des Sciences Appliquées (ENSA) de Tanger, Tanger, Maroc, (Dr. O. Kamach)

3.3.4 Collaborations scientifiques

L'ensemble des collaborations que j'ai initiées en qualité de Maître de Conférences sont données par la table (2.6). Ces collaborations se sont concrétisées par différentes actions telles que de rédaction d'articles de conférences ou de revues internationales, d'organisation de sessions spéciales dans des conférences internationales, de co-direction d'étudiants en Masters et en thèse de doctorat, ou encore d'élaboration et montage de projets communs de recherche.

Collaborations internationales	
Collaborateur	Établissement
Prof. E.H. Aghezzaf	Université de Gand, Belgique
Dr. C. Diallo	Université de Dalhousie, Canada
Prof. D. Ait-Kadi	Université Laval, Canada
Dr. N. Nahasse	King Fahd University of Petroleum, Arabie Saoudite
Dr. U. Venkatadri	Université de Dalhousie, Canada
Prof. Z. Sarri	Université Boubaker de Tlemcen, Algérie
Dr. I. Sidibé	Centre de Formation et de Perfectionnement en Statistique, Mali
Dr. O. Kamach	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tanger, Maroc
Prof. M. Nourelfath	Université Laval, Canada
Collaborations nationales & locales	
Collaborateur	Établissement
Dr. M. Sahnoune	Centre de l'Enseignement en Sciences de l'Ingénieur (CESI)
Dr. M. Dahane	Université de Lorraine, ENIM, LGIPM
Dr. S. Dellagi	Université de Lorraine, UFR MIM, LGIPM
Prof. N. Rezg	Université de Lorraine, UFR MIM, LGIPM

Table 2.6 – Liste des collaborations internationales et nationales

3.3.5 Responsabilités scientifiques liées à des projets de recherche

P1 Développement d'une application de gestion des défaillances du réseau de transport

- Type de projet : région (2009)
- Responsabilité : Membre du projet

P2 Conception d'une architecture de système distribuée de maintenance sûr de fonctionnement

- Type de projet : région (2011)
- Responsabilité : Porteur

3.3.6 Autres responsabilités scientifiques

- Juin 2018-juin 2021 : Membre expert (nommé à la suite d'une sélection de candidatures) du groupe Génie Civil, Industriel et des Systèmes (Groupe référencé 1509) du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada (*Natural Sciences and Engineering Research Council : NSERC*).
- Éditeur associé de la revue internationale "*International Journal of Remanufacturing*" des éditions Inderscience. Cette responsabilité est exercée depuis 2015.
- Co-Président du comité d'organisation de la "Conférence Internationale Conception et Production Intégrées" (CPI, 2015).
- Membre du comité scientifique de plusieurs conférences internationales (voir la Section 3.3.1).
- organisateur de plusieurs session spéciale dans des conférences internationales (voir la Section 3.3.2)
- Évaluateur d'articles de plusieurs conférences et revues internationales (voir les table 2.4 et 2.5).

4 Prime à la recherche scientifique et promotion

Depuis 2015, je bénéficie de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche. Attribuée par le Conseil National des Universités (CNU, section 61), cette prime est de catégorie "A".

Par ailleurs, après examen de mon dossier de suivi de carrière, la section 61 du CNU a émis un avis, je cite "bon niveau d'activité dans les trois missions du métier d'enseignant chercheur" et une recommandation, je cite "très bon dossier sur les plans scientifique et pédagogique permettant au candidat de passer son HDR".

Récemment, je suis promu MCF hors classe. Cette promotion m'a été octroyée par le CNU.

Chapitre 3

Résumé des activités pédagogiques et administratives

1 Introduction

Sur le plan pédagogique, mon expérience regroupe trois activités pédagogiques réalisées dans trois pays différents et à des niveaux universitaires différents : en France en qualité d'ATER à l'INSA de Lyon et puis en qualité de Maître de Conférences à l'Université de Lorraine ; au Canada en qualité de chargé de cours à l'Université du Québec ; et au Maroc où j'ai débuté ma carrière dans l'enseignement supérieur en qualité de Professeur assistant à l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Mohammedia.

Au travers de ces expériences, mes activités d'enseignement ont couvert un large spectre de matières pédagogiques que ce soit en termes de cours magistraux, de travaux dirigés ou encore de travaux pratiques. J'ai pu alors dispenser des enseignements tels que d'électronique, d'automatique, d'informatique, d'instrumentation, ainsi que des enseignements relevant du domaine du Génie industriel. Durant cet exercice, j'ai eu la responsabilité de monter ou de participer au montage de plusieurs enseignements (cours, TD et TP) dans des disciplines diverses et variées. En plus des activités d'enseignement, j'ai également eu la responsabilité de suivi de stages, de participation à des jurys de soutenance de stages. Je participe activement auprès de la direction des relations industrielles de l'ENIM à la prospection de projets de fin des études pour les étudiants en fin du cycle ingénieur.

Dans ce chapitre, nous exposerons une synthèse des activités pédagogiques assurées jusqu'à présent. Dans un premier temps, nous exposerons les activités pédagogiques exercées en qualité de Maître de conférences et d'ATER, suivront mes activités d'enseignement lors de mon séjour en qualité de Postdoctorant au Canada. Nous terminerons par une brève synthèse de mes activités pédagogiques assurées au Maroc.

2 Activités pédagogiques en qualité de MCF

En qualité de Maître de conférences, mes activités pédagogiques se sont déroulées sur deux composantes de l'Université de Lorraine, à savoir l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM) et l'UFR de Mathématique, Informatique et de Mécanique (MIM) ; l'ENIM étant la composante de rattachement. Ces activités pédagogiques incluent des activités d'enseignement, d'encadrement de stages ainsi que de recrutement des étudiants. Le reste de cette section donne une synthèse de ces activités.

2.1 Activité d'enseignement

En tant que MCF, mes activités d'enseignement se déroulent en France mais également à l'étranger dans le cadre de Masters délocalisés. Elles concernent des enseignements particulièrement liés à mon domaine de recherche et relèvent des processus stochastiques, de l'évaluation de la fiabilité et de la

gestion de la maintenance des systèmes. Tous ces cours ont été montés lors de mon recrutement en tant que MCF. Pour l'année universitaire 2017-2018, ces enseignements sont dispensés comme suit :

- Université de Lorraine - ENIM (cycle ingénieurs) : 5^{ème} année, Option maintenance industrielle et gestion des installations (Cours : 14h, TD : 16h, TP : 28h).
- Université de Lorraine - ENIM (cycle ingénieurs) : 5^{ème} année, Option Qualité et amélioration continue (Cours : 16h, TD : 16h).
- Université de Lorraine - ENIM (cycle ingénieurs) : 1^{ère} année, 10h de TP de mathématique.
- Université de Lorraine - ENIM & ENSAM-Metz : Master 2 recherche KIMP-CII¹ (cours : 6h, TD : 6h).
- Université de Lorraine - UFR MIM : Master 2 Génie des Systèmes Industriels (M2 GSI) (cours : 18h, TD : 14h).
- Master 2 GSI délocalisé (Maroc) : École Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI) de Casablanca (cours : 20h).
- Master 2 GSI délocalisé (Pologne) : The International University of Logistics and Transport of Wroclaw (cours : 20h, cours dispensé en Anglais).

Le détail de ces enseignements est donné par la table (3.1). Dans cette table, seuls les cours dispensés au niveau master et en 5^{ème} année du cycle ingénieur à l'ENIM y sont indiqués, l'effectif mentionné est donné en valeur moyenne et à titre indicatif.

Pour les années universitaires antérieures, j'ai eu l'occasion de dispenser également d'autres enseignements à l'ENIM. Au niveau 1^{ère} année, j'ai dispensé des TP d'électronique. Au niveau 2^{ème} année, des TD d'algorithmie ainsi que des cours et des TP d'informatique ont été également donnés. Au niveau 3^{ème} année, j'ai assuré un TP sur la robotique en utilisant les outils de Dassault System. Au niveau 3^{ème}, j'ai aussi dispensé des TD en régulation (automatique linéaire).

2.2 Activités d'encadrements pédagogiques

En plus des enseignements dispensés, j'assure l'encadrement et le suivi des étudiants durant leurs stages et projets de fin d'études. Ces encadrements sont comme suit :

- Encadrement des stages de 2^{ème} et 4^{ème} années à l'ENIM.
- Encadrement des projets de fin d'études à l'ENIM.
- Encadrement de stages de Master professionnel M2 Génie des Systèmes industriels (GSI).
- Encadrement de stages d'initiation à la recherche pour les étudiants du Master professionnel M2 Génie des Systèmes industriels (GSI).

2.3 Responsabilités pédagogiques

- Responsable de l'option Qualité et Amélioration Continue à l'ENIM de 2010 à 2013.
- Responsable du Master 2 de Génie des Systèmes Industriels (GSI), pour les deux parcours recherche et professionnel, à l'ENIM de 2013 à 2017.

2.4 Autres activités liées à la pédagogie

- Participation au concours de recrutement des étudiants à l'ENIM.
- Montage d'un nouveau programme pédagogique de l'option "Qualité et Amélioration Continue" de l'ENIM.
- Prospection et négociation auprès des industries des stages de fin d'études.

1. Master 2 Knowledge Integration in Mechanical Production, spécialité Conception, Industrialisation, Innovation) est commun entre l'ENIM et l'ENSAM (site de Metz).

ENIM			
Matière	Vol. Horaire	Nature	Effectif
Fiabilité et Maintenance	58	CM(14h) TD (16h) TP (28h)	11
Gestion de la maintenance	32	CM (16h) TD (16h)	13
Budget de la Maintenance	32	CM (8h) TD (4h) TP (12h)	11
M2 KIMP-CII ENIM/ENSAM			
Matière	Vol. Horaire	Nature	Effectif
Systèmes à Événements Discrets	12	CM (6h) TD (6h)	20
UFR MIM			
Matière	Vol. Horaire	Nature	Effectif
Fiabilité et Maintenance 1	16	CM (10h) TD (6h)	40
Fiabilité et Maintenance 2	16	CM (8h) TD (8h)	40
M2 GSI au Maroc			
Matière	Vol. Horaire	Nature	Effectif
Fiabilité et Maintenance	20	CM	12
M2 GSI en Pologne			
Matière	Vol. Horaire	Nature	Effectif
Reliability and Maintenance	20	CM	10

Table 3.1 – Principales matières dispensées au niveau M2 : MCF à l'Université de Lorraine.

3 Activités pédagogiques en qualité d'ATER

Après ma soutenance de thèse, j'ai exercé des activités pédagogiques en occupant des postes d'ATER au département de Génie Industriel (2000 - 2002) et au département Informatique de l'INSA de Lyon (2002 - 2004). J'ai eu l'occasion de participer au montage de différents modules de TP et de TD, et ce dans des domaines variés de l'informatique, de la gestion de production et d'aide à la décision. La table (3.2) donne un aperçu des principales matières dispensées durant ces quatre années d'ATER. Les séances de TP et TD sont réalisées pour un effectif moyen de 15 étudiants.

Matière	Volume Horaire	Nature	Niveau	Effectif
Systèmes temps réel	228	TP	M1	15
Gestion de production	128	TP	M1	15
Informatique (C, C++, Linux)	76	TP	L3	15
Réseaux locaux industriels	64	TP	M1	15
Aide à la décision	60	TP	M1	15
Architecture matérielle	32	TP	L3	15
Systèmes multitâches	16	TP	L3	15
Algèbre linéaire	8	TD	L3	15

Table 3.2 – Principales matières dispensées : ATER à l'INSA de Lyon.

4 Activités pédagogiques en qualité de Postdoctorant

Lors de mon séjour de Postdoctorat à l'Université Laval, j'ai été recruté sur un poste de chargé de cours (hiver 2006) au département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). J'ai alors monté un cours sur l'instrumentation industrielle (3 crédits). Le cours est dispensé au niveau ingénieur.

Pour cette intervention, j'ai eu la note d'excellence en enseignement à la suite de l'évaluation des étudiants du cours dispensé.

Par ailleurs, pendant cette période de Postdoctorat, j'étais membre d'une commission d'experts (avril-juin 2007) pour la création et le montage d'un Master en Hygiène, Santé, Sécurité et Développement durable (Master HSQE), à l'École Supérieure d'Ingénieurs en Textile et Habillement (ESITH) de Casablanca-Maroc.

5 Activités pédagogiques en qualité de Professeur assistant au Maroc

Pendant les quatre années (1992 - 1996) d'exercice en qualité de Professeur assistant au sein du département de Génie électrique à l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Mohammedia au Maroc, j'ai participé à l'élaboration de notes de cours, de manuels de travaux pratiques et de travaux dirigés dans différentes matières telles que l'électronique, l'automatique, l'automatisme, l'informatique et la technologie d'électronique. Au cours de cette période, j'ai également encadré et participé à plusieurs projets de fin d'études.

Deuxième partie

Synthèse des activités de recherche en qualité de MCF

Introduction

1 Cadre et objectif généraux

La concurrence industrielle, les exigences accrues du marché international et les contraintes environnementales incitent les entreprises à une meilleure gestion et une exploitation rationnelle des systèmes industriels de production quelle qu'en soit la nature. Une telle gestion concerne non seulement la phase d'exploitation, mais concerne également les phases de conception et de fin de vie des systèmes. De plus, la gestion d'un système industriel est souvent réalisée selon des objectifs tenant compte simultanément de performance économique et de sûreté de fonctionnement. Ces dernières se matérialisent par des performances exprimées en termes de fiabilité, de disponibilité, de sécurité et de respect de l'environnement. Par conséquent, il est plus que nécessaire pour toute entreprise de disposer de véritables outils de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision pour assurer une gestion optimale et rationnelle de ces installations. Ce besoin est d'autant plus pressant dans un environnement industriel en pleine mutation et des systèmes technologiques en progrès constant. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre thématique de recherche. Nos travaux visent à apporter des contributions par le développement d'approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision pour les systèmes industriels sujets à des défaillances aléatoires.

Nos travaux de recherche s'appuient essentiellement sur des outils mathématiques issus des théories de probabilité et des processus stochastiques combinés à des outils émanant de la recherche opérationnelle. La finalité de ces travaux est de contribuer par des approches qui privilégient la recherche fondamentale, sans toutefois négliger les considérations et les contraintes liées à la réalité industrielle.

L'objectif général de nos travaux de recherche consiste à développer des approches formelles de planification des stratégies de production et de maintenance combinées à des stratégies de garantie en incluant des critères liés à la qualité, la sécurité et le respect de l'environnement. L'ensemble des approches développées permet d'apporter des solutions et des éléments de réponse à des problématiques liées à la typologie et au profil des missions des systèmes considérés, aux conditions et interactions avec l'environnement d'exploitation, aux incertitudes liées à la qualité des actions de maintenance, aux incertitudes liées à la qualité des pièces de rechange, aux données de fiabilité et de retour d'expérience, et à l'obsolescence des technologies.

Ces problématiques englobent celles exposées dans nos axes de recherche dans le Chapitre 2 de la première partie de ce mémoire. À chacune d'elles correspond un ou plusieurs verrous scientifiques. Dans un souci d'offrir une vue globale et synthétique des résultats de nos travaux de recherche, nous nous limitons à exposer nos contributions pour une sélection variée de problématiques associées à chacun de nos trois axes de recherche. Les résultats et les contributions obtenus pour les autres problématiques sont mentionnés dans des papiers publiés soit dans des conférences ou dans des revues. Ces références sont également mentionnées à la fin de la description de chaque problématique traitée (Partie I, Chapitre 2, Section 3.1). À chaque problématique traitée correspond un chapitre à part entière où sont exposés une revue de littérature, le positionnement et la contribution de nos travaux, ainsi que des résultats numériques permettant d'illustrer et valider nos approches.

Avant de passer aux détails des approches proposées comme éléments de réponse concernant la sélection des problématiques exposées dans la suite de ce mémoire, dans un premier temps, nous exposerons ces problématiques en spécifiant, pour chacune d'elle, le contexte ainsi qu'une revue de littérature permettant le positionnement de nos travaux. Dans l'exposé de ces problématiques, figureront également nos

contributions. Dans un second temps, l'organisation de la suite de cette seconde partie de notre manuscrit sera décrite.

2 Travaux de recherche : une sélection de problématiques

2.1 Problématiques liées à l'axe A_1 : Stratégies de maintenance des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et dans un contexte de développement durable

2.1.1 Contexte

Le contexte de mes travaux de recherche menés dans cet axe se situe dans le cadre d'une chaîne logistique inverse incluant les contraintes écologiques et de développement durable. Une chaîne logistique inverse est la partie inverse d'une chaîne logistique à boucle fermée. Cette dernière est en effet composée d'une chaîne logistique directe (*forward supply chain*) et d'une chaîne logistique inverse (*reverse supply chain*) [1, 2]. Selon Min et ses co-auteurs [3], la chaîne logistique en boucle fermée peut être définie comme un ensemble d'activités telles que d'acquisition, de distribution et de commercialisation concernant les retours (récupérations) de produits, d'inspection, de recyclage, de substitution, de réutilisation, d'élimination, de démontage, et de remanufacturing. Dans [4], Wassenhove et Guide adoptent un autre point de vue et définissent une chaîne logistique à boucle fermée par "la conception, le contrôle et l'exploitation d'un système pour maximiser la création de valeur sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit avec une récupération dynamique de la valeur à partir de différents types et volumes de retours dans le temps".

En tenant compte des contraintes liées à la protection de l'environnement et de développement durable, d'autres variantes de la définition de la chaîne logistique ont été proposées dans la littérature pour tenir compte des ressources exploitées, des pertes encourues et de la taxe carbone. Ces nouvelles préoccupations ont donné naissance à un nouveau management dit vert (*green*) des chaînes logistiques (*Green Supply Chain Management*) [2, 5]. Dans la littérature, il existe plusieurs définitions de la chaîne logistique verte. La définition qui fait consensus est probablement celle proposée par Srivastava [5] et consiste à "Intégrer la réflexion environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, y compris la conception du produit, l'approvisionnement et la sélection des matériaux, les processus de fabrication, la livraison du produit final aux consommateurs ainsi que la gestion du produit après sa vie utile". Dans ce contexte, des revues de littérature ont été conduites et proposées par Diallo et. al. [2], Agrawal et. al. [1], et plus récemment par De Oliveira et. al. [6].

Selon les revues de littérature [1, 2], les principales étapes qui forment une chaîne logistique inverse sont décrites comme suit :

- **Aquisition** : cette étape définit le processus d'acquisition de produits, de composants ou de matériaux utilisés par les clients finaux pour un traitement ultérieur. Les retours de produits sont généralement incertains en termes de temps, de quantité et de qualité, leur acquisition est importante pour la conception d'une chaîne logistique inverse [7, 2, 8]. Selon Wassenhove et Guide [4], l'acquisition de produits est la première étape et constitue un processus essentiel pour la rentabilité d'une chaîne logistique inverse.
- **Collecte** : cette étape fait référence à l'activité dans laquelle une entreprise acquiert des produits retournés [7, 2, 1]. Après l'étape d'acquisition, les produits sont collectés et livrés aux différentes installations d'inspection, de tri et d'élimination. Trois méthodes de collecte sont possibles : une collecte directement auprès des clients, via les détaillants ou encore par le biais de la logistique tierce [1].
- **Inspection & tri** : Les retours de produits peuvent être des retours commerciaux, des retours de service, des retours de distribution ou des retours en fin de vie. Le client peut retourner les produits pour des raisons connues ou inconnues, et l'état des produits retournés peut différer considérablement. Une inspection est donc nécessaire pour trier les produits afin de les diriger par la suite vers les étapes convenables de la chaîne logistique [1].

-
- **Recyclage** : cette étape réfère au processus de récupération de la matière contenue dans les produits retournés [1]. Cette étape est une décision qui émane de l'étape d'inspection et de tri.
 - **Remanufacturing** : C'est le processus qui consiste à récupérer un produit en fin de vie et de lui faire subir un ensemble d'actions (désassemblage, nettoyage, réparation et remplacement de composants, et assemblage) [2]. A l'issue de cette étape, le produit récupéré est reconditionné avec des performances pouvant être équivalentes à celles d'origine.
 - **Réutilisation** : Cette étape peut inclure des actions de réparation et consiste à remettre en service un produit récupéré. Plusieurs types de réutilisation sont possibles. Le premier type consiste, lorsque le produit récupéré présente des performances satisfaisantes, en une réutilisation directe du produit en l'injectant dans la chaîne de distribution. Le second type est un redéploiement alors que le troisième type de réutilisation est la réaffectation d'une partie ou de la totalité du produit récupéré à un autre usage.

2.1.2 Positionnement et contribution scientifiques

Les travaux de recherche menés dans cet axe de recherche reposent sur des constats issus de la littérature quant au développement d'approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision en maintenance dans une chaîne logistique à boucle fermée. Ces travaux tentent d'apporter des solutions à des problématiques en maintenance des systèmes en tenant compte des contraintes liées, d'une part, aux interactions du système avec son environnement d'exploitation, et d'autres part, aux différents processus relatifs aux étapes de la chaîne logistique inverse. Les systèmes considérés peuvent être neufs ou en fin de vie. Dans la seconde catégorie de systèmes, nos travaux de recherche visent à développer des approches d'optimisation de stratégies de maintenance combinées à des stratégies de garantie qui intègrent explicitement les étapes de la chaîne logistique inverse, en particulier, la réutilisation, le remanufacturing ainsi que l'inspection & tri. Cette dernière étape est concrétisée, dans nos travaux, par la qualité des pièces de rechange utilisées lors de la réalisation des actions de maintenance. Nos problématiques de recherche P_1A_1 , P_3A_1 et P_4A_1 exposées au Chapitre 2 font référence, respectivement, aux étapes de réutilisation, du remanufacturing et d'inspection & tri. Dans le cadre de ces problématiques, les approches proposées sont traitées en détail dans les chapitres, respectivement, 4, 5 et 6 de la Partie II du présent manuscrit.

S'agissant de nos contributions scientifiques de nos travaux de recherche de l'axe A_1 , elles sont réalisées dans le cadre de deux travaux de thèse de doctorat (référéncées TD4 et TD5) à la Section 3 du Chapitre 2, et dans le cadre de collaborations académiques locales et internationales avec des collègues d'universités à l'étranger. L'ensemble de nos contributions a fait l'objet de six articles publiés dans des revues internationales avec comités de lecture, un chapitre d'ouvrage, neuf articles publiés dans des conférences internationales avec comités de lecture. Ces publications sont listées dans le descriptif de chaque problématique liée à notre premier axe de recherche à la Section 2.1 et détaillées à la Section 2.2 du Chapitre 2.

2.2 Problématiques liées à l'axe A_2 : Modélisation et analyses de performances des systèmes complexes multi-mission

2.2.1 Contexte

Depuis les années 60, plusieurs stratégies de maintenance ont été développées comme extension des travaux de Barlow et ses coauteurs [9, 10]. Cependant, la majorité de ces extensions se limitent souvent à considérer le système comme réduit à un seul composant critique [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Avec le développement des nouvelles technologies, les systèmes industriels incorporent plusieurs composants en interaction et sont devenus de plus en plus complexes. L'optimisation des stratégies de maintenance à l'échelle d'un composant ne garantit pas une stratégie de maintenance optimale au niveau global du système. C'est la raison pour laquelle, un grand nombre de travaux ont développé des approches d'optimisation des stratégies de maintenance dédiées aux systèmes multi-composant [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

Les travaux de recherche menés dans cet axe de recherche concernent le développement de stratégies de maintenance pour les systèmes complexes. Dans nos travaux, le terme "complexe" fait référence à des systèmes multi-composant où les composants peuvent être connectés selon un diagramme bloc de

fiabilité combinant plusieurs types de structure de base (série, parallèle, k -parmi- n , etc.) et peuvent également être dépendants les uns des autres. Dans la littérature, on distingue trois types de dépendance : économique, structurelle et stochastique [24, 11, 18]. La dépendance économique fait référence au cas où les structures des coûts de maintenance des composants d'un système présentent des liens tels que le coût total engendré par une activité de maintenance sur un groupe de composants n'est forcément pas égal à la somme des coûts de maintenance de tous les composants du groupe. On distingue aussi deux types opposés de dépendance économique : positive et négative [18, 25, 22, 23, 14]. La première stipule que le coût résultant de la maintenance d'un groupe de composants est inférieur à la somme des coûts résultants de la maintenance individuelle de chaque composant du groupe. Une dépendance stochastique implique que la détérioration d'un composant a une chance d'impacter celles d'un ou plusieurs composants. Une telle dépendance rend l'évaluation de la fiabilité du système et les modèles de maintenance très compliqués à entreprendre. Une dépendance structurelle, comme son nom le reflète, se présente lorsqu'un lien physique existe entre un composant et un groupe de composants. Ces liens se présentent plus particulièrement lors des opérations de montage et de démontage [26].

Dans ce domaine de recherche, la majorité des travaux existants se base sur l'hypothèse stipulant que le système opère, dans le temps, de manière continue. Pour cette catégorie de systèmes, les stratégies de maintenance, qu'elle soient de type groupé ou opportuniste, sont planifiées sur un horizon infini ou fini [23, 19, 27, 28]. Les modèles de maintenance opportuniste ont été largement examinés dans la littérature [29]. Généralement, ces modèles sont formulés dans deux cadres principaux, à savoir, la maintenance basée sur le temps (*Time-Based Maintenance* : TBM) et la maintenance conditionnelle (*Condition-Based Maintenance* : CBM). Dans le premier cadre, la maintenance opportuniste n'est réalisée que lorsque l'âge du système dépasse un seuil prédéterminé [23, 12, 25, 30]. Dans le second cadre, la réalisation d'une maintenance opportuniste est liée à l'état de dégradation du système [23, 31]. Zhu et al. [32] ont introduit une stratégie à plusieurs niveaux permettant de réaliser simultanément un remplacement régulier et opportuniste. Qiu et al. [33] ont proposé un modèle de maintenance opportuniste pour des systèmes sujets à des modes de défaillance multiples. Dans le cadre de la CBM, Babishin et Taghipour [34] ont étudié les politiques de maintenance optimales pour les systèmes multi-composant avec des inspections périodiques et opportunistes.

Notre axe A_2 de recherche est dédié au développement de stratégies de maintenance pour une classe de systèmes multi-composant dont le fonctionnement consiste à réaliser des missions telles qu'entre deux missions un arrêt est planifié pour une durée déterminée. De tels systèmes sont souvent rencontrés plus particulièrement dans les industries maritime, nucléaire, de transport ou encore militaire. Afin d'améliorer les performances du système pour exécuter sa prochaine mission, les composants du système peuvent être maintenus pendant les arrêts planifiés. Cependant, les ressources en maintenance sont souvent limitées en termes des durées allouées aux arrêts, du nombre d'opérateurs en maintenance, et de budget. De ce fait, seul un groupe limité de composants sont sélectionnés pour subir des opérations de maintenance. Une telle stratégie de maintenance s'apparente à des stratégies de maintenance groupée ; elle est dite maintenance sélective [35, 36, 37, 38, 39, 40]. L'objectif étant de développer des modèles d'optimisation pour obtenir la meilleure sélection, ou le meilleur groupe, de composants à maintenir, et permettant de maximiser la fiabilité du système pour la prochaine mission ou encore de minimiser les coûts de maintenance. Cette sélection est normalement réalisée sous des contraintes de ressources en maintenance ou de niveau de fiabilité du système à achever sa mission suivante.

2.2.2 Positionnement et contribution scientifiques

Les travaux de recherche résumés dans cet axe de recherche reposent sur des constats issus de la littérature quant au développement d'approches de planification de la maintenance sélective. Nos travaux ont pour objectif d'apporter des solutions à des problématiques de maintenance sélective tenant compte des incertitudes liées au profil de la mission et à la qualité des actions de maintenance. Nos travaux abordent également d'autres problématiques liées aux modèles de dégradation des composants et à la structure du système ainsi qu'aux interactions entre les composants. Les modèles mathématiques d'optimisation résultants de ces problématiques de recherche sont non-linéaires et souvent stochastiques. La résolution de tels programmes est un challenge qui mérite un investissement considérable. Dans le cadre de ces problématiques, les approches proposées sont traitées en détail dans les Chapitres,

respectivement, 7 et 8 de la Partie II du présent manuscrit.

S'agissant de nos contributions scientifiques de nos travaux de recherche de l'Axe 2, elles sont réalisées dans le cadre d'une thèse de doctorat (référéncée TD3 à la Section 3 du Chapitre 2) et dans le cadre de collaborations académiques locales et internationales avec des collègues d'universités à l'étranger. L'ensemble de nos contributions a fait l'objet de cinq (5) articles publiés dans des revues internationales avec comités de lecture et sept (7) articles publiés dans des conférences internationales avec comités de lecture. Ces publications sont listées dans le descriptif de chaque problématique liée à notre premier axe de recherche à la Section 2.1 et détaillées à la Section 2.2 du Chapitre 2.

2.3 Problématiques liées à l'axe A_3 : Planification intégrée de la production et de la maintenance des systèmes de production

2.3.1 Contexte

Le problème de la planification (ordonnancement) de la production a été largement traité dans la littérature et plusieurs modèles mathématiques d'optimisation ont été développés [41, 42, 43, 44]. Ces modèles sont majoritairement déterministes et développés dans l'objectif de maximiser ou de minimiser une mesure de satisfaction donnée (coût, stock, production, etc.) Les méthodologies de résolution de tels problèmes d'optimisation varient de la programmation en nombres entiers à laquelle sont associées des techniques de Branch & Bound, à la relaxation lagrangienne, et des heuristiques et métaheuristiques.

Dans le but d'améliorer leur fiabilité, les systèmes de production opèrent sous des stratégies de maintenance. Depuis les travaux de Barlow et ses coauteurs [9, 10], la littérature concernant les modèles mathématique pour l'analyse, la planification et l'optimisation de la maintenance préventive abonde dans la littérature [24, 11, 18, 23, 15, 12, 30, 22, 23, 13, 14]. Les modèles de planification de la maintenance préventive sont généralement des modèles d'optimisation stochastique ayant comme objectif de maximiser la disponibilité du système ou de minimiser les coûts de maintenance, en particulier. Ces modèles peuvent être résolus par des méthodes analytique ou de simulation.

Les activités de la production et de la maintenance préventive répondent à des objectifs mutuellement conflictuels. Cependant, la planification de la maintenance préventive et l'ordonnancement de la production sont deux activités interdépendantes. En effet, les activités de maintenance préventive prennent du temps qui pourrait autrement être alloué à la production, mais d'un autre côté, retarder l'exécution des actions de maintenance préventive peut avoir un impact néfaste sur la fiabilité (disponibilité) du système de production, mais également sur la qualité de la production. Ces deux activités sont généralement effectuées de manière séquentielle voir indépendante malgré cette relation de corrélation claire qui existe entre elles. En conséquence, les plans résultants de production et de maintenance ne sont souvent pas optimaux lorsque l'objectif est celui qui consiste, en particulier, à minimiser les coûts globaux de maintenance et de production. Cependant, il a été démontré dans la littérature qu'adopter une approche globale d'optimisation des plans de production et de maintenance permet d'atteindre un équilibre entre ces deux activités.

2.3.2 Positionnement et contribution scientifiques

Nos travaux développés dans cet axe de recherche s'inscrivent dans le cadre de la planification conjointe de la production et de la maintenance des systèmes de production. L'objectif étant de développer des modèles de planification intégrée de la production et de la maintenance préventive. Pour la planification de la production, nous déterminons les quantités de produits (tailles de lots) à produire. Le réglage de la taille des lots est généralement considéré comme une décision liée à la planification tactique. Dans la planification globale, les modèles de dimensionnement des lots sont étendus en incluant les décisions relatives à d'autres ressources issues des activités de maintenance.

Dans cet axe de recherche, nos travaux abordent des problématiques liées aux modèles de dégradation et la structure du système de production, ainsi qu'aux interactions entre les éléments le constituant. Les modèles mathématiques d'optimisation résultants de ces problématiques de recherche sont non-linéaires en nombre entier et NP difficiles. Leur résolution est un problématique traité également à part entière

dans nos travaux de recherche. Le développement de cet axe de recherche requiert des compétences indéniables en recherche opérationnelle combinées à des compétences en théorie de la fiabilité & maintenance, mais également des compétences en programmation informatique. Dans le cadre de ces problématiques, une de nos contributions est exposée en détail dans le Chapitre 9 de la Partie II du présent manuscrit.

S'agissant de nos contributions scientifiques de nos travaux de recherche de l'axe A_3 , elles sont réalisées dans le cadre d'une thèse de doctorat (référéncée TD3 à la Section 3 du Chapitre 2), et dans le cadre de collaborations académiques internationales avec des collègues d'universités à l'étranger. L'ensemble de nos contributions a fait l'objet de 1 article publié dans une revue internationale avec comités de lecture, 1 article en cours de révision soumis à une revue internationale avec comités de lecture, 1 chapitre de livre (Springer) et 3 articles publiés dans des conférences internationales avec comités de lecture. Ces publications sont listées dans le descriptif de chaque problématique liée à notre troisième axe de recherche à la Section 2.1 et détaillées à la Section 2.2 du Chapitre 2.

3 Organisation de la Partie II

Cette seconde partie de notre mémoire est structurée autour de sept chapitres incluant le présent chapitre d'introduction. Les chapitres 4, 5 et 6 relèvent des travaux du premier axe de recherche (axe A_1) ; les chapitres 7 et 8 sont dédiées aux travaux du deuxième axe de recherche (axe A_2) ; et le chapitre 9 traite des travaux de recherche liés au troisième axe de recherche (axe A_3). L'objet de chacun de ces chapitres est décliné dans ce qui suit.

Le chapitre 4 présente quelques résultats des travaux de recherche développés dans le cadre de la problématique P_1A_1 de notre premier axe de recherche. Rappelons que l'objectif de cette problématique de recherche vise à tenir compte de la variabilité des conditions d'exploitation des systèmes dans l'élaboration de modèles d'optimisation de stratégies de maintenance. Dans ce cadre, les contributions qui y sont mentionnées trouvent leur origine des travaux de thèse de Ibrahima Sidibé [45] et des publications dans des revues internationales [46, 47] et des conférences internationales avec actes et comités de lecture [48, 49, 50, 51].

Le chapitre 5 est consacré aux travaux de recherche développés dans le cadre de la problématique P_3A_1 de notre axe de recherche A_1 . Nous y présentons notre contribution au niveau d'un maillon de la chaîne logistique inverse : la gestion des systèmes de seconde main (SHS : *Second Hand System*) ou des système en fin de vie (EOLS : *End Of Life System*). Ce chapitre traite spécifiquement de l'impact des opérations de remanufacturing sur les stratégies de maintenance des SHS et des EOLS. La contribution de ce chapitre trouve son origine de nos travaux de collaboration [52, 53, 54].

Le chapitre 6 relève des travaux de recherche développés dans le cadre de la problématique P_4A_1 de notre axe de recherche A_1 . Ce chapitre présente une approche permettant la détermination d'une politique de garantie optimale où une mixture de pièces de rechange, neuves et reconditionnées, est utilisée pour effectuer des remplacements en cas de défaillance durant la période de garantie. La contribution de ce chapitre trouve son origine des résultats élaborés dans le cadre d'un travail de collaboration [8, 54, 55, 56].

Le chapitre 7 présente des travaux relevant de la problématique P_1A_2 de l'axe A_2 . Ce chapitre aborde le problème de l'optimisation de la maintenance sélective dans un système multi-composants. Il traite spécifiquement de l'impact des incertitudes liées à la qualité des actions de maintenance sur les décisions en maintenance. Ce chapitre développe un modèle d'optimisation non-linéaire et stochastique. L'aspect stochastique du modèle d'optimisation proposé est dû à la qualité incertaine des actions de maintenance. La contribution de ce chapitre trouve son origine d'un travail de collaboration [40].

Le chapitre 8 est également issu des travaux relevant de la problématique P_2A_2 de l'axe A_2 . Il aborde aussi le problème de l'optimisation de la maintenance sélective. Il présente une nouvelle approche de maintenance conditionnelle dans un système multi-composant effectuant plusieurs missions avec des arrêts planifiés. Cette nouvelle approche est dite Maintenance Conditionnelle Sélective (*Condition-Based*

Selective Maintenance : CBSM). Ce chapitre expose les résultats d'un travail de collaboration [57, 27].

Enfin, le chapitre 9 relève des travaux de recherche de la problématique P_1A_3 du troisième axe de recherche. Ce chapitre présente une approche intégrée de planification de la production et de la maintenance d'un système de production sujet à des défaillances aléatoires. Ce chapitre développe un modèle d'optimisation non-linéaire mixte en nombre entier et permet de mesurer l'impact de la maintenance imparfaite sur les décisions conjointes de production et de maintenance. La contribution de ce chapitre trouve son origine d'un travail de thèse en cours de réalisation dans le cadre d'une collaboration internationale [58, 59, 60].

Chapitre 4

Stratégies de maintenance des systèmes sous différents environnements d'exploitation

1 Introduction

La plupart des modèles de maintenance existants reposent sur l'hypothèse classique selon laquelle la distribution des durées de vie du système est bien caractérisée et a priori connue. En outre, la majorité des modèles d'optimisation de maintenance existants supposent que l'environnement dans lequel le système est exploité est statique et n'induit donc aucune modification des caractéristiques de fiabilité du système. Cette hypothèse est restrictive et ne reflète pas la réalité. En effet, dans de nombreux secteurs industriels, les systèmes peuvent accomplir leur mission dans des environnements d'exploitation chacun étant caractérisé par un degré de sévérité. Ce degré de sévérité reflète l'impact de cet environnement sur les performances du système. Par exemple, le processus de dégradation d'une machine minière est influencé par le niveau de sévérité des conditions environnementales dans lesquelles la machinerie est exploitée : boue, poussière, humidité, etc. Un autre exemple pourrait être les moteurs utilisés dans les engins de perforation et dont le processus de dégradation dépend de la charge mais également de l'environnement d'exploitation (conditions d'exploitation Onshore ou Offshore, par exemple). Dans d'autres industries, les systèmes de production sont d'abord exploités dans un environnement et ensuite transférés à un autre environnement d'exploitation pouvant être plus ou moins sévère que le premier. Beaucoup d'entreprises exploitent leurs machines dans leur pays d'origine pendant de nombreuses années avant de les expédier à leurs filiales dans d'autres pays où elles seront soumises à des conditions d'exploitation plus sévères. Les pays en voie de développement acquièrent des systèmes de pays développés et leur donnent une seconde vie mais dans des conditions d'exploitation plus stressées.

Ne pas tenir compte de la variabilité et de l'hétérogénéité des conditions d'exploitation des systèmes peut compromettre les décisions en maintenance et en production. Par conséquent, des stratégies de maintenance efficaces intégrant les conditions de fonctionnement hétérogènes devraient être développées pour évaluer d'une manière précise le processus de dégradation et permettre des prises de décisions appropriées.

Ce chapitre expose une approche statistique d'optimisation des stratégies de maintenance pour un système soumis à des défaillances aléatoires. Le système étant supposé avoir déjà été exploité pendant un certain intervalle de temps dans un environnement donné et ensuite transféré dans un nouvel environnement pour une autre utilisation. Chaque environnement d'exploitation est supposé être caractérisé par son propre degré de sévérité ayant un impact sur la fiabilité du système. L'approche que nous proposons permet de prendre en compte la variabilité et l'impact des conditions d'exploitation sur les performances du système. Elle relaxe l'hypothèse selon laquelle les distributions des durées de vie du système sont connues. Cette approche considère que ces distributions sont estimées à partir de données des durées de vie collectées dans chaque environnement d'exploitation.

Dans la littérature, il existe quelques travaux qui ont abordé l'optimisation des stratégies de maintenance sur la base de modèles statistiques non-paramétriques. Dans [61, 62], Coolen et. al. considèrent une stratégie de maintenance de type âge pour un système neuf. Selon cette stratégie de maintenance, le système est remplacé soit à la panne (remplacement correctif) soit à un âge donné (remplacement préventif). L'objectif étant de déterminer l'âge optimal de remplacement préventif qui minimise le coût total moyen de maintenance par unité de temps. La distribution des durées de vie du système est estimée en utilisant une méthode discrète d'estimation non-paramétrique qui est fondamentalement basée sur l'hypothèse $A(n)$ de Hill [63]. De la nature discrète de l'estimateur utilisé dans [61], les bornes inférieure et supérieure de la fonction fiabilité sont exploitées pour l'évaluation des bornes inférieure et supérieure de la fonction coût de maintenance. L'estimation de l'âge optimal de remplacement préventif est obtenue par la minimisation des bornes de la fonction coût de maintenance. Dans les travaux de Coolen et. al. [61], l'environnement d'exploitation est supposé stationnaire et sans impact aucun sur les performances du système.

D'autres travaux [64, 65, 66] considèrent un système neuf soumis à des défaillances aléatoires et sujet à une stratégie de maintenance dite de remplacement avec un seuil limite des temps de réparation (*Repair Limit Replacement policy*). Selon cette stratégie, le système fonctionne jusqu'à l'occurrence d'une panne après quoi une réparation est immédiatement lancée. Si la durée de l'activité de réparation dépasse une certaine limite donnée de temps, le système est alors remplacé par un système équivalent mais neuf. Dans le cas contraire, le système ainsi réparé est remis en service. Dans ce contexte, la variable de décision étant la durée limite de réparation. Dohi et. al. [64, 65, 66] supposent que la distribution des durées de vie est inconnue et proposent alors un modèle statistique d'optimisation dont l'objectif est d'estimer le seuil limite des temps de réparations qui minimise les coûts de maintenance par unité de temps. L'estimation de la durée limite optimale de réparation repose sur l'utilisation de la méthode d'estimation non-paramétrique du Noyau de Parzen combinée avec le concept du Temps Total de Test (TTT : *Total Time on Test*) [67, 68, 69]. Les travaux de [64, 65, 66] sont étendus par Rinsaka et Dohi [70] pour l'optimisation de la disponibilité stationnaire d'un système logiciel.

Dans ce travail de recherche nous avons abordé le problème d'optimisation des stratégies de maintenance pour un système conçu pour accomplir sa mission dans des conditions d'exploitation variables ayant un impact sur son processus de défaillance. Le problème traite spécifiquement le cas où le système est supposé avoir fonctionné dans un environnement d'exploitation initial et ensuite transféré pour une *seconde vie* dans un environnement d'exploitation plus sévère ou il est sujet à une stratégie de maintenance de type âge. Les distributions des durées de vie du système sont inconnues. Elles sont estimées à partir de données de durées de vie collectées dans les deux environnements d'exploitation. La méthode d'estimation est une méthode non-paramétrique du noyau de Parzen [71]. Pour estimer l'âge optimal de remplacement préventif dans le second environnement d'exploitation, nous proposons alors un modèle statistique d'optimisation dont l'objectif est d'estimer, le plus précisément possible, le coût total moyen de maintenance par unité de temps.

Contrairement aux travaux existants, notre approche est analytique, complètement basée sur les données de durées de vie et propose une estimation plus précise du coût de maintenance. Une telle modélisation remédie l'inconvénient et les limites de l'estimation discrète par intervalle [62, 61]. Elle démontre également une robustesse quant aux choix et variations des paramètres de l'estimateur du Noyau de Parzen. De plus, notre approche est plus réaliste du fait que les conditions d'exploitation du système sont explicitement prises en considération. La prise en compte de telles conditions induit une hétérogénéité dans les données de durées de vie augmentant, par conséquent, la complexité du modèle statistique d'optimisation des stratégies de maintenance. L'approche ainsi développée est une contribution au niveau de l'étape de "**réutilisation**" des systèmes dans une chaîne logistique à boucle fermée et durable.

Le reste de ce chapitre est composé de trois sections. La Section 2 pose le problème et donne une formulation probabiliste du modèle d'optimisation de la politique de maintenance adoptée. Les conditions d'existence et d'unicité d'une stratégie optimale sont formellement établies. Ces conditions permettent, dans le cas de la stratégie de maintenance étudiée, de déterminer l'âge optimal auquel un remplacement préventif doit être réalisé. Le modèle théorique ainsi développé repose bien entendu sur l'hypothèse de la connaissance a priori des distributions des durées de vie du système dans chaque environnement

d'exploitation. En relaxant cette hypothèse, le modèle statistique équivalent est développé dans la Section 3 en se basant sur la méthode d'estimation du Noyau de Parzen. Un exemple numérique est fourni dans la Section 4 afin d'illustrer notre approche.

2 Modèle probabiliste d'optimisation du coût de maintenance

Nous considérons un système sujet à des défaillances aléatoires et amener à accomplir sa mission dans deux environnements différents d'exploitation OE_1 et OE_2 ayant un impact sur la fiabilité du système. Le système, ayant achevé sa mission dans le premier environnement (OE_1), est transféré, à une date T_1 , à opérer dans les conditions plus sévères du second environnement OE_2 .

Le processus de défaillance du système étant plus intense dans OE_2 que dans OE_1 . De ce fait, le même niveau de dégradation du système est accumulé plus rapidement dans OE_2 que dans OE_1 . Il s'ensuit que fonctionner pour T_1 unités de temps dans OE_1 équivaut à opérer pour $T_2 < T_1$ unités de temps dans OE_2 . Une relation de correspondance doit être alors établie pour l'évaluation de l'âge équivalent du système lors d'un changement d'environnement d'exploitation.

Soit $R_j(t)$, $F_j(t)$ et $\lambda_j(t)$, respectivement, la fonction de fiabilité, la fonction de distribution des durées de vie et le taux de pannes du système exploité dans OE_j ($j = 1, 2$). La relation de correspondance entre toutes ces fonctions repose sur une fonction de transfert, ci-après notée par $\Phi(t)$, est basée sur le concept de l'âge statistique virtuel (*statistical virtual age*) initialement introduit par Finkelstein [72, 73]. Selon ce concept, $\Phi(T_1)$ est l'âge *virtuel* du système immédiatement après son transfert de OE_1 à OE_2 . Cette fonction de transfert est croissante et satisfait les relations suivantes :

$$R_1(T_1) = R_2(\Phi(T_1)) \text{ et } \Phi(0) = 0. \quad (4.1)$$

Les équations ci-dessus sont obtenues en supposant que le système est plus fiable dans OE_1 que dans OE_2 , soit alors $R_1(t) > R_2(t)$ pour $t \geq 0$. Cette inégalité des fonctions de fiabilité est équivalente au fait que les variables aléatoires des durées de vie du système dans les deux environnements d'exploitation sont ordonnées de manière stochastique (ordre statistique) [74]. Un exemple est donné par la figure (4.1) où les fonctions de fiabilité théorique du système dans OE_1 et OE_2 sont représentées. On peut noter que $R_1(t) > R_2(t)$ qui indique que dans OE_2 , le système est moins fiable que dans OE_1 . Il s'ensuit que l'exploitation de T_1 unités de temps dans OE_1 correspond au fonctionnement pour $\Phi(T_1) < T_1$ unités de temps dans le second environnement. En effet, supposons que le système a accompli sa mission dans OE_1 avec un âge de $T_1 = 15$ unités de temps et qu'il est ensuite transféré sous OE_2 . L'âge virtuel $\Phi(T_1)$ correspondant à l'âge initial T_1 immédiatement après le changement d'environnement est déterminé comme étant $\Phi(T_1) = 8$ unités de temps. Cela signifie qu'accumuler le même niveau de dégradation du système nécessite 15 unités de temps sous OE_1 alors qu'il n'en nécessite que presque 8 unités de temps sous OE_2 .

Afin d'améliorer la fiabilité du système dans sa seconde phase d'exploitation, une stratégie de maintenance de type âge (ARP) est adoptée. Les coûts des remplacements correctif et préventif sont notés, respectivement, par C_r et C_p (avec $C_p \ll C_r$). L'objectif est alors de déterminer l'âge de remplacement optimal T_0 qui minimise le coût total moyen par unité de temps $\mathbb{E}[C_{T_1}(T)]$ induit par les remplacements correctifs et préventifs. Le modèle probabiliste d'un tel coût est calculé en utilisant la théorie de renouvellement [74, 75, 76] :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[C_{T_1}(T)] &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_{T_1}(t)}{t} \\ &= \frac{\mathbb{E}[\text{Coût total par cycle}]}{\mathbb{E}[\text{durée du cycle}]} \\ &= \frac{C_r \times F_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)}) + C_p \times R_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)})}{\int_0^T R_2(t + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)}) dt}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

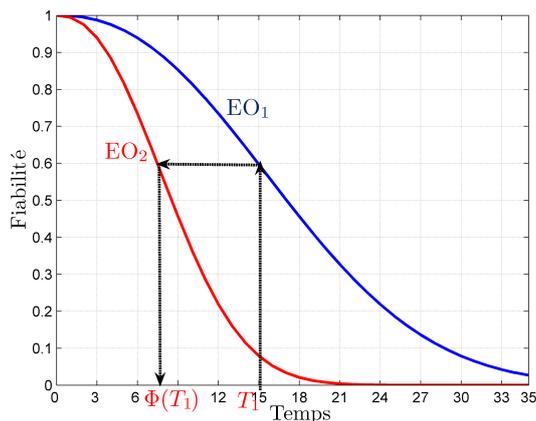


Figure 4.1 – La fonction de fiabilité sous deux environnements d'exploitation

où $F_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)})$ et $R_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)})$ sont respectivement les fonctions de distribution et de fiabilité conditionnelles du système dans le second environnement d'exploitation OE_2 . Ces deux fonctions sont évaluées telles que :

$$R_2(t + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)}) = \frac{R_2(t + \Phi(T_1))}{R_2(\Phi(T_1))} \text{ et } F_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)}) = 1 - R_2(T + \Phi(T_1)|_{\Phi(T_1)}). \quad (4.3)$$

Il en résulte alors un modèle probabiliste $\mathbb{E}[C_{T_1}(T)]$ de maintenance ARP pouvant s'écrire encore tel que :

$$\mathbb{E}[C_{T_1}(T)] = \frac{C_r R_1(T_1) - (C_r - C_p) R_2(T + \Phi(T_1))}{\int_{\Phi(T_1)}^{\Phi(T_1)+T} R_2(t) dt}. \quad (4.4)$$

La proposition suivante permet d'établir les conditions d'existence et d'unicité d'une stratégie optimale de maintenance. Rappelons que le taux de pannes du système dans le second environnement d'exploitation OE_2 est notée par $\lambda_2(t)$. Rappelons aussi qu'un taux de pannes est dit IFR (*increasing failure rate*) si et seulement s'il est strictement croissant en fonction du temps.

Proposition 4.1. *Si $\lambda_2(t)$ est IFR, alors il existe un âge optimal T_0 de remplacement. De plus, T_0 est fini si :*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_2(t) > \frac{C_r R_2(\Phi(T_1))}{(C_r - C_p) \int_{\Phi(T_1)}^{+\infty} R_2(t) dt}. \quad (4.5)$$

Le cas particulier où $T_1 = 0$ correspond au cas où un système neuf est directement exploité sous OE_2 sans passer par une phase d'exploitation dans le premier environnement OE_1 . Dans ce cas, le modèle de probabilité de coût total moyen par unité de temps de l'équation (4.4) correspond au modèle initialement proposé dans les travaux de Barlow et Hunter [9].

Le modèle probabiliste $\mathbb{E}[C_{T_1}(T)]$ est un modèle théorique qui suppose la connaissance des distributions des durées de vie du système. Le présent travail de recherche suppose que ces distributions sont inconnues mais estimées à partir de données des durées de vie. Dans ce qui suit, nous proposons un modèle statistique du coût total moyen par unités de temps engendré par la stratégie de maintenance. La méthode d'estimation non-paramétrique du noyau de Parzen sera utilisée [71].

3 Modèle d'optimisation statistique du coût de maintenance

La méthode d'estimation non-paramétrique du noyau de Parzen [71] est utilisée pour estimer la fonction de fiabilité et le coût total moyen de maintenance par unité de temps. Cette méthode

d'estimation a été largement exploitée dans la littérature [77, 78] et [79, 80, 81, 82].

Avant d'établir le modèle statistique des coûts de maintenance, nous exposons brièvement le principe de la méthode d'estimation du noyau de Parzen. Pour cela, considérons une collection des données de durées de vie t_{ji} ($i = 1, \dots, n_j$) observée à partir du fonctionnement du système exploité sous un environnement OE_j ($j = 1, 2$). Selon la méthode du noyau de Parzen, l'estimation $\hat{R}_j(t)$ de la fonction de fiabilité $R_j(t)$ du système dans l'environnement d'exploitation OE_j est donnée par :

$$\hat{R}_j(t) = \frac{1}{n_j h} \sum_{i=1}^{n_j} \int_t^{+\infty} K\left(\frac{u - t_{ji}}{h}\right) du, \quad (4.6)$$

où h représente le paramètre de lissage (*smoothing parameter*) et $K(t)$ est la fonction noyau (*Kernel*). Cette fonction noyau satisfait les conditions suivantes :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} K(t) dt = 1, \quad (4.7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} tK(t) dt = 0, \text{ et} \quad (4.8)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^2 K(t) dt < \infty. \quad (4.9)$$

Si on note par $K_s(t) = \int_t^{+\infty} K(x) dx$, alors l'estimation de la fonction fiabilité de l'équation (4.6) devient :

$$\hat{R}_j(t) = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} K_s\left(\frac{t - t_{ji}}{h}\right). \quad (4.10)$$

L'estimateur du noyau de Parzen est complètement défini par le paramètre de lissage h et la fonction noyau $K(t)$. À condition que les propriétés données par les équations (4.7)-(4.9) soient satisfaites, plusieurs distributions de probabilité peuvent être utilisées comme fonction noyau. Les fonctions de distribution couramment utilisées dans la littérature sont les distributions Normal, Gamma et Beta. Dans notre cas, une distribution normale est adoptée. La convergence de cet estimateur est fondamentalement liée à son paramètre de lissage plutôt qu'au type de distribution de la fonction noyau. Pour garantir la convergence, le paramètre de lissage h doit être choisi de telle sorte que h tende vers zéro et $n_j h$ tende vers l'infini pour une taille n_j suffisamment large de données. Une valeur appropriée du paramètre de lissage peut être calculée en minimisant une mesure d'erreur telle que l'erreur quadratique intégrale (ISE : *Integral Squared Error*) :

$$ISE = \int_0^{\infty} \left(\frac{dR_j(t)}{dt} - \frac{d\hat{R}_j(t)}{dt} \right)^2 dt \quad (4.11)$$

où $\left(\frac{dR_j(t)}{dt} - \frac{d\hat{R}_j(t)}{dt} \right)^2$ représente l'erreur quadratique entre les fonctions des densités de probabilités théorique et estimée.

D'autres types de mesures d'erreur telles que l'erreur quadratique moyenne intégrale MISE (*Mean Integral Squared Error*) et son approximation AMISE (*Approximated MISE*) sont également exploitées [83, 84]. Il existe un travail plus récent [79] où l'auteur discute et compare plusieurs mesures d'erreur pour calculer la valeur la plus appropriée du paramètre de lissage. Il est à noter que l'estimateur du noyau de Parzen est biaisé autour de 0 et introduit un décalage vers la gauche avec une valeur $-h$ de l'origine du support $[0, +\infty[$. Pour y remédier, Silverman [77] suggère d'effectuer une transformation logarithmique permettant d'avoir un support non borné $]-\infty, +\infty[$ tout en réduisant le biais initial autour de zéro. Dans un autre travail [85], les auteurs ont généralisé le travail de Silverman [77] en proposant une transformation dite du difféomorphisme.

Remarque 4.1. *L'utilisation de la méthode du noyau de Parzen est motivée par le résultat selon lequel, pour une taille assez large des données de durées de vie, si la fonction du noyau satisfait la condition suivante :*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} tK(t) = 0, \quad (4.12)$$

alors, l'impact de la variation du paramètre de lissage h sur la fonction de fiabilité est borné. Ce résultat peut être montré en annulant la dérivée première $\frac{d\hat{R}_j(t)}{dh}$.

Par conséquent, on peut conclure que lorsque la taille des données de durées de vie est suffisamment grande, une variation du paramètre de lissage n'a aucun effet sur la fonction de fiabilité du système.

Le modèle statistique d'optimisation de la politique de maintenance ARP est obtenu en combinant les équations (4.4) et (4.10) :

$$\mathbb{E}[\hat{C}(\hat{T}|_{T_1})] = \frac{\frac{C_r}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} K_s \left(\frac{T_1 - t_{1i}}{h_1} \right) - \frac{C_r - C_p}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} K_s \left(\frac{\hat{T} + \Phi(T_1) - t_{2i}}{h_2} \right)}{\frac{1}{n_2} \int_{\Phi(T_1)}^{\Phi(T_1) + \hat{T}} \sum_{i=1}^{n_2} K_s \left(\frac{x - t_{2i}}{h_2} \right) dx}, \quad (4.13)$$

où n_j ($j = 1, 2$) est la taille des données de durées de vie (t_{ji}) ($i \in 1, \dots, n_j$) collectées dans l'environnement d'exploitation OE_j .

Remarque 4.2. *Le modèle statistique d'optimisation de la stratégie de maintenance ARP (équation 4.13) est déterminée à partir des estimations des fonctions de fiabilité dans OE_1 et OE_2 . De ce fait, et en se basant sur la remarque (4.1), toute variation du paramètre de lissage n'a aucun effet sur un tel coût.*

Dans ce qui suit, des expériences numériques sont menées afin d'illustrer l'approche proposée. Pour estimer la fonction de fiabilité, deux estimateurs à noyau de Parzen sont utilisés : le premier est basé sur la méthode de difféomorphisme dite encore de transformation logarithmique (notée ci-après par Log) [85], et le deuxième estimateur est celui basé sur la méthode de plugin de Jones-Sheather (notée ci-après par J-Sh) [84].

4 Résultats numériques

Dans l'ensemble des expérimentations suivantes, les données de durées de vie du système dans chaque environnement d'exploitation sont générées à partir d'une mixture de distributions de loi de Weibull $W(\beta, \eta)$ où β et η sont les paramètres, respectivement, de forme et d'échelle. La table (4.1) montre les paramètres de distribution de Weibull et les valeurs des proportions des mixtures selon lesquelles les données sont générées. Par exemple, dans le cas de OE_1 , les données sont générées à partir de trois distributions de lois de Weibull $W(2.5, 15)$, $W(4, 15)$ et $W(4.5, 15)$ avec des proportions, respectivement, égale à 90%, 5% et 5%. Dans le reste de cette section, il est supposé, sans perte de généralité, qu'un nombre égal de données de durée de vie est généré pour OE_1 et OE_2 , soit $n_1 = n_2 = n$. Pour chaque environnement d'exploitation, trois tailles d'échantillons $n = 100, 500, 1000$ sont générées. Les coûts de remplacement correctifs et préventifs sont, respectivement, fixés à $C_r = 100$ et $C_p = 10$. La fonction noyau $K(t)$ adoptée est la fonction de densité de probabilité d'une loi normale standard :

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right).$$

Dans le cas où la taille des données de durées de vie est de $n = 1000$, les figures (4.2) et (4.3) montrent les fonctions de fiabilité théorique et estimée du système sous OE_1 et OE_2 . Les figures (4.2) et (4.3) sont obtenus en utilisant les estimateurs J-Sh et Log, respectivement. D'après ces résultats, on peut conclure que OE_1 est moins sévère que OE_2 . En effet, la fonction de fiabilité dans OE_2 décroît vers zéro plus rapidement que celle correspondant au système dans OE_1 ; le système se dégrade plus rapidement

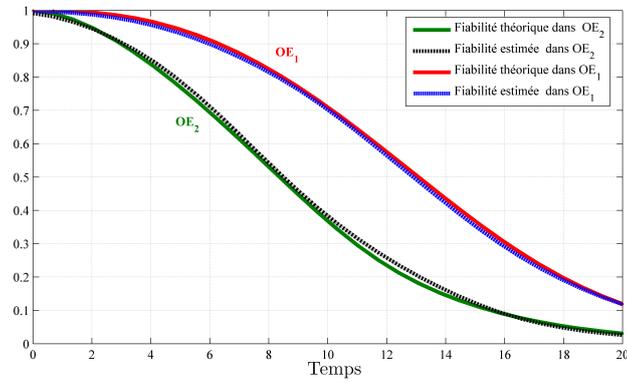


Figure 4.2 – Fiabilités théoriques et estimées dans les deux environnements : cas de l'estimateur J-Sh

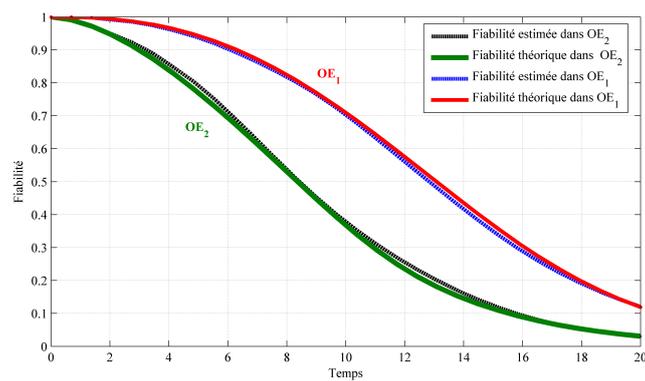
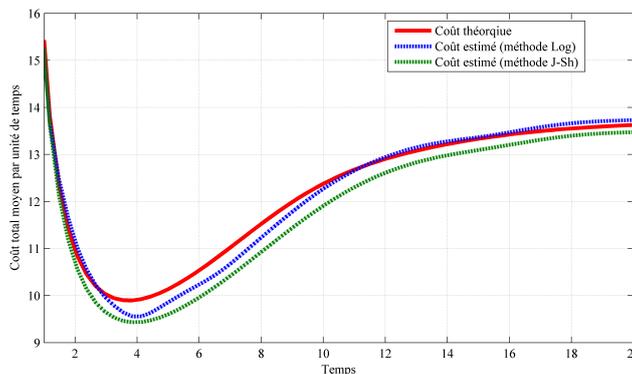


Figure 4.3 – Fiabilités théoriques et estimées dans les deux environnements : cas de l'estimateur Log

	OE ₁			OE ₂		
β	2.5	4	4.5	1.5	2	4.5
η	15	15	15	10	10	10
Mixture (%)	90	5	5	35	55	10

Table 4.1 – Paramètres de génération des données de durées de vie.


 Figure 4.4 – Expected total maintenance cost rate time : case where $n = 500$, $T_1 = 5$

dans le premier environnement que dans le second.

Maintenant que les fonctions de fiabilité sont estimées, nous pouvons estimer l'âge optimal \hat{T}_0 de remplacement préventif par le modèle de coût statistique de l'équation (4.13). Pour cela, nous considérons que le transfert du système de OE₁ vers OE₂ est effectué à l'âge $T_1 = 5$. Pour une taille $n = 500$ des données de durées de vie, la figure (4.4) représente trois courbes (théoriques et estimées) du coût total moyen de maintenance par unité de temps. Les résultats d'estimation sont obtenus par les deux méthodes Log et J-Sh. À partir de cette figure, on constate que les deux estimateurs du noyau de Parzen (Log et J-Sh) donnent des résultats assez proches du modèle théorique. En utilisant le modèle de probabilité du coût de maintenance, l'âge optimal théorique T_0 de remplacement préventif est évalué à $T_0 = 3.72$, alors que les valeurs estimées de T_0 sont évaluées à $\hat{T}_0 = 3.74$ et $\hat{T}_0 = 3.81$ pour les estimateurs Log et J-Sh, respectivement. Le coût de maintenance induit par la stratégie de remplacement optimale en utilisant le modèle de probabilité est de $C_0 = 9.89$. Les estimateurs Log et J-Sh donnent respectivement $\hat{C}_0 = 9.87$ et $\hat{C}_0 = 9.51$.

Des expériences supplémentaires sont également menées afin de montrer, d'une part, l'erreur résultante de la comparaison entre les modèles statistique et de probabilité et, d'autre part, pour comparer et démontrer la précision des estimateurs Log et J-Sh. Pour chaque taille d'échantillon n et pour différentes valeurs de l'âge initial T_1 , 10 essais sont exécutés pour chaque estimateur. Pour réaliser la comparaison entre les deux estimateurs exploités, nous calculons les valeurs moyennes estimées $\mathbb{E}[\hat{T}_0]$ et $\mathbb{E}[\hat{C}_0]$ de \hat{T}_0 et \hat{C}_0 , respectivement. De plus, les écarts types $\sigma[\hat{T}_0]$, $\sigma[\hat{C}_0]$ et les coefficients de variation $cv[\hat{T}_0] = \frac{\sigma[\hat{T}_0]}{\mathbb{E}[\hat{T}_0]}$, et $cv[\hat{C}_0] = \frac{\sigma[\hat{C}_0]}{\mathbb{E}[\hat{C}_0]}$ sont également calculés pour chacun des estimateurs Log et J-Sh. L'ensemble des résultats obtenus sont reportés dans les tables (4.2) et (4.3).

À partir des tables (4.2) et (4.3), on peut observer que les deux estimateurs donnent de bons résultats, en particulier lorsque la taille des données de durées de vie devient importante. De plus, on peut constater que les écarts-types et les coefficients de variation obtenus pour l'estimateur J-Sh sont inférieurs à ceux obtenus par l'utilisation de l'estimateur basé sur la transformation logarithmique. Par conséquent, l'estimateur de J-Sh s'avère plus précis que l'estimateur Log. En effet, lorsque $n = 1000$, à partir des figures (4.5) et (4.6) on peut noter que l'intervalle de confiance obtenu avec l'estimateur J-Sh est plus étroit que celui obtenu avec l'estimateur Log.

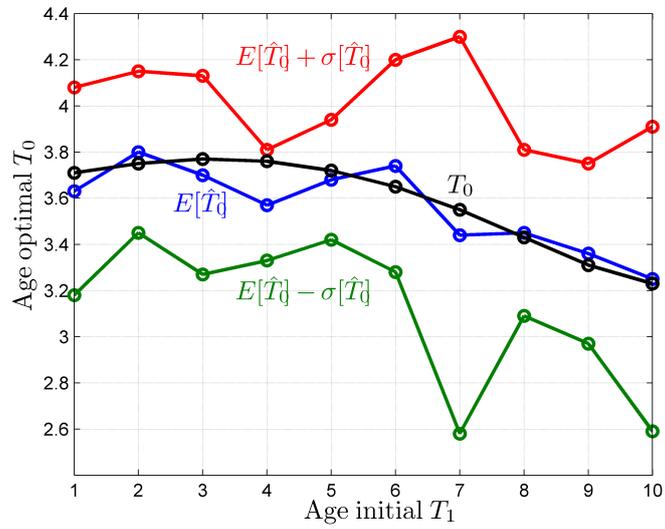


Figure 4.5 – Intervalle de confiance estimé pour l'âge optimal de remplacement \hat{T}_0 versus T_1 : cas de l'estimateur Log et $n = 1000$.

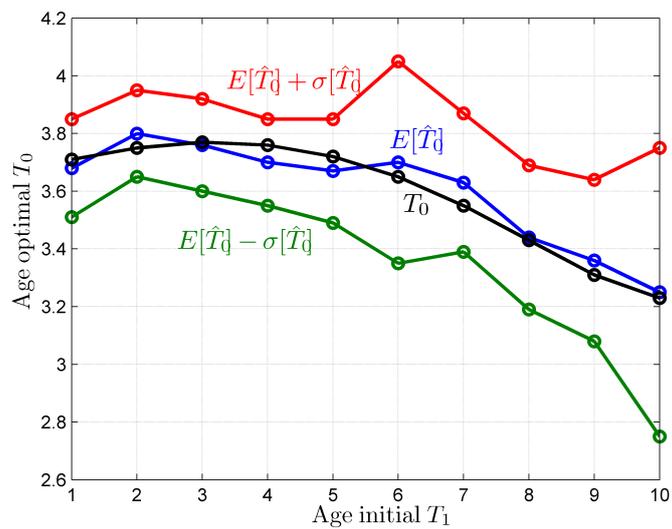


Figure 4.6 – Intervalle de confiance estimé pour l'âge optimal de remplacement \hat{T}_0 versus T_1 : cas de l'estimateur J-Sh et $n = 1000$.

T_1		$n = 100$		$n = 500$		$n = 1000$		Valeur théorique T_0
		Log	J-Sh	Log	J-Sh	Log	J-Sh	
1	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.66	4.08	3.50	3.9	3.63	3.68	3.71
	$\sigma[\hat{T}_0]$	0.71	0.59	0.61	0.46	0.45	0.17	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.19	0.15	0.17	0.12	0.12	0.05	
2	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.88	3.99	3.78	3.93	3.8	3.8	3.75
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.17	0.59	0.7	0.44	0.35	0.15	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.3	0.15	0.19	0.11	0.09	0.04	
3	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.27	3.82	3.82	3.84	3.7	3.76	3.77
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.09	0.43	0.37	0.19	0.43	0.16	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.33	0.11	0.1	0.05	0.12	0.04	
4	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.45	3.79	3.81	3.75	3.57	3.7	3.76
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.49	0.37	0.6	0.36	0.24	0.15	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.43	0.1	0.16	0.09	0.07	0.04	
5	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.87	3.96	3.74	3.81	3.68	3.67	3.72
	$\sigma[\hat{T}_0]$	0.84	0.64	0.59	0.35	0.26	0.18	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.22	0.16	0.16	0.09	0.07	0.05	
6	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	3.96	3.84	3.83	3.61	3.74	3.7	3.65
	$\sigma[\hat{T}_0]$	0.84	0.71	0.73	0.41	0.46	0.35	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.21	0.18	0.19	0.11	0.12	0.09	
7	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	4.53	3.96	3.68	3.66	3.44	3.63	3.55
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.3	0.69	0.4	0.28	0.86	0.24	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.29	0.17	0.11	0.08	0.25	0.07	
8	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	4.43,	3.45	3.52	3.81	3.45	3.44	3.43
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.77	0.47	0.58	0.81	0.36	0.25	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.4	0.14	0.17	0.21	0.1	0.07	
9	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	4.3,	3.67	4.09	3.57	3.36	3.36	3.31
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.67	0.76	1.42	0.29	0.39	0.28	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.39	0.21	0.35	0.08	0.12	0.08	
10	$\mathbb{E}[\hat{T}_0]$	4.79	4.07	3.68	3.45	3.25	3.25	3.23
	$\sigma[\hat{T}_0]$	1.4	0.81	0.72	0.52	0.66	0.5	
	$cv[\hat{T}_0]$	0.29	0.2	0.19	0.15	0.2	0.15	

Table 4.2 – Valeurs optimales théoriques et estimées de l'âge de remplacement

5 Conclusion

Dans ce travail de recherche nous avons abordé le problème d'optimisation des stratégies de maintenance pour un système soumis à des défaillances stochastiques. Le système est conçu pour accomplir sa mission dans des conditions d'exploitation variables ayant un impact sur son processus de défaillance. Le problème traite spécifiquement le cas où le système est supposé avoir fonctionné dans un environnement d'exploitation initial et ensuite transféré pour une *seconde vie* dans un environnement d'exploitation plus sévère ou il est sujet à une stratégie de maintenance de type âge (*Age replacement Policy* : ARP). La correspondance entre les deux environnements d'exploitation est représentée par une fonction de transfert basée sur le concept d'âge statistique virtuel. Le problème de maintenance est alors de trouver la stratégie optimale de remplacement préventif dans le nouvel environnement d'exploitation qui minimise le coût total moyen par unité de temps.

Dans un premier temps, un modèle probabiliste d'optimisation du coût de maintenance est développé. Les conditions d'existence et d'unicité d'une stratégie optimale sont formellement établies. Ces conditions permettent, dans le cas de la stratégie de maintenance étudiée, de déterminer l'âge optimal auquel un remplacement préventif doit être réalisé. Le modèle théorique ainsi développé repose bien entendu

T_1		$n = 100$		$n = 500$		$n = 1000$		Valeur théorique C_0
		Log	J-Sh	Log	J-Sh	Log	J-Sh	
1	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	9.72	7.35	8.46	6.47	8.75	6.63	6.82
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.22	0.73	0.47	0.31	0.39	0.25	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.13	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04	
2	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	9.44	7.38	8.46	6.92	8.5	6.74	7.4
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.41	0.98	0.86	0.56	0.31	0.36	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.15	0.13	0.1	0.08	0.04	0.05	
3	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	8.93	7.26	8.63	7.82	8.65	7.94	8.13
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.31	1.15	0.58	0.43	0.45	0.4	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.15	0.16	0.07	0.05	0.05	0.05	
4	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	9.78	8.03	9.43	8.59	9.12	8.82	8.96
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.74	1.22	1.33	0.36	0.51	0.43	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.18	0.15	0.14	0.04	0.06	0.05	
5	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	10.72	9.9	9.87	9.51	9.8	9.62	9.89
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.58	1.4	0.65	0.54	0.53	0.44	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.15	0.14	0.07	0.06	0.05	0.05	
6	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	10.63	10.34	11.22	10.82	10.95	10.83	10.94
	$\sigma[\hat{C}_0]$.03	0.86	0.89	0.66	0.62	0.52	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.1	0.08	0.08	0.06	0.06	0.05	
7	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	12.64	11.77	11.78	11.68	12.37	12.17	12.1
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.69	0.89	0.78	0.53	0.47	0.51	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.13	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	
8	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	13.23	12.65	14.35	13.73	13.73	13.5	13.41
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.06	1.06	0.8	0.75	0.59	0.5	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.08	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	
9	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	15.14	14.32	15.12	14.72	15.12	14.93	14.89
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.37	0.81	1.71	1.01	0.71	0.64	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.09	0.06	0.11	0.07	0.05	0.04	
10	$\mathbb{E}[\hat{C}_0]$	15.84	15.33	16.83	16.5	16.8	16.53	16.55
	$\sigma[\hat{C}_0]$	1.67	1.74	1.59	1.26	0.85	0.73	
	$cv[\hat{C}_0]$	0.11	0.11	0.09	0.08	0.05	0.04	

Table 4.3 – Valeurs optimales théoriques et estimées du coût total moyen de maintenance par unité de temps.

sur l'hypothèse de la connaissance a priori des distributions des durées de vie du système dans chaque environnement d'exploitation.

Dans un second temps, l'hypothèse ci-dessus mentionnée a été relaxée. En se basant sur les données de durées de vie collectées dans les deux environnements d'exploitation, nous avons alors développé un modèle statistique d'optimisation du coût de maintenance. Ce modèle repose essentiellement sur l'estimation des fonctions de fiabilité du système dans les deux environnements d'exploitation. La méthode d'estimation exploitée est non-paramétrique et est basée sur le noyau de Parzen. Deux estimateurs ont été ainsi utilisés et implémentés. Le premier estimateur est basé sur une transformation logarithmique (ou de difféomorphisme) du noyau de Parzen, le second est celui proposé par Jones-Sheather. Les résultats obtenus permettent de conclure que, d'une part, le modèle statistique du coût de maintenance est assez robuste par rapport aux variations du paramètre de lissage, et d'autre part, l'estimateur de Jones-Sheather fournit des résultats plus précis que ceux obtenus avec l'estimateur basé sur la transformation de difféomorphisme.

Le travail ainsi présenté dans ce chapitre constitue une contribution aux stratégies de maintenance de systèmes réutilisés dans différents environnements d'exploitation ou encore des systèmes de second main (*Second Hand Systems* : SHS). Ce travail est une contribution qui repose sur une stratégie de maintenance dédiée aux systèmes non-réparables. En effet, le remplacement est la seule possibilité de maintenance offerte.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons une nouvelle contribution quant aux stratégies de maintenance des systèmes de seconde main. Cette nouvelle contribution s'inscrit également dans une chaîne logistique inverse et exploite les étapes de la réutilisation et de remanufacturing des systèmes. Elle permet de prendre en considération des actions de maintenance imparfaite, en plus des actions de remanufacturing permettant d'améliorer les performances des systèmes avant toute exploitation.

Chapitre 5

Stratégies de maintenance des systèmes de seconde main

1 Introduction

Les récentes préoccupations en matière de développement durable ont conduit à l'adoption d'une législation visant à forcer la collecte et la valorisation des produits en fin de vie. Cela a généré un flux de pièces et de produits qui peuvent être reconditionnés ou remanufacturés pour être réutilisés sur les chaînes de montage ou dans les activités de maintenance. De nombreuses plate-formes de commerce électronique bien établies (Amazon, eBay, ...), facilitent la vente de produits usagés. Le marché des produits d'occasion est une activité lucrative et est devenu de plus en plus attrayant. Il couvre une large gamme de produits utilisés depuis les téléphones mobiles jusqu'aux systèmes industriels lourds. Cette nouvelle source de composants soulève de nombreuses questions de prise de décision intéressantes et des problèmes de recherche dont certains ont été largement étudiés par les chercheurs, notamment les modèles de conception et de gestion de la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée et les politiques optimales de contrôle des stocks pour les produits retournés [2, 55]. Cependant, d'importantes questions de recherche concernant la qualité, la fiabilité, l'ingénierie de maintenance et les politiques de garantie pour les systèmes remanufacturés qui seront réintroduits sur le marché comme produits d'occasion ou rafraîchis n'ont pas été suffisamment investies [54, 2].

Dans la littérature, parmi les premiers travaux relevant des systèmes de second main (*Second Hand Systems* : SHS) sont ceux de Chattopadhyay et Murthy [86] où un modèle probabiliste est proposé dans l'objectif de déterminer une politique optimale de garantie (*free replacement* et *pro-rata*) d'un SHS du point de vue du vendeur. Pour compléter l'approche de Chattopadhyay et Murthy [86], Lo et Yu [87] ont considéré une politique de gestion de la qualité pour un SHS en proposant des modèles de garantie du point de vue des acheteurs dans le secteur des marchés de voitures d'occasion. Dans un autre travail, Chattopadhyay et Murthy [88] ont étudié deux problèmes d'amélioration de la fiabilité pour les SHS avec une politique de garantie (*free replacement*). Dans cette approche, seules des réparations minimales sont considérées pendant la période de garantie avec une opération d'amélioration de la fiabilité réalisée sur le SHS avant sa vente. Naini et Shafiee [89] ont proposé un modèle de coût tenant compte de la remise à niveau (reconditionnement) d'un SHS vendu avec un contrat de garantie. Leur modèle a été appliqué pour résoudre un problème de remanufacturing de perceuses électriques d'occasion. Chari et al. [90, 8] ont développé des modèles mathématiques pour déterminer les politiques optimales de garantie et de remplacements effectués avec des pièces de rechanges reconditionnées. Leurs modèles ne considèrent pas d'actions de remise à niveau ou d'actions de maintenance préventive.

Des revues de littérature sur la qualité, la fiabilité, la maintenance et les problèmes de garantie des SHS sont rapportées dans [54, 91] et plus récemment dans [2, 55]. Toutes ces revues de littérature convergent à la même conclusion : très peu de travaux traitent explicitement des stratégies de maintenance préventive (MP) des systèmes usagés ou SHS. Parmi les travaux identifiés, Pongpech et al. [92] ont proposé un modèle mathématique pour déterminer les remises à niveau et les actions de

MP qui minimisent les coûts de maintenance et de pénalité pour les équipements usagés en leasing. Yeh et al. [93] ont également proposé deux modèles de MP pour un SHS ayant un âge initial connu et une durée d'utilisation pré-spécifiée. Leur objectif est d'obtenir le nombre et les niveaux optimaux d'actions de MP de sorte que le coût total moyen de maintenance soit minimisé. Dans ces travaux [93], les actions de remise à niveau ne sont pas considérées. Kim et al. [94] ont formulé un modèle d'inspection périodique dans le cadre d'une politique de garantie à durée fixe avec la possibilité d'une remise à niveau avant la mise en service d'un SHS. En se basant sur le point de vue du vendeur, le modèle de Kim et al. [94] permet de déterminer conjointement le nombre optimal d'inspections requis et le niveau d'amélioration optimal qui minimisent le coût total moyen pendant la période de garantie. Le modèle ainsi formulé n'inclut aucune stratégie de MP. Shafiee et al. [95] ont proposé un modèle d'optimisation pour maximiser le profit moyen du point de vue vendeur. Une formulation mathématique est développée avec des structures particulières des coûts d'acquisition, de remise à niveau et de garantie. Le degré optimal de remise à niveau à effectuer sur le système est déterminé lorsque des réparations minimales sont effectuées en cas de défaillance. Plus récemment, Sidibé et al. [46, 51] ont adapté la politique de remplacement de type âge (ARP : *age replacement policy*) au cas des SHS en tenant compte de l'impact de l'environnement d'exploitation sur les performances du système. Dans les travaux [46, 51], les modèles développés n'incluent pas les opérations de remanufacturing.

De la revue de littérature que nous avons conduite [55], il ressort clairement qu'une grande majorité des modèles de maintenance pour les systèmes usagés ou SHS ne considèrent que des actions de maintenance parfaites. Certains travaux qui considèrent les opérations de remise à niveau ne tiennent pas compte des actions de MP ou n'intègrent pas le fait que ces actions peuvent être des actions imparfaites. De plus, la majorité des travaux existant, dans ce domaine de recherche, suppose des définitions très précises des coûts d'acquisition et de remise à niveau. Par exemple, Naini et Shafiee [89] ont utilisé une fonction bornée linéairement décroissante pour le coût d'acquisition. De plus, tous les modèles de MP proposés pour les SHS reposent sur des stratégies de maintenance périodique qui, dans certains cas, et contrairement aux stratégies de maintenance séquentielles, ne sont pas appropriées pour une certaine catégorie de systèmes [96, 97].

Afin de remédier aux limites identifiées ci-dessus, ce chapitre introduit une stratégie de maintenance séquentielle avec des actions de maintenance préventive imparfaite pour un SHS. Un modèle de maintenance préventive imparfaite est adopté en se basant sur le modèle du taux de pannes hybride [96, 97, 98, 99]. Un modèle d'optimisation mathématique est développé pour étudier les interactions entre les différentes décisions notamment celles relatives au degré de remanufacturing ou de remise à niveau ainsi que celles relatives à la stratégie de maintenance. Les conditions d'optimalité sont formellement établies et analysées en détail pour des structures générales des coûts d'acquisition et de remanufacturing. Ces structures de coût combinées au modèle de maintenance imparfaite rendent notre formulation mathématique plus générale que les approches existantes : le modèle proposé est une extension généralisée et plus réaliste de plusieurs modèles existants. Notre problème d'optimisation intègre plusieurs variables de décisions aussi bien continues que discrètes. Il en résulte une analyse mathématique plus difficile et plus complexe, mais plus général et plus proche de la réalité industrielle.

Le reste de ce chapitre est structuré autour de 4 Sections. La Section 2 est consacrée à la définition et à la modélisation du problème. Les principes fondamentaux et les composantes pertinentes de ce problème de prise de décision sont développés et discutés. Le problème d'optimisation qui en résulte est proposé dans la Section 3. Cette section présente également les principales contributions théoriques et une procédure numérique pour résoudre le modèle d'optimisation développé. La valeur ajoutée d'une telle approche est clairement démontrée via des résultats numériques présentés à la Section 4. Les conclusions de ces travaux sont présentées à la Section 5.

2 Définition et modélisation mathématique du problème

Nous considérons un système de seconde main (SHS) ayant un âge initial u , et acheté auprès d'un courtier en systèmes usagés moyennant un coût d'acquisition $C_A(u)$. Pour améliorer ses performances, le système est ensuite mis à disposition pour une éventuelle opération de remanufacturing ou de

reconditionnement. Dans le présent travail, une telle opération consiste à une amélioration de la fiabilité du système. Plus explicitement, l'opération de remanufacturing réduit l'âge initial u à une valeur d'âge virtuel αu où $\alpha \in [0, 1]$ représente un coefficient ou degré de remanufacturing. Une action de remanufacturing induit un coût qui est fonction de l'âge u du système et du degré α d'amélioration de l'âge effectif u . Ainsi rajeuni, le système est ensuite mis en service et maintenu sur un horizon d'exploitation à la fin duquel il est remplacé par un système similaire. Pendant son fonctionnement, le système est soumis à des défaillances aléatoires. Afin de prolonger sa durée de vie, des actions de maintenance sont effectuées. Le système est maintenu préventivement lorsque sa fiabilité tombe à un seuil R_0 ; il est remplacé par un système identique à l'instant de la $N^{\text{ème}}$ MP. Chaque fois qu'une panne se produit entre deux instants consécutifs de MP, une réparation minimale est effectuée. Toutes les actions de MP sont imparfaites et modélisées en utilisant l'approche du taux de pannes hybride [96, 98, 97, 99].

Le travail présenté dans ce chapitre repose sur les hypothèses suivantes :

1. L'horizon de planification est infini.
2. Le taux de pannes du système est continu et strictement croissant.
3. Il est supposé que le marché dispose de suffisamment de systèmes de récupération de sorte que les quantités requises peuvent être livrés.
4. Les durées d'une réparation minimale, de remanufacturing et des actions de maintenance préventives sont négligeables
5. L'âge d'un SHS reflète sa fiabilité et est renseigné lors de l'acquisition du système.
6. Il est raisonnable de supposer que la somme des coûts d'acquisition et de remanufacturing est significativement plus élevée que le coût d'une action de maintenance préventive.
7. L'opération de remanufacturing améliore la fiabilité du système usagé.

Dans la formulation de notre modèle d'optimisation, quatre variables de décision sont considérées : l'âge initial u , le degré de remanufacturing α , le seuil de fiabilité R_0 , et le nombre N de MP y compris le remplacement à réaliser. Ce problème peut être résolu séquentiellement en déterminant d'abord l'âge initial optimal, puis le degré optimal de remanufacturing et enfin les paramètres R_0 et N de maintenance. Cependant, cette approche séquentielle de résolution ne permet d'aboutir qu'à une solution optimale locale. De plus, il est impossible de dissocier l'âge initial et le degré de remanufacturing du seuil de fiabilité. De ce fait, notre objectif est de développer une approche intégrée capable de déterminer conjointement les valeurs optimales des quatre variables de décision qui minimisent le coût total moyen par unité de temps $C(R_0, u, \alpha, N)$ sur un horizon infini. Nous avons un processus de régénération commençant et se terminant aux instants des opérations de remanufacturing. Il résulte ainsi de la théorie des processus de renouvellement [74, 75, 76] que le coût total moyen par unité de temps $C(R_0, u, \alpha, N)$ est le coût total moyen $\mathbb{E}(C)$ dans un cycle de remplacement divisé par la durée moyenne $\mathbb{E}(T)$ de ce cycle :

$$C(R_0, u, \alpha, N) = \frac{\mathbb{E}(C)}{\mathbb{E}(T)}. \quad (5.1)$$

Le coût total moyen $\mathbb{E}(C)$ dans un cycle est défini comme étant la somme des coûts d'acquisition ou d'achat, de remanufacturing et des coûts de maintenance. Dans ce qui suit, ces coûts ainsi que la durée moyenne du cycle de remplacement sont formellement définis et discutés.

2.1 Coûts d'acquisition et de remanufacturing

Pour modéliser le coût d'acquisition $C_A(u)$ d'un SHS, il est assez raisonnable de supposer qu'un tel coût est une fonction décroissante de l'âge u du système.

Pour améliorer la fiabilité du SHS, une action de remanufacturing est souvent effectuée. Dans ce travail de recherche, cette opération est une opération de rajeunissement selon laquelle l'âge u du système est réduit à αu , où $\alpha \in [0, 1]$ est dit coefficient ou degré d'amélioration. Cela équivaut également à dire que le taux de panne initial $h(u)$ devient $h(\alpha u)$ après rajeunissement du système. D'un point de vue

maintenance, le coefficient α d'amélioration est similaire au coefficient de réduction d'âge défini par Malik [100]. Dans le présent travail, on suppose que le coût de remanufacturing dépend à la fois de l'âge initial u du système et du facteur d'amélioration α . Ce coût, ci-après noté par $C_{up}(\alpha, u)$, est supposé satisfaire les deux contraintes suivantes :

1. Si aucune action de remanufacturing n'est effectuée aucun coût n'est alors induit. En d'autres termes, $C_{up}(\alpha, u) = 0$ pour $\alpha = 1$.
2. Lorsque le coefficient d'amélioration est fixé à $\alpha = 0$, le système redevient comme neuf après l'opération de remanufacturing.

Dans le présent travail, il est également supposé qu'une opération de remanufacturing d'un système jeune sera moins coûteuse qu'une action de remanufacturing identique effectuée sur le même système mais plus âgé. Ces propriétés économiques seront soigneusement prises en compte lors de la définition des structures de coûts des opérations d'acquisition et de remanufacturing. De plus, la relation entre ces deux coûts sera amplement discutée dans la suite de notre exposé.

2.2 Coût de maintenance

En plus de l'action de remanufacturing, le système est sujet à des actions de MP effectuées chaque fois que sa fiabilité atteint un seuil R_0 . Dans le cas où le système tombe en panne avant d'atteindre le seuil R_0 , une réparation minimale est alors réalisée. Il convient de noter qu'une réparation minimale ne fait que restaurer le système à un état de fonctionnement sans améliorer sa fiabilité. En d'autres termes, une réparation minimale n'a aucune incidence sur la distribution des durées vie du système [9, 15, 96]. C'est ainsi que le système évoluera selon N cycles de MP et qu'à la fin du $N^{\text{ème}}$ cycle, il sera remplacé par un système identique mais rajeuni à l'issue d'une opération de remanufacturing.

Dans le présent travail, les coûts de MP et de réparation minimale sont respectivement notés par C_p et C_m . Les actions de MP sont imparfaites et modélisées selon le modèle du taux de panne hybride initialement proposé par Lin et. al. [96] et largement exploité dans la littérature [98, 101, 102, 99] et beaucoup d'autres. Le principe de ce modèle de maintenance imparfaite est montré dans la figure (5.1) où T_k ($k = 1, 2, \dots, N$) sont les instants où les actions de MP (y compris le remplacement) sont effectuées. Dans cette figure, $X_k = T_k - T_{k-1}$ représente l'intervalle de temps entre la $(k-1)^{\text{ème}}$ et la $k^{\text{ème}}$ action de MP, avec $T_0 = 0$ signifie que le premier instant de MP est mesuré à partir de l'instant 0 lorsque le système était neuf. De cette figure, il résulte que $T_k = \sum_{i=1}^k X_i$. On peut également y observer qu'après avoir effectué une MP, le taux de pannes du système augmente plus rapidement que dans les intervalles précédents de MP. Ce résultat reflète l'impact du coefficient d'ajustement sur le taux de défaillance du système : chaque action de MP augmente la vitesse du taux de pannes.

Pour évaluer le taux de pannes du système après une MP, nous commençons tout d'abord par évaluer l'âge effectif, ci-après noté par Y_k , du SHS juste avant que celui-ci ne subisse la $k^{\text{ème}}$ MP. L'âge effectif Y_1 nécessite un traitement particulier puisque le système peut être sujet à une opération de remanufacturing avant la première MP. Dans ce cas, Y_1 devrait être évalué tenant compte de la réduction d'âge qui en résulte. Y_1 est la somme de l'âge virtuel αu du système juste après le remanufacturing et du temps restant $T_1 - u = X_1 - u$ pour atteindre l'instant de la première MP :

$$Y_1 = \alpha u + T_1 - u = \alpha u + X_1 - u. \quad (5.2)$$

L'âge effectif Y_2 est obtenu en tant que $Y_2 = b_1 Y_1 + X_2$ où b_1 est le coefficient de réduction d'âge de la première MP, et ainsi de suite. Nous avons alors l'équation récursive générale suivante :

$$Y_k = \begin{cases} \alpha u + X_1 - u & \text{if } k = 1, \\ b_{k-1} Y_{k-1} + X_k & \text{if } k > 1, \end{cases} \quad (5.3)$$

où b_k ($k \geq 1$) représente les coefficients de réduction d'âge tels que $0 \leq b_1 < b_2 < \dots < 1$.

Revenons maintenant à l'évaluation du taux de pannes du système dans chaque cycle de MP, c'est-à-dire dans l'intervalle de temps $[T_{k-1}, T_k)$. Selon l'hypothèse (2), pendant l'intervalle $[0, u)$, le taux de

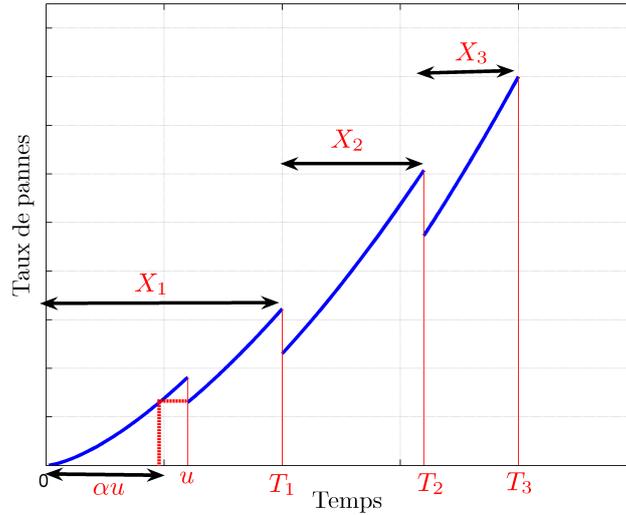


Figure 5.1 – Évolution du taux de pannes du système sujet à une maintenance préventive imparfaite.

panne est égal à $h(t)$. Après une opération de remanufacturing, le taux de pannes du SHS devient $h(\alpha u)$, et pour toutes les valeurs de $t \in [0, X_1 - u)$, il est exprimé par la relation $h(t + \alpha u)$. Par analogie, après la première MP ($k = 1$), le taux de pannes devient $a_1 h(b_1 Y_1)$ alors qu'il était $h(Y_1)$ juste avant. Ainsi, dans le cycle $[T_1, T_2)$ de MP, le taux de pannes est donné par $a_1 h(b_1 Y_1 + t)$ pour tout $t \in [0, T_1 - T_2)$ (i.e., $t \in [0, X_2)$) où a_1 est le coefficient d'ajustement. En procédant selon le raisonnement précédent, après la deuxième MP ($k = 2$), le taux de pannes devient $a_2 a_1 h(b_2 Y_2)$ alors qu'il était $a_1 h(Y_2)$ juste avant. Il s'ensuit que le taux de pannes du SHS au cours du troisième cycle de MP, c'est-à-dire pendant l'intervalle $[0, X_3)$, est $a_2 a_1 h(t + b_2 Y_2)$ pour tout $t \in [0, X_3)$. Plus généralement, le taux de pannes $h_{k-1}(t)$ du SHS pendant le $k^{\text{ème}}$ cycle de MP (c'est-à-dire avant d'exécuter la $k^{\text{ème}}$ MP) est :

$$h_{k-1}(t) = \begin{cases} h(t + \alpha u) & \text{si } k = 1 \text{ et } t \in [0, X_1 - u), \\ A_{k-1} h(t + b_{k-1} Y_{k-1}) & \text{si } k > 1 \text{ et } t \in [0, X_k), \end{cases} \quad (5.4)$$

où $A_{k-1} = \prod_{i=1}^{k-1} a_i$ avec $A_0 = 1$, $a_0 = 1$, $b_0 = \alpha$, $Y_0 = u$, et les coefficients a_i d'ajustement du taux de pannes et les coefficients de réduction d'âge tels que $1 \leq a_1 < a_2 < \dots$ et $0 \leq b_1 < b_2 < \dots < 1$.

Remarque 5.1. Nous rappelons ici que selon de la théorie de la fiabilité, la fonction de fiabilité $R(t)$ du système peut être exprimée en fonction du taux de pannes $h(t)$ telle que :

$$R(x) = \exp\left(-\int_0^x h(t) dt\right). \quad (5.5)$$

Or, puisque les temps T_k ($k = 1, 2, \dots$) de MP représentent les instants où la fiabilité du système atteint le seuil R_0 , il s'ensuit que :

$$R_0 = \exp\left(-A_{k-1} \int_{b_{k-1} Y_{k-1}}^{Y_k} h(t) dt\right), \quad (5.6)$$

cette équation implique :

$$\ln(R_0) = -A_{k-1} \int_{b_{k-1} Y_{k-1}}^{Y_k} h(t) dt, \quad (5.7)$$

ce qui revient à écrire :

$$Y_k = H^{-1}\left(H(b_{k-1} Y_{k-1}) - \frac{\ln(R_0)}{A_{k-1}}\right), \quad (5.8)$$

où $H(x) = \int_0^x h(t)dt$ est la fonction cumulée du taux de pannes et $H^{-1}(x)$ sa fonction inverse correspondante.

En guise d'illustration, prenons l'exemple où les durées de vie du SHS sont distribuées selon une loi de Weibull dont les paramètres de forme et d'échelle sont respectivement notées par β et η . Dans ce cas particulier, l'équation (5.8) s'écrit telle que :

$$Y_k = \eta \left(\left(\frac{b_{k-1}Y_{k-1}}{\eta} \right)^\beta - \frac{\ln(R_0)}{A_{k-1}} \right)^{1/\beta}. \quad (5.9)$$

Si on suppose que l'occurrence des pannes du système suit un processus de Poisson non-homogène (NHPP : *Non-Homogeneous Poisson Process*) [103, 13, 10, 104], le coût total moyen $\mathbb{E}(C_M(N, R_0))$ induit par les actions de MP et des réparations minimales pendant les N cycles de MP est donné par la formule suivante :

$$\mathbb{E}(C_M(N, R_0)) = (N-1)C_p + C_m \sum_{k=1}^N \left(A_{k-1} \int_{b_{k-1}Y_{k-1}}^{Y_k} h(t)dt \right), \quad (5.10)$$

où $A_{k-1} \int_{b_{k-1}Y_{k-1}}^{Y_k} h(t)dt$ représente le nombre moyen de pannes survenues pendant le $k^{\text{ème}}$ cycle de MP. En exploitant les deux équations (5.7) et (5.10), ce coût de maintenance s'écrit encore :

$$\mathbb{E}(C_M(N, R_0)) = (N-1)C_p - NC_m \ln(R_0). \quad (5.11)$$

Le coût total moyen $\mathbb{E}(C)$, engendré par l'acquisition et le remanufacturing du SHS en plus des actions de MP et de réparations minimales, est donné par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(C) &= C_A(u) + C_{up}(\alpha, u) + (N-1)C_p - NC_m \ln(R_0). \\ &= C_{Aup}(\alpha, u) + (N-1)C_p - NC_m \ln(R_0), \end{aligned} \quad (5.12)$$

où $C_{Aup}(\alpha, u)$ est défini comme étant la somme des coûts d'acquisition et de remanufacturing :

$$C_{Aup}(\alpha, u) = C_A(u) + C_{up}(\alpha, u). \quad (5.13)$$

2.3 Durée moyenne $\mathbb{E}(\mathcal{T})$ d'un cycle de remplacement

Au début d'un cycle de renouvellement, une opération de remanufacturing est réalisée avant que le SHS soit mis en service pendant N cycles de MP. A l'instant de la $N^{\text{ème}}$ MP, le système est remplacé par un système équivalent. La longueur de ce cycle de renouvellement est donc la somme des temps des N cycles de MP. Nous avons alors :

$$\mathbb{E}(\mathcal{T}) = X_1 - u + \sum_{k=2}^N X_k, \quad (5.14)$$

D'après l'équation (5.3), $X_1 - u = Y_1 - \alpha u$, et $X_k = Y_k - Y_{k-1}b_{k-1}$ pour $k \geq 2$. Il en résulte donc :

$$\mathbb{E}(\mathcal{T}) = \sum_{k=1}^{N-1} (1 - b_k)Y_k + Y_N - \alpha u. \quad (5.15)$$

3 Le modèle d'optimisation

Le problème d'optimisation considéré consiste à déterminer conjointement les valeurs optimales des variables de décision, à savoir, l'âge d'acquisition u^* , le degré de remanufacturing α^* et la stratégie optimale de maintenance caractérisée par le seuil de fiabilité R_0^* ainsi que le nombre N^* d'actions de MP

(y compris le remplacement). Ces valeurs sont déterminées de telle sorte à minimiser le coût total moyen par unité de temps $\mathcal{C}(R_0, u, \alpha, N)$ exprimé tel que :

$$\mathcal{C}(R_0, u, \alpha, N) = \frac{C_{Aup}(\alpha, u) + (N-1)C_p - NC_m \ln(R_0)}{\sum_{k=1}^{N-1} (1-b_k)Y_k + Y_N - \alpha u}. \quad (5.16)$$

Les solutions optimales qui minimisent l'équation (5.16) sont en général difficiles à obtenir analytiquement. Le problème d'optimisation tel que décrit par cette équation contient trois variables de décision continues R_0 , u et α en plus d'une variable de décision discrète N . Il serait alors difficile de démontrer la convexité du problème. Néanmoins, dans ce qui suit, certaines propriétés utiles sont présentées pour construire une méthode numérique permettant de minimiser le fonction coût (équation 5.16) et obtenir des solutions optimales locales. Trois propositions seront développées pour développer une procédure numérique de résolution basée sur le principe de *fix-and-optimize*. La première proposition établit les conditions dans lesquelles le nombre optimal de maintenance préventive N existe lorsque les autres variables de décision sont fixées. Dans le cas où les deux variables N et R_0 sont fixées, la deuxième proposition permet l'évaluation des valeurs optimales conjointes de α et de u . La troisième et dernière proposition permet de déterminer la valeur optimale de R_0 lorsque les variables u , α , N sont fixées. Les démonstrations mathématiques des propositions et des lemmes sont omises dans ce chapitre. Toutefois, elles peuvent être consultées dans [105].

Proposition 5.1. (*N^* quand R_0 , u et α sont fixées*) Pour des valeurs fixées de R_0 , u et α telles que $C_{Aup}(\alpha, u) > C_p$, le nombre N^* optimal de MP est unique, fini et est solution de la double inéquation suivante :

$$\frac{1}{X_{N^*}} < \frac{\mathcal{C}(\alpha, u, R_0, N^*)}{C_p - C_m \ln(R_0)} < \frac{1}{X_{N^*+1}}. \quad (5.17)$$

Le résultat du lemme suivant 5.1 sert de préalable pour démontrer le résultat de la proposition 2. Le lemme calcule les deux dérivées partielles $\frac{\partial Y_k}{\partial \alpha}$ et $\frac{\partial Y_k}{\partial u}$.

Lemma 5.1. Les dérivées partielles $\frac{\partial Y_k}{\partial \alpha}$ et $\frac{\partial Y_k}{\partial u}$ sont calculées telles que :

$$\frac{\partial Y_k}{\partial \alpha} = \begin{cases} \frac{uh(\alpha u)}{h(Y_1)}, & \text{si } k = 1, \\ \left[\prod_{j=1}^{k-1} \frac{b_j h(b_j Y_j)}{h(Y_j)} \right] \frac{uh(\alpha u)}{h(Y_k)}, & \text{si } k > 1. \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial u} = \begin{cases} \frac{\alpha h(\alpha u)}{h(Y_1)}, & \text{si } k = 1, \\ \left[\prod_{j=1}^{k-1} \frac{b_j h(b_j Y_j)}{h(Y_j)} \right] \frac{\alpha h(\alpha u)}{h(Y_k)}, & \text{si } k > 1. \end{cases} \quad (5.19)$$

Par conséquent, nous avons le résultat suivant :

$$\frac{1}{u} \frac{\partial Y_k}{\partial \alpha} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial Y_k}{\partial u}. \quad (5.20)$$

Proposition 5.2. (*α^* et u^* quand R_0 et N sont fixées*) Pour R_0 et N , fixées, les valeurs optimales de l'âge initial u^* et du degré α^* de remanufacturing sont solutions de l'équation suivante :

$$\alpha \frac{\partial C_{Aup}(\alpha, u)}{\partial \alpha} = u \frac{\partial C_{Aup}(\alpha, u)}{\partial u}. \quad (5.21)$$

Le lemme 5.2 suivant établit un résultat exploité dans la démonstration de la proposition 3. Plus explicitement, le lemme 5.2 calcule la dérivée partielle $\frac{\partial Y_k}{\partial R_0}$.

Lemma 5.2. *La dérivée partielle $\frac{\partial Y_k}{\partial R_0}$ est évaluée telle que :*

$$\frac{\partial Y_k}{\partial R_0} = \frac{-1}{A_{k-1}h(Y_k)R_0}, \quad (5.22)$$

Proposition 5.3. *(R_0^* quand α , u et N sont fixées) Pour des valeurs fixées de u , α et N , la valeur optimale R_0^* du seuil de fiabilité est solution de l'équation suivante :*

$$\ln(R_0) = \frac{C_{Aup}(\alpha, u) + (N-1)C_p}{NC_m} - \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (1-b_k)Y_k + Y_N - u\alpha}{\sum_{k=1}^{N-1} \frac{1-b_k}{A_{k-1}h(Y_k)} + \frac{1}{A_{N-1}h(Y_N)}} \quad (5.23)$$

Une approche générale pour minimiser l'équation (5.16) basée sur les propositions ci-dessus, consistera à déterminer, tout d'abord, les valeurs des deux variables de décision α et u qui sont des solutions de l'équation (5.21) établie dans la proposition 2. On peut observer que l'équation (5.21) est effectivement indépendante des deux autres variables de décision R_0 et N . Pour chaque solution formée par le couple (α, u) de l'équation (5.21), une valeur unique de R_0 solution de l'équation (5.23) de la proposition 3 peut être calculée en fonction de la seule variable de décision restante N . Cette solution est unique car la fonction logarithme est bijective. Finalement, en utilisant l'équation (5.17) de la proposition 1, une valeur unique de N peut être calculée. Une solution optimale est la solution donnée par le quadruplet (α, u, R_0, N) qui minimise le coût total moyen par unité de temps $\mathcal{C}(\alpha, u, R_0, N)$. Le pseudo-code de l'algorithme proposé est donné ci-dessous.

La section suivante présente des expériences numériques pour illustrer notre approche. L'algorithme ci-dessus est implémenté et le modèle mathématique obtenu est résolu pour différents scénarios afin de déterminer des politiques de prise de décision concernant la maintenance des systèmes de seconde main.

4 Exemples numériques

Tout d'abord, les structures de coûts des actions d'acquisition et de remanufacturing doivent être définies. Dans ce qui suit, ces structures de coûts sont proposées et entièrement discutées selon les hypothèses et les propriétés indiquées dans la Section 2.1.

4.1 Structures des coûts d'acquisition et de remanufacturing

Dans le présent travail, nous avons considéré une structure de coût d'acquisition $C_A(u)$ définie par :

$$C_A(u) = \frac{C_0}{(1+u)^\theta}, \quad (5.24)$$

où $C_0 = C_A(0)$ est le coût d'acquisition d'un système de technologie équivalent mais neuf et θ est un paramètre positif. On peut observer que cette structure respecte l'hypothèse selon laquelle les coûts d'acquisition diminuent en fonction de l'âge initial.

Rappelons que pour améliorer la fiabilité du SHS, une action de remanufacturing peut être nécessaire. Rappelons aussi que, dans notre contexte, cette opération consiste à réduire l'âge u du système à αu , et $\alpha \in [0, 1]$ représente le degré d'amélioration apportée. Cette amélioration induit un coût $C_{up}(\alpha, u)$ considéré comme une fonction des deux paramètres α et u telle que :

$$C_{up}(\alpha, u) = C_{up_0} (1-\alpha)^{\xi(u)} u^\varphi, \quad (5.25)$$

où C_{up_0} et φ sont des paramètres à valeurs positives, et $\xi(u)$ est une fonction de l'âge initial u et sera discutée ultérieurement. Cette structure de coût satisfait également les hypothèses et les propriétés mentionnées précédemment (voir la Section 2.1). En effet, on peut observer que dans le cas où $\alpha = 1$ qui implique qu'aucune opération de remanufacturing n'est effectuée, le coût qui en résulte est nul ; $C_{up}(\alpha, u) = 0$. En outre, si $\alpha = 0$, ce qui implique que l'opération de remanufacturing restaure le système

Algorithm 5.1 Pseudo-code pour la minimisation de la fonction objective de l'équation (5.16)

- 1: Input data : $C_A(u)$, $C_{up}(\alpha, u)$, C_p , C_m , $h(t)$, a_k and b_k .
 - 2: Faire ΔR , $\Delta\alpha$, et Δu , les pas respectifs d'incrémentations des valeurs des variables de décision R_0 , α , et u .
 - 3: Faire $R_0 = 1$.
 - 4: **while** $R_0 > 0$ **do**
 - 5: Set $\alpha = 1$
 - 6: **while** $\alpha \geq 0$ **do**
 - 7: Calculer u_{max} , la borne supérieure de u , telle que :
 $C_{Aup}(\alpha, u) > C_p$ et $R(\alpha u) > R_0$ (conformément aux hypothèses de travail).
 - 8: **while** $u_{max} > 0$ **do**
 - 9: Faire $u = 0$
 - 10: **while** $u < u_{max}$ **do**
 - 11: **if** (α, u) satisfait l'équation (5.21) de la Proposition 2 **then**
 - 12: Avec l'équation (5.23) de la Proposition 3, calculer R_0 en fonction de N .
 - 13: Avec l'équation (5.17) de la Proposition 1, résoudre pour N et calculer la valeur de la fonction objective $\mathcal{C}^*(R_0, u, \alpha, N)$.
 - 14: Enregistrer la valeur actuelle de $\mathcal{C}^*(R_0, u, \alpha, N)$, R_0 , α , u et N
 - 15: **end if**
 - 16: $u = u + \Delta u$
 - 17: **end while**
 - 18: $u_{max} = 0$
 - 19: **end while**
 - 20: $\alpha = \alpha - \Delta\alpha$
 - 21: **end while**
 - 22: $R_0 = R_0 - \Delta R$
 - 23: **end while**
 - 24: Sélectionner la valeur minimale de $\mathcal{C}^*(R_0, u, \alpha, N)$ et les valeurs correspondantes aux variables de décision R_0 , α , u et N pour toutes les données enregistrées à l'étape 14.
 - 25: Pour les valeurs sélectionnées de R_0 , α , u et N vérifier si elles satisfont les équations (5.21) et (5.23) des Proposition 2 et 3, respectivement. Le cas échéant, affiner la taille du pas d'incrémentations des variables ΔR , $\Delta\alpha$, et Δu , et aller ensuite à l'étape 2.
 - 26: Faire $R_0^* = R_0$, $\alpha^* = \alpha$, $u^* = u$, $N^* = N$, and
 $\mathcal{C}^*(R_0, u, \alpha, N) = C(R_0, u, \alpha, N)$
-

dans un état de fonctionnement aussi bon que neuf (*as good as new*), alors un coût $C_{up}(\alpha, u) = C_{up0}u^\varphi$ serait induit.

Dans la structure de coût de remanufacturing (équation 5.25), la fonction $\xi(u)$ est introduite pour établir une relation explicite entre le coût de remanufacturing et l'âge initial du SHS. Conformément à l'idée discutée dans [106], la formulation de $\xi(u)$ est définie comme le ratio de la durée de vie résiduelle moyenne (*Mean Residual Lifetime*) $MRL(u)$ du système et de son âge initial u :

$$\xi(u) = \frac{\int_u^\infty R(t)dt}{uR(u)}. \quad (5.26)$$

Selon la définition ci-dessus, la fonction $\xi(u)$ évolue entre deux valeurs limites telles que :

$$\begin{cases} \lim_{u \rightarrow 0} \xi(u) = \infty, \\ \lim_{u \rightarrow \infty} \xi(u) = 0. \end{cases} \quad (5.27)$$

Conformément à l'équation (5.26), Si l'âge u d'un système est inférieur à la durée de vie résiduelle moyenne $MRL(u)$, on le qualifierait alors de relativement "jeune". Dans ce cas, la fonction $\xi(u)$ prendrait des valeurs élevées, et puisque $0 \leq \alpha \leq 1$, le coût de remanufacturing évalué à partir de l'équation (5.25) serait alors plus faible. Par contre, si l'âge u est supérieur à la durée de vie résiduelle moyenne $MRL(u)$, le système serait qualifié de "âgé" et le coût résultant de l'opération de remanufacturing serait par conséquent plus élevé. Ce résultat est illustré dans la figure (5.2) qui, pour différentes valeurs de l'âge initial u , représente la variation du ratio $\frac{C_{up}(\alpha, u)}{C_{up0}}$ en fonction du paramètre α de remanufacturing. Cette figure montre que toutes les courbes convergent vers la valeur nulle lorsque $\alpha = 1$. En outre, elles montrent également que pour une valeur donnée de α , le coût de remanufacturing augmente à mesure que l'âge initial augmente. Cette observation conforte l'hypothèse précédemment faite et selon laquelle, pour un même niveau d'amélioration en fiabilité, l'opération de remanufacturing réalisée sur un SHS plus jeune est moins coûteuse que celle réalisée sur le même SHS mais beaucoup plus âgé.

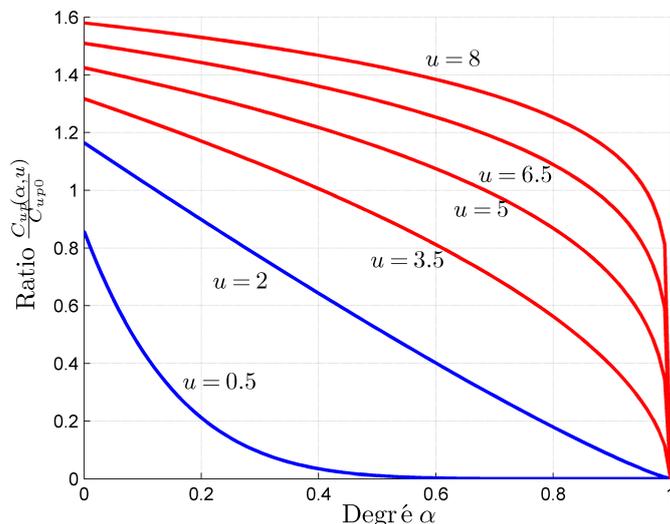


Figure 5.2 – Le ratio $\frac{C_{up}(\alpha, u)}{C_{up0}}$ versus le paramètre d'amélioration α : cas où $\varphi = 0.22$.

Maintenant, on se propose de donner une illustration à la relation entre les coûts d'acquisition et de remanufacturing. Pour cela, nous considérons un SHS avec des durées de vie gouvernées par une distribution de Weibull avec un paramètre d'échelle $\eta = 4$ et un paramètre de forme $\beta = 1.8$. Les autres paramètres sont choisis tels que $\theta = 2$, $\varphi = 0.22$, $\alpha = 0.5$ et $C_0 = C_{up0} = 1$. Dans ce cas, les variations

des coûts d'acquisition et de remanufacturing par rapport à l'âge initial u sont représentées par la figure (5.3). Cette figure montre que le coût de remanufacturing augmente à mesure que l'âge initial effectif augmente, tandis que le coût d'acquisition diminue lorsque l'âge initial effectif augmente. En effet, pour un système plus âgé, il est généralement plus coûteux d'améliorer sa fiabilité et de la ramener à celle d'un système ayant un âge plus faible (valeurs faibles de α). Ce constat vient du fait que, non seulement qu'il faudrait remplacer plus de pièces, mais plus d'efforts sont également nécessaires pour accéder aux pièces et effectuer les activités de montage et de démontage. La figure (5.3) montre également la variation, en fonction de l'âge initial u , de la somme $C_{Aup}(\alpha, u) = C_A(u) + C_{up}(\alpha, u)$ des coûts d'acquisition et de remanufacturing. La structure de coûts proposée permet en effet d'établir un compromis clair et effectif entre le coût d'acquisition et le coût de remanufacturing. Ce résultat est conforté par les courbes de la figure (5.4) obtenues pour différentes valeurs de α .

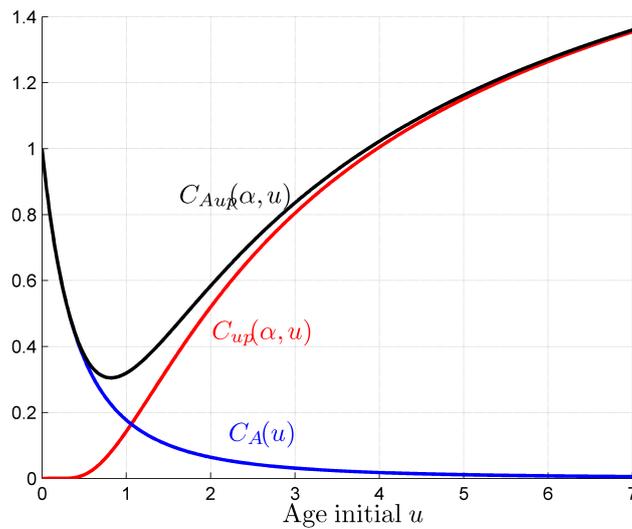


Figure 5.3 – Exemple des coûts d'acquisition et de remanufacturing

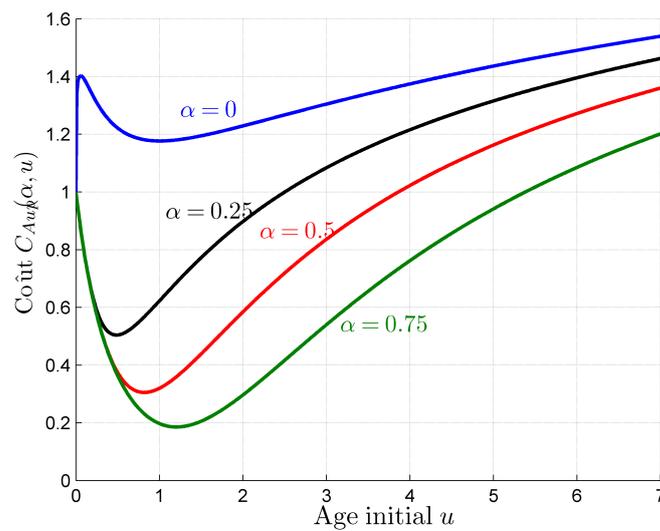


Figure 5.4 – Représentation du coût $C_{Aup}(\alpha, u)$ en fonction de l'âge initial u pour différentes valeurs de α

4.2 Expériences numériques

Pour résoudre le problème d'optimisation donné par l'équation (5.16), nous considérons un système avec des durées de vie gouvernées par une loi de Weibull avec un paramètre d'échelle $\eta = 10$ et un paramètre de forme $\beta = 1.8$. Dans ce qui suit, quatre expériences sont menées pour montrer comment l'approche proposée contribue à l'amélioration de la fiabilité des systèmes de seconde main. Dans ces expériences, le coût C_0 correspondant au coût d'acquisition d'un système neuf ($u = 0$) est fixé à $C_0 = 10000$. Nous introduisons également les ratios suivants :

$$\delta_1 = \frac{C_p}{C_0}, \quad \delta_2 = \frac{C_m}{C_p} \text{ et } \delta_3 = \frac{C_{up0}}{C_0}. \quad (5.28)$$

En fonction des ratios définis ci-dessus, le coût total moyen par unité de temps de l'équation (5.16) s'écrit alors :

$$\mathcal{C}(R_0, u, \alpha, N) = C_0 \frac{\left(\frac{1}{1+u}\right)^\theta + \delta_3(1-\alpha)^{\xi(u)}u^\varphi + \delta_1[(N-1) - \delta_2 N \ln(R_0)]}{\sum_{k=1}^{N-1} (1-b_k)Y_k + Y_N - \alpha u}. \quad (5.29)$$

Les valeurs des autres paramètres sont choisies arbitrairement et sont données à des fins d'illustration : $\delta_1 = 0.004$, $\delta_3 = 0.5$, $\theta = 2.5$ et $\varphi = 0.22$ et restent inchangés, tandis que le ratio δ_2 est variable avec $\delta_2 \in \{1, 10, 50, 100, 150\}$. Enfin, les valeurs des facteurs d'ajustement a_k et les coefficients de réduction d'âge b_k ($k = 1, 2, \dots$) du modèle de maintenance imparfaite sont générés à partir des formules suivantes :

$$a_k = \frac{6k+1}{5k+1}, \quad b_k = \frac{k}{10k+1}. \quad (5.30)$$

4.2.1 Expérience 1

Dans cette expérience, nous supposons qu'une entreprise acquiert un système de seconde main et exige qu'il fonctionne avec un niveau de fiabilité d'au moins $R_0 = 90\%$. De ce fait, le système doit subir une maintenance préventive chaque fois que sa fiabilité atteint le seuil $R_0 = 90\%$. Dans ce cas, le niveau de fiabilité du système est un paramètre d'entrée pré-défini plutôt qu'une variable de décision. L'objectif serait alors de déterminer les valeurs optimales des autres variables de décision restantes u , α et N . Dans cette expérience, on fixe le ratio $\delta_2 = 100$.

La solution optimale suggère d'acheter des systèmes avec un âge initial optimal $u^* = 3.02$ et d'effectuer une opération de remanufacturing avec un degré optimal d'amélioration $\alpha^* = 0.94$. Par conséquent, l'âge initial effectif du système est réduit à $\alpha^*u^* = 2.84$. En tenant compte de ces valeurs optimales de α et u , la figure (5.5) représente le coût total moyen par unité de temps $\mathcal{C}(R_0, u^*, \alpha^*, N)$ en fonction du nombre N de cycles de MP. La valeur optimale est $N^* = 5$, ce qui signifie qu'à l'issue de l'opération de remanufacturing, le SHS opérera au total 5 cycles de MP. La stratégie optimale de maintenance consiste alors à réaliser 4 actions de MP avant de remplacer le SHS à la fin du 5^{ème} cycle de MP.

Les intervalles optimaux de MP sont donnés dans la table (5.1). D'après ces résultats, la première MP est exécutée à l'instant $X_1 = 4.37$, c'est-à-dire 1.35 unités de temps après la mise en service du système. La deuxième MP est exécutée $X_2 = 2.29$ unités de temps après la première MP et ainsi de suite. Le remplacement du système est planifié $X_5 = 1.78$ unités de temps après la 4^{ème} MP. A partir de la table (5.1), on peut observer que les intervalles de temps entre les actions de MP et de remplacement diminuent à mesure que le nombre de MP effectuées augmente. Ce résultat est dû au fait qu'une action de MP consiste non seulement à réduire l'âge effectif du SHS mais elle augmente également la pente du taux de pannes. Ainsi, plus le système vieillit, plus les actions de MP sont fréquentes et plus la solution optimale tend à forcer une action de remplacement. Il en résulte une stratégie de maintenance non périodique (séquentielle) qui est en effet, sur le plan pratique, plus réaliste et plus adaptée à la dégradation des systèmes industriels. Cette stratégie d'acquisition et de remanufacturing combinée à la stratégie de maintenance suggérée induisent un coût total moyen par unité de temps optimal $\mathcal{C}(R_0, u^*, \alpha^*, N^*)$ évalué à 270.76 (figure 5.5).

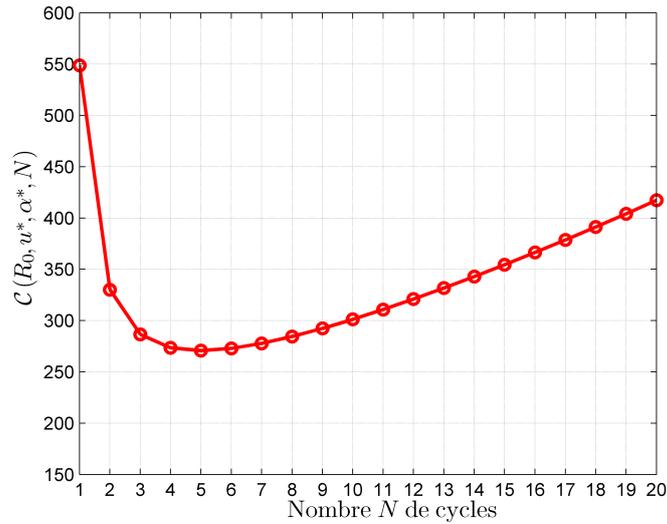


Figure 5.5 – Le coût total moyen par unité de temps $C(R_0, u^*, \alpha^*, N)$ versus le nombre N de cycles : cas de l'Expérience 1.

k	1	2	3	4	5
X_k	4.37	2.29	2.17	1.97	1.78

Table 5.1 – Intervalles optimaux de MP : cas de l'Expérience 1.

4.2.2 Expérience 2

Dans cette expérience, le problème d'optimisation de l'équation (5.16) est résolu avec les mêmes données d'entrée utilisées dans l'expérience 1, à l'exception du seuil de fiabilité R_0 qui est considéré comme une variable de décision plutôt qu'une valeur prédéterminée. Les valeurs optimales obtenues pour les quatre variables de décision R_0 , u , α et N sont données dans la table (5.2). Ces résultats montrent que la décision optimale suggère de procéder à une acquisition d'un SHS ayant un âge initial $u^* = 2.53$, d'effectuer une opération de remanufacturing avec un degré $\alpha^* = 0.84$, d'effectuer 5 actions de MP et de remplacer le système à la fin du 6^{ème} cycle de MP. Les intervalles de temps entre les actions de MP sont indiqués dans la table (5.3) où on peut également observer que les intervalles de temps pour les actions PM diminuent à mesure que le nombre d'actions de MP augmente. Cette solution optimale engendre un coût total moyen par unité de temps $C(R_0^*, u^*, \alpha^*, N^*) = 250.10$. Cette valeur est bien plus faible que celle obtenue lors de l'expérience précédente.

$R_0^*(\%)$	u^*	α^*	N^*	$C(R_0^*, u^*, \alpha^*, N^*)$
93.9	2.53	0.84	6	250.10

Table 5.2 – Valeurs optimales de α , u , R_0 et N : cas de l'Expérience 2

On se propose maintenant d'examiner l'impact de l'opération de remanufacturing sur les décisions d'acquisition et de maintenance. Pour cela, pour les mêmes données ci-dessus, le problème d'optimisation est résolu pour $\alpha = 1$, ce qui signifie que l'opération de remanufacturing n'est pas effectuée. Les valeurs optimales obtenues pour les variables de décision restantes sont données par la table (5.4). Selon cette table, lorsque l'opération de remanufacturing n'est pas disponible, le modèle suggère d'acheter un

k	1	2	3	4	5	6
X_k	3.55	1.72	1.63	1.48	1.34	1.21

Table 5.3 – Optimal PM intervals : cas de l’Expérience 2

système plus jeune avec un seuil de fiabilité faible et d’exécuter 6 actions de MP avant de le remplacer. Cette solution induit un coût total moyen par unité de temps de 268.74. Bien que le nombre optimale N^* est identique dans les deux scénarios (avec et sans action de remanufacturing), l’amélioration initiale de la fiabilité apportée par les opérations de remanufacturing permet au système de fonctionner à des niveaux de fiabilité plus élevés, ce qui permet de réduire les coûts de maintenance (préventive et réparations minimales) et d’avoir, par conséquent, un coût total moyen par unité de temps plus faible. Pour cette instance du problème, on peut donc conclure que les opérations de remanufacturing présentent un réel bénéfice économique en plus du bénéfice écologique implicite à de telles opérations.

	$R_0^*(\%)$	u^*	α^*	N^*	$C(R_0^*, u^*, \alpha, N^*)$	$\mathbb{E}(\mathcal{T})^*$
Avec remanufacturing	93.9	2.53	0.84	6	250.10	8.4
Sans remanufacturing	92.5	2.4	1	6	268.74	9.45

Table 5.4 – Impact du remanufacturing sur les stratégies d’acquisition et de maintenance.

4.2.3 Expérience 3

Maintenant que le modèle d’optimisation et la méthode de résolution sont validés, la troisième expérience est menée pour une étude de sensibilité et de robustesse par rapport à certains paramètres du modèle d’optimisation proposé. Cette expérience a pour objectif d’analyser l’impact de la variation de $\delta_2 = \frac{C_m}{C_p}$ sur les décisions conjointes d’acquisition, de remanufacturing et de maintenance d’un SHS. Pour différentes valeurs de δ_2 , les tables 5.5 et 5.6 montrent les valeurs optimales des variables de décision. Il ressort de ces résultats que le nombre de cycles de MP ainsi que le coût total moyen par unité de temps augmente avec l’augmentation de δ_2 . Cela s’explique par le fait que lorsque le coût d’une réparation minimale est supérieur au coût d’une MP, la stratégie optimale de maintenance suggère d’augmenter le nombre des actions de MP. Cette décision permet de garantir une meilleure fiabilité et, par conséquent, de réduire le nombre d’actions de réparation minimales. Cela entraîne également une diminution du cycle moyen de remplacement ($\mathbb{E}(\mathcal{T}) = \sum_i X_i - u$).

D’autres observations peuvent être faites à partir des données des deux tables (5.5) et (5.6). En effet, on peut observer que le seuil R_0 de fiabilité augmente en fonction de δ_2 . A ce propos, un seuil élevé de fiabilité permet au système d’accomplir sa mission avec un niveau de fiabilité plus élevé, et par conséquent, le nombre de réparations minimales se trouve réduit par la réduction des pannes aléatoires (voir table 5.5). On peut également observer que pour des valeurs élevées du ratio δ_2 , le modèle d’optimisation a tendance à fournir des solutions optimales qui suggèrent d’acquérir des SHS plus jeunes (en diminuant l’âge d’acquisition u) et d’effectuer des opérations de remanufacturing plus performantes (en diminuant le degré α).

4.2.4 Expérience 4

Dans cette expérience, on suppose que l’âge initial u du système n’est plus une variable de décision mais plutôt une donnée d’entrée au problème d’optimisation. Cette situation correspond au cas où le SHS est acheté avec un âge initial dont la valeur est conditionnée par le marché. L’objectif de la présente expérience est de montrer comment l’âge initial impacte les décisions conjointes d’acquisition, de remanufacturing et de maintenance. L’objectif consiste alors à déterminer les valeurs optimales des variables de décision α , R_0 et N . Dans les expériences suivantes, les valeurs des paramètres φ , θ et δ_2

δ_2	$R_0^*(\%)$	u^*	α^*	N^*	$\mathcal{C}(R_0^*, u^*, \alpha^*, N^*)$
1	21.60	10	1	3	10.85
10	76.50	4.76	1	5	51.15
50	90.20	3.01	0.93	6	159.75
100	94.00	2.51	0.84	6	259.11
150	95.80	2.24	0.77	7	342.28

Table 5.5 – Valeurs optimales obtenues en variant δ_2 : cas de l'expérience 3.

δ_2	1	10	50	100	150
X_1	16.76	7.03	4.37	3.52	3.06
X_2	10.28	3.85	2.29	1.71	1.39
X_3	9.58	3.64	2.17	1.61	1.31
X_4	-	3.30	1.97	1.46	1.19
X_5	-	2.99	1.78	1.33	1.08
X_6	-	-	1.62	1.20	0.98
X_7	-	-	-	-	0.89
$\mathbb{E}(\mathcal{T})$	26.62	16.05	11.04	8.31	7.67

Table 5.6 – Cycles de MP pour les solutions optimales obtenues en variant δ_2 : cas de l'expérience 3.

sont fixées telles que $\varphi = 0.22$, $\theta = 2.5$ et $\delta_2 = 50$.

Supposons d'abord que l'âge initial soit fixé à $u = 5$ et que le seuil requis de fiabilité soit au moins de $R_0 = 90\%$. Dans ce cas, en plus de l'âge u , le seuil R_0 de fiabilité est également un paramètre d'entrée prédéfini. Il reste alors à déterminer les valeurs optimales conjointes du degré α de remanufacturing et le nombre N de cycles de MP. La solution optimale obtenue suggère d'effectuer une opération de remanufacturing avec un degré $\alpha^* = 0.57$ puis d'opérer $N^* = 13$ cycles de MP. En conséquence, le système sera mis en service avec un âge effectif $\alpha^*u = 2.85$ et sera également soumis à 12 actions de MP avant d'être remplacé. La table (5.7) affiche les intervalles optimaux de MP. Le coût total moyen par unités de temps optimal est évalué à $\mathcal{C}(R_0, u, \alpha^*, N^*) = 318.12$.

k	1	2	3	4	5	6	
X_k	6.35	2.29	2.17	1.97	1.78	1.62	
k	7	8	9	10	11	12	13
X_k	1.46	1.33	1.20	1.09	0.98	0.89	0.81

Table 5.7 – Optimal PM intervals : case of $u = 5$ and $R_0 = 90\%$.

Supposons maintenant que le seul paramètre connu est l'âge initial $u = 5$, c'est-à-dire que le seuil de fiabilité redevient une variable de décision. Dans ce cas, la résolution du problème d'optimisation de l'équation (5.16) conduit à une solution optimale ne suggérant aucune action de remanufacturing ($\alpha^* = 1$). Cependant, elle suggère l'adoption d'une stratégie de maintenance selon laquelle le SHS opérera $N^* = 4$ cycles de MP avec un seuil optimal de fiabilité $R_0^* = 75\%$. La table (5.8) donne les intervalles de temps optimaux séparant deux actions consécutives de MP. Comparé au résultat précédemment discuté (cas où u et R_0 sont fixés), le coût total total moyen optimal induit est plutôt faible et est égal à $\mathcal{C}(R_0^*, u, \alpha^*, N^*) = 186.74$.

k	1	2	3	4
X_k	7.35	4.00	3.78	3.43

Table 5.8 – Optimal PM intervals : case of $u = 5$.

Pour montrer comment l'âge initial u impacte les solutions optimales, le problème d'optimisation de l'équation (5.16) est résolu pour différentes valeurs de u . Les résultats obtenus sont reportés dans la table (5.9) ainsi que dans la figure (5.6). De ces résultats, on peut observer que le cas où l'âge initial u du SHS est fixé à $u = 0$, correspond au cas où le système est aussi bon que neuf (*as good as new*). Ce cas est également équivalent aux modèles de base largement étudiés dans la littérature [96, 98, 99]. Dans ce cas, la solution optimale suggère d'opérer le SHS avec un seuil optimal de fiabilité $R_0^* = 52.3\%$, d'effectuer 9 actions de MP, et de réaliser un renouvellement du SHS à la fin du 10^{ème} Cycle de MP ($N^* = 10$). Le coût total moyen par unités de temps optimal résultant est $\mathcal{C}(R_0^*, u, \alpha^*, N^*) = 475.86$.

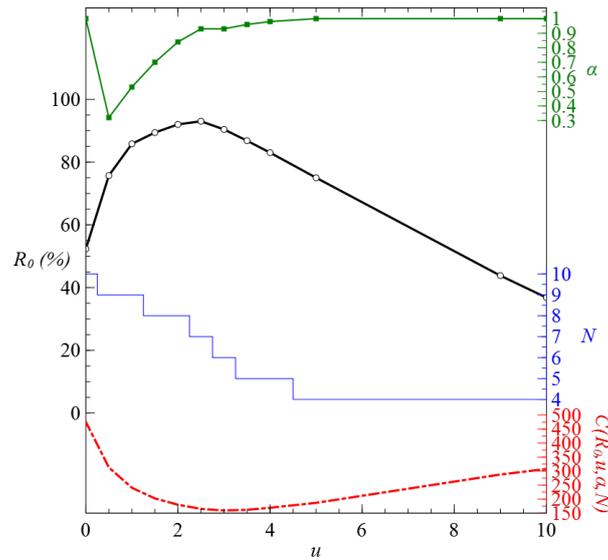
A partir des valeurs de la table (5.9) et des courbes de la figure (5.6), on observe que les valeurs faibles et plus élevées de l'âge initial u induisent un coût total moyen par unité de temps plus élevé. Ce résultat intéressant montre que les systèmes très âgés ou très jeunes peuvent être trop chers à acquérir, à reconditionner et à maintenir. En effet, pour un système assez âgé, de nombreux efforts sont nécessaires pour son reconditionnement en raison de la difficulté de trouver des pièces de rechanges, des mises à jour logicielles, de l'obsolescence des technologies, etc. Il est alors nécessaire de garantir un compris entre, d'une part, les coûts engendrés par l'acquisition, le remanufacturing et les actions de maintenance et, d'autre part, la fiabilité du SHS à accomplir sa mission avec succès. Ces considérations sont explicitement intégrées dans notre approche de modélisation par le biais des structures appropriées des coûts d'acquisition et de remanufacturing. Pour l'exemple traité dans la présente expérience, le compromis est réalisé pour un âge initial dont la valeur est évalué à $u = 3$, comme cela est clairement établi par les résultats reportés dans la table (5.9). Cette solution correspond presque à la solution optimale exacte qui figure dans la table (5.5) de l'expérience 3 pour une valeur de $\delta_2 = 50$.

u	R_0^*	α^*	N^*	$\mathcal{C}(R_0^*, u, \alpha^*, N^*)$
0.0	52.3	1	10	475.86
0.5	75.7	0.32	9	313.19
1.0	85.80	0.53	9	240.63
1.5	89.40	0.70	8	202.44
2.0	92.00	0.84	8	180.05
2.5	93.00	0.93	7	165.15
3.0	90.40	0.93	6	159.47
3.5	86.80	0.96	5	161.91
4.0	83.00	0.98	5	169.09
5.0	75.00	1	4	186.74
9.0	43.80	1	4	287.86
10	36.8	1	4	307.63

Table 5.9 – Impact de l'âge initial u sur la solution optimale.

5 Conclusion

Ce travail de recherche a pour objectif de contribuer à l'état actuel des recherches menées dans le cadre des chaînes logistiques inverses (en boucle fermée) en prenant en considération les aspects de remanufacturing ou de reconditionnement des systèmes de seconde main ou en fin de vie. Notre contribution vise à l'élaboration d'approches formelles et réalistes pour l'aide à la décision quant aux stratégies d'acquisition, de remanufacturing (reconditionnement) et de maintenance de tels systèmes récupérés des


 Figure 5.6 – Solutions optimales pour différentes valeurs de l'âge initial u .

marchés spécialisés. Cette contribution s'inscrit également dans le cadre des stratégies de maintenance dans une chaîne logistique inverse.

Dans ce chapitre nous avons exposé une approche d'aide à la décision en maintenance des SHS. Cette approche permet de prendre en considération et de manière explicite les améliorations de fiabilité apportées par les opérations de remanufacturing au développement d'une stratégie optimale de maintenance imparfaite. Le système subit une action de MP imparfaite lorsque sa fiabilité atteint un seuil donné. Après un certain nombre d'actions de MP, le système est remplacé par un système identique. Un modèle mathématique a été développé permettant de déterminer conjointement l'âge d'acquisition, le niveau de remanufacturing à réaliser et la politique de maintenance à adopter afin de minimiser le coût total moyen par unités de temps. Quatre variables de décision ont été considérées : le seuil de fiabilité, l'âge initial d'acquisition, le degré de reconditionnement et le nombre d'actions de MP à réaliser. Les conditions d'optimalité ont été formellement établies. Ces résultats ont été développés pour des structures générales des coûts d'acquisition et de remanufacturing. Nous avons ensuite utilisé les propositions obtenues dans une procédure numérique pour déterminer la solution optimale du problème. Des expériences numériques ont ensuite été menées et discutées en détail. Ces expériences sont réalisées pour des structures particulières mais réalistes des coûts d'acquisition et de remanufacturing. L'impact des opérations de remanufacturing sur la décision en maintenance est mis en évidence et les résultats globaux démontrent la valeur ajoutée de l'approche proposée. En outre, des expériences détaillées sont également fournies pour montrer et discuter de l'impact de l'âge initial du système sur les décisions d'acquisition, de remanufacturing et de maintenance. En résumé, les expériences approfondies et leurs résultats démontrent que notre approche est valide et peut être utilisée dans des cas industrielles réelles.

Le travail présenté dans ce chapitre considère que les actions de maintenance sont réalisées avec des pièces de rechange neuves et supposées suffisamment disponibles dans le marché. Cette hypothèse occulte la réalité des marchés et les conditions de réalisation des actions de maintenance. En effet, pour réaliser des activités de maintenance, plusieurs industries ont recours à des pièces de rechange aussi bien neuves que remanufacturées. Un tel usage de pièces de rechange est discuté dans le prochain chapitre qui traite des stratégies de garantie pour des systèmes dont la maintenance est réalisée en utilisant des pièces de rechange neuves et remanufacturées.

Chapitre 6

Stratégies de garantie basées sur des pièces de rechange neuves et reconditionnées

1 Introduction

Le développement durable est largement défini comme la réponse aux besoins actuels sans compromettre les besoins des générations futures [107]. Parmi les préoccupations qui menacent l'avenir figurent la rareté des matières premières et l'augmentation de la pollution, des émissions de gaz à effet de serre et des déchets. L'électronique grand public est un premier exemple de produits qui peuvent générer une empreinte écologique significative en termes de matériaux utilisés, d'énergie et d'exploitation des sols ainsi que de déchets et d'émissions industriels [108].

Une solution à ces problèmes consiste à concevoir des produits de qualité qui fonctionnent mieux, durent plus longtemps, sont plus faciles à maintenir, sont plus faciles à réutiliser et ont des composants récupérables (réutilisables). Pour que ces produits puissent être réutilisés, ils doivent être récupérés auprès du consommateur avant d'entrer dans le flux de déchets.

La récupération des produits consiste à détourner les produits usagés du flux de déchets et à les renvoyer aux fabricants. Ces produits en fin de cycle de vie, s'ils sont correctement recueillis, peuvent constituer une source non négligeable de matériaux de diverses qualités. En 2007, seulement 18,4% (en poids) de l'électronique de fin de vie (*End of Life* : EoL) produite aux États-Unis ont été collectés pour le recyclage [109]. De plus, le coût de retraitement de ces retours est toujours moins cher que de commencer à l'étape de la matière première pour produire un nouveau produit [110]. De même, la diminution de la quantité de matières premières obligera les fabricants à mettre en œuvre des méthodologies de conception, à utiliser les matériaux plus efficacement et à récupérer les produits à leur fin d'utilisation (*End of Use* : EoU) [111].

La gestion de la récupération des produits fait référence à la "gestion de tous les produits, composants et matériaux utilisés et mis au rebut" par un fabricant [112]. Un nouveau cadre de cycle de vie des produits durables a été proposé pour représenter les principales étapes de la remise à neuf d'un produit récupérable [113]. La chaîne d'activité commence par l'approvisionnement en matières premières qui sont ensuite transformées en un produit fini en passant par les étapes de fabrication de pièce, de module et d'assemblage du produit. Le produit complet est ensuite vendu au consommateur qui l'utilise jusqu'à son EoU ou EoL. Les activités en boucle fermée commencent avec la collecte des produits EoU/EoL, qui sont ensuite triés, nettoyés, testés et classés. Selon leur état, les produits ainsi classés peuvent également subir l'une des quatre activités de récupération de valeur [112, 113] : réparation, remise à neuf, reconditionnement ou recyclage.

Bien qu'il existe des incertitudes dans la remise à neuf de produits récupérés, telles que la qualité, la

quantité et le calendrier des retours, la remise à neuf peut toujours être bénéfique économiquement. Afin de générer une demande de produits reconditionnés ou d'occasion, les fabricants, les concessionnaires et les courtiers adoptent une combinaison d'initiatives pour promouvoir leurs produits et venter leur qualité et leur fiabilité en s'appuyant sur des arguments de développement et du commerce équitable. Ces initiatives se concrétisent aussi par des réductions de prix de vente et une couverture généreuse de garantie (même durée de couverture que les nouveaux produits, maintenance préventive gratuite la première année, etc.) L'augmentation de la part de marché et la nécessité d'offrir une garantie ont suscité la nécessité de développer de nouveaux modèles de garantie pour les produits d'occasion. Une garantie de produit est un accord offert par le fabricant / revendeur à un consommateur pour réparer / remplacer un article défectueux, ou pour rembourser partiellement ou totalement le consommateur en cas de défaillance du produit pendant la période de garantie [114]. En effet, il s'agit d'un contrat créé entre le fabricant et le client pour établir la responsabilité en cas de défaillance [115]. Bien qu'il existe un grand nombre de travaux de recherche consacré à la modélisation des politiques de garantie pour les nouveaux produits [116], la littérature est limitée pour les produits de seconde main [117].

Les premiers modèles mathématiques pour l'analyse des politiques de garantie pour les produits d'occasion ont été développés par Chattopadhyay et Murthy [118, 119]. Ces travaux adoptent des politiques de garantie de remplacement gratuit (*Free Replacement Warranty* : FRW) visant à améliorer la fiabilité des produits d'occasion. Un modèle permettant d'estimer le coût des politiques de garantie bidimensionnelles associées à la vente de produits d'occasion a ensuite été développé par Chattopadhyay et Yun [120].

Des stratégies d'amélioration de la fiabilité pour les produits d'occasion vendus sous plusieurs politiques de garantie ont été discutées dans [121]. Shafiee et al. [122] proposent un modèle d'optimisation qui maximise le profit par unité de temps en intégrant l'âge du produit d'occasion, la période de garantie et le niveau de reconditionnement. Dans un autre travail [123], un modèle d'optimisation appliqué aux voitures d'occasion est proposé pour déterminer le niveau optimal de remise à niveau et la durée de la garantie afin de maximiser le profit moyen. Un autre modèle de coût moyen par unité de temps incluant le coût de remise à niveau pour les produits d'occasion sous une politique de garantie est proposé par [124]. Dans [125], un modèle d'optimisation à trois paramètres est proposé pour déterminer la stratégie optimale de remise à niveau, la politique de garantie et le prix de vente d'un produit d'occasion afin de maximiser le profit moyen.

Un modèle mathématique original pour une politique de garantie de renouvellement unidimensionnel (*Renewing Free Replacement warranty* : RFRW) avec des remplacements effectués uniquement avec des composants reconditionnés est développé par Chari et al. [126]. La demande du produit est supposée proportionnelle à la durée de la période de garantie, et le coût d'acquisition est une fonction décroissante de l'âge du composant reconditionné. Kim et al. [94] ont proposé un modèle d'optimisation pour un système d'occasion sujet à une politique d'inspection périodique, à une remise à niveau et vendu avec une politique de garantie FRW non renouvelable (*Non renewing FRW* : NFRW). L'objectif consiste à déterminer conjointement le nombre optimal d'inspections et le niveau d'amélioration optimal pour minimiser le coût total moyen de la garantie du point de vue du concessionnaire. Dans ses travaux de thèse de doctorat [127], Chari propose une stratégie de production et de maintenance optimisée considérant des composants nouveaux et reconditionnés pour effectuer des remplacements afin d'honorer les engagements d'une politique NFRW. Les principales décisions sont telles que le début de la remise à neuf, la durée de la garantie et le nombre de pièces à remettre en état. La disponibilité des composants reconditionnés et leurs coûts sont également incorporés dans le modèle mathématique.

Dans tous les modèles de garantie mentionnés ci-dessus, il est supposé que les pièces de rechange soient toujours disponibles en quantité suffisante pour effectuer des réparations et des remplacements pendant la période de garantie. Un modèle où les réparations sont effectués uniquement avec des composants reconditionnés est exposé dans [126]. En pratique, cela n'est pas toujours possible, du fait que la fourniture en produits EoL/EoU ou de produits retournés n'est pas constante ; et un fabricant peut envisager d'utiliser une combinaison de composants neufs et reconditionnés pour entreprendre les actions de maintenance.

Dans le cas des politiques de garantie traditionnelles, les produits défectueux sont remplacés par de

nouveaux ou réparés avec de nouvelles pièces de rechange. Dans le présent travail de recherche, nous considérons des produits qui sont vendus neufs, et dont les actions de maintenance (remplacements pendant la période de garantie) sont effectuées avec des pièces de rechange choisies parmi un mélange de composants neufs et reconditionnés. Beaucoup de grandes sociétés d'électronique comme Apple, Samsung et Dell ont réussi à créer des marchés secondaires pour des produits remis à neuf / reconditionnés vendus avec des rabais importants. En outre, ils utilisent également ce type de produits pour effectuer des réparations sous garantie. Par exemple, l'accord d'Apple sur les termes et conditions de réparation stipule¹ : "Lors de la maintenance de votre produit, Apple peut utiliser des pièces reconditionnées" [128] ou, un contrat de garantie matérielle limitée de Dell² : "Nous utilisons des pièces neuves et remises à neuf fournies par divers fabricants pour effectuer des réparations sous garantie et pour fabriquer des pièces et des produits de remplacement" [129]. Bien que ce ne soit pas largement connu par les consommateurs, et pas clairement annoncé par les équipementiers, les fabricants de produits de consommation et d'appareils ménagers utilisent une combinaison de pièces neuves et reconditionnées pour effectuer les réparations des produits sous garantie. Beaucoup d'autres équipementiers d'industries bien établies telles que l'aérospatiale, l'automobile, les mines et l'énergie utilisent un mélange de pièces et de modules neufs et reconditionnés dans leurs activités de maintenance.

Dans ce chapitre, le concept d'une mixture statistique est utilisé pour développer la fonction de fiabilité d'une population mixte de pièces de rechange neuves ou reconditionnées utilisées pour honorer les contrats de garantie. De plus, une fonction de coût de récupération est introduite pour tenir compte de l'incertitude (rareté ou surplus) autour de la disponibilité des composants reconditionnés. Un fonds de réserve sera affecté par le fabricant pour couvrir le coût de tout remplacement futur qui se produira pendant la période de garantie. Un modèle d'optimisation mathématique est développé pour maximiser le profit total moyen du fabricant. La solution optimale est obtenue en fonction de quatre variables de décision : la durée de la garantie, le prix de vente, l'âge des composants reconditionnés et le rapport de mélange des composants reconditionnés à utiliser. On suppose que la défaillance du nouveau produit fabriqué est principalement due à la défaillance de son composant critique. Il convient de noter que l'hypothèse d'un seul composant critique est valable pour de nombreux produits de consommation et appareils qui sont généralement la cible des politiques de garantie de type RFRW [130].

Le reste de ce chapitre est structuré comme suit. La Section 2 présente le problème étudié et établit les éléments du modèle mathématique du profit total moyen par unité de temps. Le modèle d'optimisation est ensuite formulé dans la Section 3. Dans la Section 4, le problème d'optimisation est résolu et les résultats des expériences numériques sont présentés et discutés. Des conclusions sont présentées à la Section 5.

2 Définition et modélisation mathématique du problème

Un producteur fabrique et vend de nouveaux produits contenant un composant critique (CPU, moteur, etc.) Pour ce composant, le producteur propose une période de garantie selon laquelle, si le composant tombe en panne pendant la période de garantie, le fabricant s'engage à le remplacer par un autre composant choisi au hasard parmi un pool (mixture) composé de composants neufs et reconditionnés, et de renouveler ensuite la garantie pour la même durée. Cette politique de garantie est dite *Renewing Free Replacement Warranty* (RFRW). Il est raisonnable de supposer que les composants reconditionnés coûtent moins cher mais sont moins fiables que les composants neufs. Le but du fabricant est alors de déterminer conjointement les valeurs optimales de la proportion η de la mixture et l'âge τ des composants reconditionnés, ainsi que la durée ω de la garantie à offrir et le prix p de vente des produits. Ces valeurs sont déterminées de façon à maximiser le bénéfice net total moyen. Pour établir l'expression de la fonction objectif, nous commençons d'abord par évaluer la fiabilité d'un composant choisi au hasard dans un pool de composants de rechange, et ensuite évaluer le nombre moyen de remplacements effectués pendant la durée de la garantie.

1. <http://www.apple.com/legal/sales-support/terms/repair/generalservice/servicetermsen>

2. http://www.dell.com/learn/us/en/vn/solutions/garanties_sur_le_matériel_limité

2.1 Fonction de fiabilité pour une population mixte

Un composant est dit avoir un âge τ ($\tau \geq 0$) s'il a accumulé τ unités de temps de fonctionnement ou encore le composant a fonctionné plus longtemps et, à un moment donné, a été reconditionné à l'âge τ . Ses durées de vie sont caractérisées par les fonctions de densité de probabilité $f_\tau(t)$, de distribution $F_\tau(t)$, de fiabilité $R_\tau(t)$ et de taux de pannes $h_\tau(t)$ calculées comme suit :

$$f_\tau(t) = \frac{f(\tau + t)}{R(\tau)}, \quad (6.1)$$

$$F_\tau(t) = \frac{F(\tau + t) - F(\tau)}{R(\tau)}, \quad (6.2)$$

$$R_\tau(t) = \frac{R(\tau + t)}{R(\tau)}, \text{ et} \quad (6.3)$$

$$h_\tau(t) = h(\tau + t), \quad (6.4)$$

où $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ et $h(t)$ sont les fonctions de densité de probabilité, de distribution, de fiabilité et de taux de pannes des durées de vie d'un composant critique identique mais neuf.

Le mélange de pièces utilisées pour honorer le contrat de garantie est considéré comme constitué d'une proportion η de composants reconditionnés d'âge τ et d'une proportion de $(1 - \eta)$ de composants neufs ($\eta \in [0, 1]$). Les fonctions de fiabilité et de défaillance d'une telle population mixte de composants sont données par [131] :

$$\begin{aligned} R_m(t, \tau, \eta) &= (1 - \eta)R(t) + \eta \frac{R(\tau + t)}{R(\tau)}, \\ &= (1 - \eta)R(t) + \eta R_\tau(t), \end{aligned} \quad (6.5)$$

et,

$$\begin{aligned} F_m(t, \tau, \eta) &= (1 - \eta)F(t) + \eta \frac{F(\tau + t)}{F(\tau)}, \\ &= (1 - \eta)F(t) + \eta F_\tau(t). \end{aligned} \quad (6.6)$$

2.2 Nombre moyen de remplacements durant la période de garantie et par unité vendue

Le produit vendu neuf est supposé être composé d'un seul composant critique dont la défaillance génère exactement un remplacement. Ainsi, le nombre moyen de remplacements est égal au nombre moyen de défaillances pendant la période de garantie.

Soit $N(\omega, \tau, \eta)$ la variable aléatoire discrète du nombre de remplacements (ou de défaillances) survenant durant la période de couverture ω pour chaque produit vendu. On souhaite évaluer tout d'abord la probabilité $\Pr(N(\omega, \tau, \eta) = n)$ qu'il y ait exactement n remplacements durant l'intervalle $[0, \omega]$. Pour cela, on peut observer que la probabilité $\Pr(N(\omega) = 0)$ représente le cas où aucun remplacement n'est réalisé dans cet intervalle, et $\Pr(N(\omega, \tau, \eta) = 1)$ représente le cas où exactement un remplacement est survenu pendant la période ω . La probabilité $\Pr(N(\omega, \tau, \eta) = 1)$ qu'il y ait exactement un remplacement durant la période de garantie est aussi la probabilité que le produit initial (neuf) tombe en panne une fois (cet événement se réalise avec la probabilité $F(\omega)$), qu'il soit ensuite réparé (remplacé) avec un composant choisi au hasard du mélange des composants de rechanges, et que ce dernier survive une durée ω de garantie renouvelée. On obtient alors :

$$\Pr(N(\omega, \tau, \eta) = 1) = F(\omega)R_m(\omega, \tau, \eta). \quad (6.7)$$

En continuant avec ce raisonnement, il en découle que le nombre aléatoire $N(\omega, \tau, \eta)$ de remplacements pendant la période de garantie admet une distribution géométrique et que :

$$\Pr(N(\omega, \tau, \eta) = n) = F(\omega) (F_m(\omega, \tau, \eta))^{n-1} R_m(\omega, \tau, \eta), \quad n = 1, 2, \dots \quad (6.8)$$

De ce fait, le nombre moyen de remplacements réalisé pendant la période de garantie est donné par $\mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)]$ qui est fonction des variables de décision ω , τ et η tel que :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)] &= \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \Pr(N(\omega, \tau, \eta)) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot F(\omega) (F_m(\omega, \tau, \eta))^{n-1} R_m(\omega, \tau, \eta) \\ &= F(\omega) \frac{R_m(\omega, \tau, \eta)}{F_m(\omega, \tau, \eta)} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot (F_m(\omega, \tau, \eta))^n \\ &= \frac{F(\omega)}{R_m(\omega, \tau, \eta)} \end{aligned} \quad (6.9)$$

En substituant l'équation (6.5) dans le résultat ci-dessus, on obtient :

$$\mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)] = \frac{(1 - R(\omega)) R(\tau)}{(1 - \eta)R(\omega)R(\tau) + \eta R(\tau + \omega)}. \quad (6.10)$$

Par la suite, le modèle mathématique du bénéfice total moyen est développé en fonction du bénéfice réalisé par unité, de la demande totale et du coût de récupération.

2.3 Coût d'acquisition des composants de rechange

Dans le présent travail, le coût d'acquisition $A(\tau, \eta)$ d'un composant critique est défini tel que :

$$A(\tau, \eta) = \begin{cases} A_0 & \text{si } \tau = 0, \\ A_0 (\tau + c)^{-\alpha_1} + \tau^{\alpha_2} & \text{si } \tau > 0, \end{cases} \quad (6.11)$$

où A_0 représente le coût d'acquisition d'un composant neuf, et c , α_1 et α_2 sont des paramètres réels à valeurs positives. Le paramètre α_1 impacte le taux d'actualisation offert sur les composants usagés, tandis que le paramètre α_2 reflète une augmentation des coûts due au vieillissement. La condition aux limites $A_0 = A(\tau = 0)$ impose alors la valeur de $c = 1$.

La forme particulière (fonction de puissance) du second terme de l'équation (6.11) est choisie pour les quatre raisons suivantes : (1) elle représente une fonction croissante du coût à mesure que l'âge augmente, (2) la valeur du paramètre en puissance impacte sa monotonie, (3) la facilité de différenciation, et (4) ce type de forme est commun dans la modélisation économique du coût et de la demande [132]. Le coût d'acquisition ainsi défini (équation 6.11) est une variable aléatoire régie par une loi de Bernoulli de paramètre η . Le coût d'acquisition moyen $\mathbb{E}[A(\tau, \eta)]$ d'un composant, prélevé aléatoirement dans le pool des composants de rechange, est évalué à :

$$\mathbb{E}[A(\tau, \eta)] = (1 - \eta) A_0 + \eta \left(A_0 (\tau + 1)^{-\alpha_1} + \tau^{\alpha_2} \right). \quad (6.12)$$

2.4 Fond de réserve

Pour chaque nouveau produit vendu, le producteur détient une somme moyenne $C_r(\omega, \tau, \eta)$ dans un fond de réserve permettant de couvrir le coût des remplacements pour ce produit. En moyenne, il y a $\mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)]$ remplacements pour chaque produit vendu et chaque composant de remplacement coûte en moyenne $\mathbb{E}[A(\tau, \eta)]$. Par conséquent, le fond de réserve moyen par produit vendu est :

$$C_r(\omega, \tau, \eta) = \mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)] \mathbb{E}[A(\tau, \eta)], \quad (6.13)$$

qui, en utilisant les équations (6.10) et (6.12), s'écrit encore :

$$C_r(\omega, \tau, \eta) = \frac{R(\tau) [1 - R(\omega)] \left[(1 - \eta) A_0 + \eta \left(A_0 (\tau + 1)^{-\alpha_1} + \tau^{\alpha_2} \right) \right]}{(1 - \eta) R(\omega) R(\tau) + \eta R(\tau + \omega)}. \quad (6.14)$$

Dans nos travaux, la formulation du coût d'acquisition généralise les modèles de coûts de la littérature. En effet, de l'équation ci-dessus, deux cas particuliers peuvent être observés. Le premier correspond au cas où $\eta = 0$ et fait référence au cas où seuls des composants de rechange neufs sont utilisés. Dans ce cas, l'équation (6.14) se réduit au résultat obtenu dans les travaux antérieures [116, 133] :

$$\begin{aligned} C_r(\omega, \tau, 0) &= \frac{R(\tau) [1 - R(\omega)] A(0)}{R(\omega) R(\tau)} \\ &= \left[\frac{1}{R(\omega)} - 1 \right] A_0. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Le second cas particulier ($\eta = 1$) fait référence au cas où seuls des composants de rechange reconditionnés sont disponibles pour effectuer des actions de remplacement. Dans ce cas, l'équation (6.14) se réduit au résultat obtenu dans [126] :

$$C_r(\omega, \tau, 1) = \frac{A(\tau) R(\tau) [1 - R(\omega)]}{R(\tau + \omega)}. \quad (6.16)$$

2.5 Coût unitaire total et bénéfice par produit vendu

Le coût unitaire total $C_u(\omega, \tau, \eta)$ de chaque produit neuf est donné par la somme de coût K_0 nécessaire pour sa fabrication et du fond de réserve $C_r(\omega, \tau, \eta)$ constitué pour compenser les coûts de la garantie. Dans le présent travail, on suppose que le coût de fabrication du produit neuf est principalement représenté par le coût d'acquisition du composant essentiel ($K_0 = A_0$) donné par l'équation (6.11). Par conséquent, le coût unitaire total $C_u(\omega, \tau, \eta)$ est évalué à :

$$C_u(\omega, \tau, \eta) = C_r(\omega, \tau, \eta) + A_0. \quad (6.17)$$

Chaque produit neuf coûte $C_u(\omega, \tau, \eta)$ et son prix de vente est fixé à p . Le bénéfice $\pi(\omega, \tau, \eta, p)$ par unité de produit neuf vendu est alors donné par :

$$\pi(\omega, \tau, \eta, p) = p - C_u(\omega, \tau, \eta). \quad (6.18)$$

2.6 Volume des ventes versus la demande totale en produit neuf

Dans ce travail de recherche, les volumes de vente sont fonction de la demande $D(\omega, p)$ totale exprimée par le marché. Cette demande est modélisée comme une fonction log-linéaire décalée ayant deux paramètres ω et p [134, 132] :

$$D(\omega, p) = D_1 p^{-d_1} (\omega + D_2)^{d_2}, \quad (6.19)$$

où les paramètres D_i et d_i ($i = 1, 2$) sont des réels tels que $D_1 > 0$, $D_2 \geq 0$, $d_1 > 1$ et $d_2 > 0$. L'équation (6.19) permet de prendre en compte le fait que lorsque la longueur de la période de garantie augmente, la demande augmente, et lorsque le prix augmente la demande $D(\omega, p)$ diminue. Le paramètre d_1 représente le taux de diminution du volume des ventes avec le prix croissant du produit, d_2 représente le taux d'augmentation du volume des ventes avec la durée ω de garantie croissante, D_1 est un facteur d'amplitude de la demande, D_2 est une constante de translation de la garantie. Les valeurs des paramètres d_1 , d_2 , D_1 et D_2 sont obtenues à partir des enquêtes auprès des clients et des études de marché. Les méthodes économétriques d'ajustement de courbe et d'estimation de paramètres qui peuvent être utilisées sont décrites dans [135, 136].

2.7 Coût de récupération

La conception du réseau de récupération pour les composants reconditionnés implique des coûts des installations et de logistique qui dépendent, entre autres, du volume de produits récupérés. Une fois ceux-ci mis en place, tout écart de volume (rareté ou surplus) augmente ces coûts. Un terme de coût de recouvrement $S(\omega, \tau, \eta, p)$ est introduit comme pénalité due à l'écart de volume. Ceci est modélisé comme une fonction quadratique de sorte que toute déviation, positive (pour une pénurie) ou négative (pour un excédent), du volume moyen de pièces de rechange reconditionnées entraîne un coût de récupération positif. L'expression du coût moyen $S(\omega, \tau, \eta, p)$ adoptée est telle que :

$$S(\omega, \tau, \eta, p) = (\eta \mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)] D(\omega, p) - S_1)^2 S_0, \quad (6.20)$$

où S_0 est un coût fixe de référence pour la récupération de produits, S_1 est le volume idéal de produits écoulés pour minimiser les coûts fixes de récupération, et le terme $\eta \mathbb{E}[N(\omega, \tau, \eta)] D(\omega, p)$ représente le volume total moyen de composants reconditionnés requis pour honorer la politique de garantie offerte aux clients.

De l'équation (6.20) on peut observer que dans le cas où aucun composant reconditionné n'est utilisé (cas où $\eta = 0$), il reste, tout de même, un coût induit qui est de $S_0 S_1^2$. Ce coût représente le coût de la mise en place de l'infrastructure physique pour récupérer et produire des composants reconditionnés, si le fabricant est également en charge des opérations de récupération et de reconditionnement. En revanche, si le fabricant achète les pièces reconditionnées auprès d'un fournisseur, alors les valeurs de S_0 et S_1 seraient données par les termes du contrat de niveau de service (*SLA : Service-Agreement Level*). Il y aurait un contrat en place pour l'achat d'un certain volume de composants reconditionnés (S_1).

3 Le modèle d'optimisation du bénéfice total net moyen

L'expression du bénéfice total moyen est composée du bénéfice par unité de produit (équation 6.18), de la demande totale (équation 6.19), et du coût de récupération (équation 6.20) :

$$\Pi(\omega, \tau, \eta, p) = D(\omega, p) \pi(\omega, \tau, \eta, p) - S(\omega, \tau, \eta, p). \quad (6.21)$$

Ainsi, la stratégie optimale est obtenue comme une solution au système d'équations différentielles aux dérivées partielles suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial \omega} = 0, & \text{pour } \omega = \omega^* \\ \frac{\partial \Pi}{\partial p} = 0, & \text{pour } p = p^* \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = 0, & \text{pour } \tau = \tau^* \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \eta} = 0, & \text{pour } \eta = \eta^*. \end{cases} \quad (6.22)$$

En général, le système d'équations (6.22) est difficile à résoudre analytiquement. Par conséquent, les procédures d'optimisation numérique sont utilisées pour obtenir les valeurs des variables de décision $(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*)$ qui maximisent le bénéfice total moyen. La section suivante présentera et discutera les résultats numériques obtenus.

4 Expériences numériques : résultats et discussions

Dans ces expériences nous considérons un produit dont le composant critique admet des durées de vie régies par une loi de Weibull à deux paramètres. L'ensemble des données utilisées est fourni par la table 6.1. En utilisant ces données, une solution optimale $(\omega, \tau, \eta, p)^*$ qui maximise le bénéfice net total moyen $\Pi(\omega, \tau, \eta, p)$ est déterminée numériquement en utilisant le solveur non-linéaire (NLP) de *Maplesoft Maple 18*.

En utilisant les données de la table (6.1), le Hessien $\mathcal{H}(\omega, \tau, \eta, p)$ et ses valeurs propres λ_i ($i = 1, \dots, 4$) sont déterminés tels que :

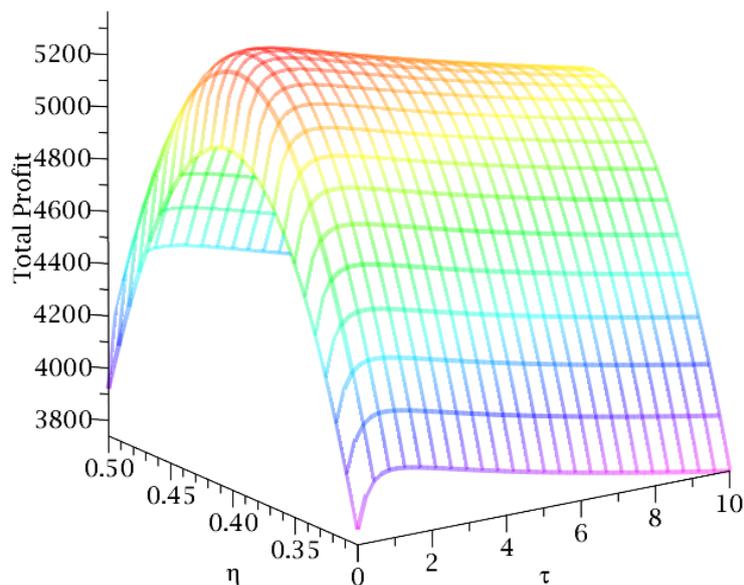
Paramètre	β	θ	A_0	α_1	α_2	d_1	d_2	D_1	D_2	S_0	S_1
Valeur	0.95	2.0	5.0	3.3	0.7	2.6	1.9	10^5	2.0	2.3	91

Table 6.1 – Paramètres utilisés dans les expériences numériques.

$$\mathcal{H}(\omega, \tau, \eta, p) = \begin{bmatrix} -811 & 420.29 & 49 & 696.13 & 395.16 & -428 & 104.79 \\ 49 & 696.13 & -3 & 162.39 & -23.36 & 25 & 831.69 \\ 395.16 & -3 & -23.36 & -106.33 & 205.93 & & \\ -428 & 104.79 & 25 & 831.69 & 205.93 & -227 & 943.78 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 = -39.04, \lambda_2 = -110.80, \lambda_3 = -1\,718.76, \text{ et } \lambda_4 = -1\,040\,764.18.$$

Du fait que les quatre valeurs propres sont négatives, le Hessien est, par conséquent, une matrice définie négative. La solution optimale est alors un maximum local. la stratégie optimale est obtenue en combinant la période de couverture de la garantie $\omega^* = 0.27$, le prix unitaire du produit $p^* = 9.45$, l'âge des composants reconditionnés $\tau^* = 1.12$, et la proportion $\eta^* = 41\%$ du mélange de pièces de rechanges neuves et reconditionnées. Le bénéfice net total moyen résultant est évalué à $\Pi(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*) = 5364$. Ces résultats peuvent également être observés sur la figure (6.1), où le bénéfice net total moyen est établi en fonction à la fois des deux variables de décision de proportion de mélange η et de l'âge initial τ ; les deux autres variables de décision ω et p sont fixées à leurs valeurs optimales respectives ω^* et p^* . A partir de cette figure, les valeurs optimales de τ et η sont identifiées aux sommets de la surface.


 Figure 6.1 – Courbes paramétrées du profit total moyen : cas où $\omega^* = 0.27$ et $p^* = 9.45$

Dans le cas où les deux variables de décision ω et p sont fixées à leurs valeurs optimales respectives ω^* et p^* , la figure (6.2) montre une vue de dessus d'une surface et le graphique de contour du profit total moyen $\Pi(\omega^*, \tau, \eta, p^*)$. De la figure (6.1), le bénéfice optimal a été localisé à 5364. Le contour à 5300 délimite une zone correspondant à une plage de proportions de mélange de 39% à 43%, et une tranche d'âge comprise entre 0.50 et 2.75 pour un écart par rapport à la valeur optimale d'environ 1.8%. Dans ce cas, comme la fonction objectif présente une platitude autour de la valeur d'âge optimale, il est possible de définir une tranche d'âge $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ pour s'approvisionner des pièces reconditionnées sans compromettre le profit total moyen.

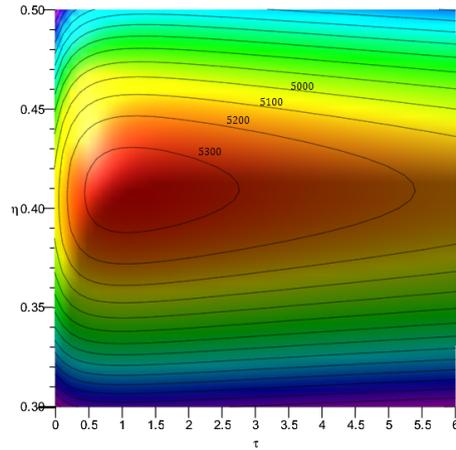


Figure 6.2 – Surfaces et Contours paramétrés du profit total moyen : cas où $\omega^* = 0.27$ et $p^* = 9.45$

Maintenant que l’approche est validée, quelques expériences d’analyse de sensibilité sont ensuite exposées pour tester de la robustesse des résultats des décisions.

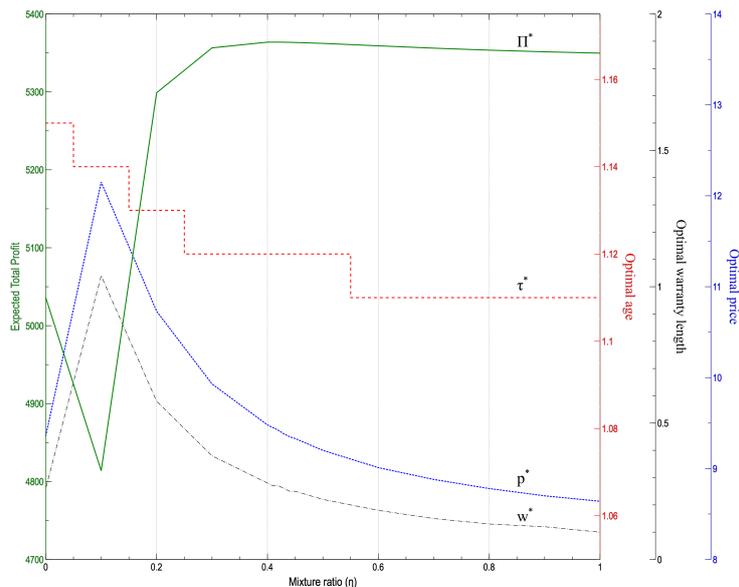
4.1 Impact du ratio η

Une série d’expériences est réalisée pour étudier comment le modèle réagit face à la variation du ratio η de la proportion du mélange des composants de rechange neuvs et reconditionnés. Les résultats numériques obtenus sont résumés dans la table (6.2) et les courbes de la figure (6.3).

	η	ω^*	p^*	τ^*	Π^*
Cas 1	0.00	0.26	9.36	–	5 035.95
	0.10	1.04	12.15	1.15	4 813.87
	0.20	0.58	10.73	1.14	5 298.88
	0.30	0.38	9.93	1.13	5 356.49
	0.40	0.28	9.48	1.12	5 363.83
Cas optimale	0.41	0.27	9.45	1.12	5 363.85
	0.42	0.27	9.42	1.12	5 363.82
	0.43	0.26	9.38	1.12	5 363.73
	0.44	0.25	9.35	1.12	5 363.60
	0.45	0.25	9.33	1.12	5 363.43
	0.50	0.22	9.20	1.12	5 362.23
	0.60	0.18	9.01	1.12	5 359.12
	0.70	0.15	8.88	1.11	5 356.12
	0.80	0.13	8.78	1.11	5 353.56
	0.90	0.12	8.70	1.11	5 351.45
Cas 2	1.00	0.10	8.64	1.11	5 349.72

Table 6.2 – Solutions optimales pour différentes valeurs de η .

A partir de la table (6.2), à l’exclusion du cas particulier (**Cas 1**), on peut noter que le prix p^* et la durée ω^* de la garantie ont le même comportement face à la variation de la proportion η des pièces de rechange reconditionnées. En effet, ils augmentent tous les deux lorsque η diminue. Par conséquent, lorsque la durée de la garantie augmente, les coûts de remplacement augmentent, obligeant le fabricant à augmenter les prix de vente. Ces hausses de prix, à leur tour, entraînent une baisse de la demande et, par conséquent, celle du profit total moyen.


 Figure 6.3 – Solutions optimales pour différentes valeurs de η .

En utilisant un ratio $\eta = 41\%$ de composants reconditionnés, comme suggéré par la stratégie optimale, le bénéfice total moyen passe de 5350 (obtenue pour le cas particulier où $\eta = 1$) à 5364, ce qui montre qu'une mixture appropriée de composants neuves et reconditionnés peut fournir une meilleure solution comparée à celle obtenue par les cas extrêmes où $\eta \in \{0, 1\}$. De plus, à partir de la table (6.2), les valeurs de ω^* et p^* sont légèrement plus élevées que celles obtenues dans les deux cas **Cas 1** et **Cas 2**. Cette observation permet de conclure que l'accès à des pièces reconditionnées à moindre coût, permet une période de garantie légèrement plus longue qui, combinée à une légère augmentation du prix de vente et de la demande, se traduit par un bénéfice total plus élevé.

4.2 Impact du paramètre de forme β de la distribution Weibull

Le paramètre de forme β de la distribution de Weibull peut également avoir un impact significatif sur les variables de décision du fait qu'il impacte naturellement la fiabilité du composant critique. Pour montrer comment β peut influencer la décision optimale, plusieurs stratégies optimales sont évaluées pour différentes valeurs du paramètre β . Les résultats obtenus sont résumés dans la table (6.3) où figurent les valeurs optimales des variables de décision ω^* , τ^* , η^* , et p^* . Cette table donne aussi le bénéfice total moyen $\Pi(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*)$ évalué pour chaque stratégie optimale, en plus des valeurs de la demande totale $D(\omega^*, p^*)$, le nombre moyen de remplacements $\mathbb{E}[N(\omega^*, \tau^*, \eta^*)]$, et la fiabilité $R_m(\omega^*, \tau^*, \eta^*)$ correspondant à la stratégie optimale résultante. La figure (6.4) montre la dynamique entre les quatre variables de décision et le paramètre β de la distribution de Weibull des durées de vie du composant critique.

A partir de la table (6.3), on distingue deux phases particulières, à savoir $\beta < 1$ et $\beta \geq 1$. La première phase ($\beta < 1$) correspond à un taux de pannes décroissant (*DFR : Decreasing Failure Rate*) qui implique donc qu'un composant reconditionné devient plus fiable qu'un composant neuf (*NWU : New Worse than Used*) [137]. Dans ce cas, comme le montre la table (6.3), la solution optimale tend naturellement à suggérer l'utilisation uniquement des composants reconditionnés ($\eta^* = 100\%$) ayant un âge initial $\tau^* \approx 1.1$. En outre, on peut également observer, dans ces conditions, qu'en n'utilisant que des composants reconditionnés, le nombre de défaillances est plus faible, ce qui diminue les fonds de réserve et, par conséquent, les prix de vente diminuent, malgré une couverture de garantie courte. Lorsque la valeur de β augmente pour atteindre 1, le prix de vente augmente légèrement, et ce pour compenser la faible baisse de la fiabilité et l'augmentation correspondante du fond de réserve.

Dans la deuxième phase où $\beta \geq 1$, le taux de pannes est croissant (*IFR : Increasing Failure Rate*) et la fiabilité du mélange se détériore à mesure que la valeur de β augmente de plus en plus. Dans ce cas, le

β	ω^*	p^*	τ^*	η^*	$\Pi(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*)$	$D(\omega^*, p^*)$	$\mathbb{E}[N(\omega^*, \tau^*, \eta^*)]$	$R_m(\omega^*, \tau^*, \eta^*)$
0.5	0.01	8.19	1.10	1.000	4 923	1 584	0.057	0.998
0.6	0.02	8.28	1.10	1.000	4 974	1 560	0.058	0.993
0.7	0.04	8.38	1.11	1.000	5 054	1 536	0.059	0.985
0.8	0.06	8.49	1.11	1.000	5 159	1 517	0.060	0.974
0.9	0.09	8.59	1.11	1.000	5 283	1 508	0.061	0.959
1.0	0.38	9.80	1.10	0.325	5 481	1 369	0.206	0.829
1.1	0.48	9.99	1.03	0.280	5 722	1 411	0.232	0.804
1.2	0.54	10.01	0.95	0.262	5 958	1 474	0.238	0.794
1.3	0.59	9.99	0.87	0.252	6 186	1 541	0.236	0.790
1.4	0.64	9.94	0.81	0.245	6 406	1 610	0.232	0.789
1.6	0.71	9.84	0.70	0.239	6 824	1 744	0.220	0.791
1.8	0.77	9.73	0.61	0.236	7 213	1 872	0.207	0.797
2.0	0.82	9.63	0.55	0.236	7 575	1 993	0.194	0.803
2.5	0.93	9.41	0.46	0.242	8 380	2 265	0.167	0.820
3.0	1.01	9.25	0.42	0.251	9 064	2 500	0.146	0.834
3.5	1.08	9.12	0.39	0.261	9 652	2 704	0.129	0.845
4.0	1.14	9.02	0.37	0.273	10 163	2 883	0.116	0.854
5.0	1.23	8.87	0.33	0.297	11 009	3 183	0.097	0.866
6.0	1.30	8.76	0.31	0.323	11 684	3 425	0.083	0.874
7.0	1.36	8.68	0.29	0.349	12 237	3 624	0.072	0.880
8.0	1.40	8.61	0.27	0.375	12 700	3 792	0.064	0.884
10.0	1.48	8.52	0.24	0.428	13 434	4 059	0.053	0.889

Table 6.3 – Solutions optimales pour différentes valeurs de β .

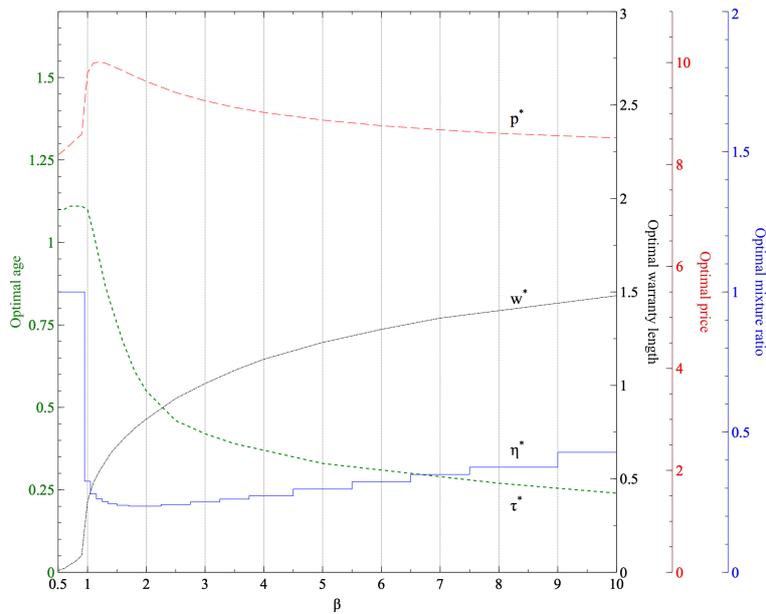


Figure 6.4 – Solutions optimales pour différentes valeurs de β

modèle propose d'augmenter le nombre de pièce de rechange neuves ainsi que de pièces reconditionnées de faible âge initial. À partir de la table (6.3), il est également montré que lorsque β augmente, la période de garantie optimale augmente. De plus, la demande totale et le bénéfice augmentent également à mesure que β augmente. Ce résultat pourrait être interprété comme le fait que, pour assurer un profit total moyen plus élevé, la stratégie optimale suggère d'augmenter le volume des ventes.

4.3 Impact de la période de garantie ω

Un ensemble d'expériences est mené pour étudier l'impact de la période ω de garantie sur les décisions optimales. La table (6.4) résume les résultats obtenus pour différentes valeurs de ω .

ω	p^*	τ^*	η^*	$\Pi(\omega, \tau^*, \eta^*, p^*)$	$D(\omega, p^*)^*$	$R_m(\omega, \tau, \eta)^*$	$A(\tau^*, \eta^*)$
0.1	8.55	1.11	1.0000	5349	1547	0.952	1.5012
0.2	9.09	1.12	0.5411	5361	1440	0.901	3.1069
0.5	10.62	1.14	0.2455	5334	1225	0.770	4.1412
1.0	13.63	1.17	0.1505	5081	905	0.599	4.4737
1.9	21.06	1.21	0.1207	4239	481	0.388	4.5785
2.0	22.09	1.22	0.1206	4132	446	0.370	4.5788
2.5	27.97	1.24	0.1255	3593	302	0.293	4.5621
3.0	35.33	1.25	0.1378	3077	201	0.232	4.5196
4.0	56.08	1.29	0.1847	2195	85	0.147	4.3573
5.0	88.50	1.31	0.2714	1545	35	0.094	4.0567
6.0	139.02	1.34	0.4246	1102	14	0.061	3.5265
7.0	217.55	1.36	0.6982	815	5	0.040	2.5809
8.0	318.24	1.36	1.0000	632	2	0.026	1.5347

Table 6.4 – solutions optimales pour différentes valeurs de ω .

De la table (6.4), il est montré qu'à mesure que la durée de la garantie augmente, le modèle nécessite des niveaux de fiabilité plus élevés afin de réduire les coûts. Par conséquent, lorsque des remplacements sont effectués, la stratégie optimale suggère d'utiliser plus de pièces de rechange neuves. Cette solution d'amélioration de la fiabilité reflète la diminution de la valeur optimale η^* du ratio de la mixture des pièces reconditionnées. La valeur optimale la plus faible du ratio η est évaluée à $\eta = 12.06\%$, ce qui est obtenu pour une durée de garantie $\omega \approx 2$. Pour cette valeur de la période de garantie, le coût moyen d'acquisition atteint son maximum soit alors $\mathbb{E}[A(\tau, \eta) = 4.5788]$. À partir de cette valeur, le coût d'acquisition commence à diminuer à mesure que la valeur optimale du ratio de la mixture augmente. Des données de la table (6.4), on peut également observer que l'augmentation de la durée de la garantie augmente à la fois les valeurs optimales du prix de vente p^* et de l'âge initial τ^* . Ainsi, lorsque la durée de la garantie devient importante, la stratégie optimale suggère d'augmenter le prix de vente et l'utilisation des composants plus âgés.

4.4 Impact du coût de récupération S_1

Dans cette expérience, l'impact du paramètre de coût de récupération S_1 sur la décision optimale est étudié. Les résultats obtenus pour différentes valeurs de S_1 sont reportés dans la table (6.5) et représentés graphiquement sur la figure (6.5).

Les résultats montrent que la valeur de S_1 a un impact relativement faible sur les variables de décision (ω^*, τ^*) liées à la fiabilité des composants et, par conséquent, au prix de vente p^* . On peut observer, à partir de la table (6.5), que lorsque les valeurs de S_1 passent de 50 à 500 (une augmentation de 900%), les valeurs correspondantes de ω^* , τ^* , et p^* changent respectivement de 4.4%, 3.2% et -1.2%. D'autre part, le bénéfice total moyen augmente de 17.5%, et le ratio η^* est également significativement affecté par la variation de S_1 .

Il convient également d'observer que lorsque S_1 augmente, le profit total moyen optimal $\Pi(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*)$ augmente également avant d'atteindre la valeur maximale obtenue, dans ce cas de figure,

S_1	η^*	p^*	τ^*	ω^*	$\Pi(\omega^*, \tau^*, \eta^*, p^*)$
50	0.13	9.92	0.746	0.68	6 513
75	0.20	9.90	0.747	0.68	6 577
90	0.24	9.89	0.748	0.68	6 616
100	0.27	9.89	0.748	0.68	6 641
150	0.40	9.85	0.751	0.67	6 771
200	0.52	9.81	0.753	0.66	6 901
300	0.78	9.75	0.760	0.64	7 162
500	1.00	9.80	0.770	0.71	7 654
600	1.00	9.91	0.780	0.78	7 841
1 000	1.00	10.16	0.800	0.98	8 323
2 000	1.00	10.37	0.850	1.28	8 641
2 100	1.00	10.38	0.856	1.30	8 635
2 500	1.00	10.41	0.869	1.39	8 566
5 000	1.00	10.45	0.923	1.72	7 208
7 000	1.00	10.43	0.950	1.89	5 536

Table 6.5 – Solutions optimales pour différentes valeurs de S_1 .

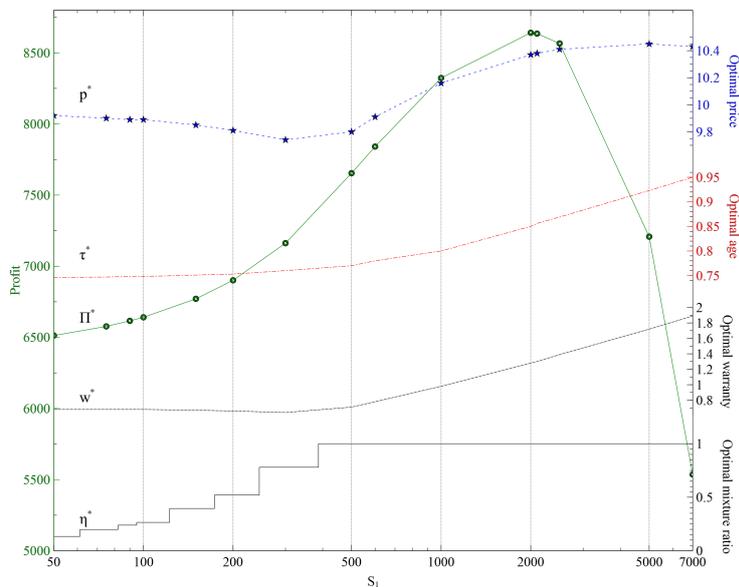


Figure 6.5 – Solutions optimales pour différentes valeurs de S_1 .

pour $S_1 = 2\,000$. Après le point maximum, la fonction de profit diminue en raison de l'augmentation du coût d'acquisition des composants reconditionnés.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé un problème de garantie dans le domaine des chaînes logistique à boucle fermée tenant compte des processus de remanufacturing. Partant du constat de l'impossibilité d'accéder à une quantité suffisante de composants de rechange reconditionnés, ce chapitre présente un modèle mathématique pour une politique de garantie, dans laquelle les composants de remplacement sont choisis au hasard parmi un lot composé de composants de rechange neufs et reconditionnés. La demande du produit est modélisée en tenant compte la préférence du consommateur pour des produits ayant une bonne combinaison de prix de vente et de période de garantie. Ce modèle permet également d'inclure les coûts de récupération des composants reconditionnés pour tenir compte du coût d'initialisation du réseau de récupération, ainsi que l'écart par rapport au volume idéal de produits récupérés. Le modèle d'optimisation développé a permis de justifier l'importance de l'utilisation de composants reconditionnés dans le processus de production en démontrant la rentabilité dans une perspective d'analyse des coûts de garantie. Indéniablement, la finalité de ce travail de recherche présenté dans ce chapitre est de nourrir un axe de recherche sensible aux différentes contraintes et recommandation établies dans le cadre des chaînes logistiques inverses et de développement durable.

Chapitre 7

Maintenance sélective tenant compte de la qualité stochastique des actions de maintenance

1 Introduction

Ce chapitre expose une approche d'optimisation de la maintenance pour un système multi-composant. Le système est conçu pour opérer selon une séquence alternée de missions et d'arrêts planifiés. Afin d'améliorer ses performances pour la prochaine mission, le système est mis à disposition pour effectuer les activités de maintenance nécessaires sur ses composants pendant ces arrêts planifiés. Cependant, en raison de la durée limitée des arrêts planifiés, ainsi que du budget et, en général, des ressources en maintenance, il est souvent impossible de maintenir tous les composants du système. Il est donc nécessaire d'identifier un sous-ensemble optimal de composants à maintenir et le niveau d'actions de maintenance à effectuer sur ces composants. Ce type de stratégie de maintenance est connu dans la littérature sous le nom de maintenance sélective (MS).

Les premiers travaux traitant de la MS sont ceux de Rice et. al. [36]. Les auteurs ont considéré un système série-parallèle où les sous-systèmes sont constitués de composants indépendants et distribués de façon identique (*i.i.d*) avec des durées de vie exponentiellement distribuées. Dans ces travaux, seul le remplacement est alors disponible comme option de maintenance. Les travaux de Rice et. al. [36] ont été ensuite étendu de différentes manières.

Cassady et al. [138] ont développé une approche de modélisation et d'optimisation de la MS tout en relaxant l'hypothèse restrictive des sous-systèmes identiques. Trois problèmes d'optimisation de MS ont ensuite été proposés et résolus. Dans [139], trois actions de maintenance sont considérées : une réparation minimale, un remplacement correctif et un remplacement préventif. Une méthode d'énumération totale est proposée et appliquée pour un système série-parallèle, constitué de composants avec des durées de vie gouvernées par une loi de Weibull. Pour traiter la MS des systèmes de grandes tailles, Rajagopalan et Cassady [140] ont proposé quatre procédures d'énumération améliorées pour réduire le temps de calcul. Dans [37], les auteurs ont proposé deux heuristiques adaptées à partir de celles utilisées dans les problèmes d'allocation de la redondance (*Redundancy allocation problem* : RAP). Lust et al. [141] ont également proposé une méthode exacte basée sur la procédure branch-and-bound combinée à un algorithme basé sur la recherche Tabu. Dans [142], le problème de maintenance sélective prenant compte l'allocation des ressources est étudié. Dans [143, 144], les auteurs étendent le problème original de Rice et. al. [36] pour traiter le problème de maintenance sélective multi-missions.

Le problème initial de la MS a également été étendu pour inclure des modèles de maintenance imparfaite. Zhu et al. [39] ont utilisé l'approche du coefficient de réduction d'âge [145] pour modéliser une maintenance imparfaite. L'approche développée dans [39] est appliquée à une ligne d'usinage dans l'industrie automobile. Pandey et al. [101] ont également proposé un modèle de MS avec un modèle

de maintenance imparfaite basée sur le principe du taux de pannes hybride [146, 99]. Khatab et al. [147, 148] ont développé un modèle de MS avec un modèle de maintenance imparfaite et considèrent le cas où les durées des missions et celles des arrêts sont stochastiques avec des distributions connues.

La maintenance sélective a également été étudiée pour les systèmes multi-états (MSS). Le premier travail est rapporté dans [149] où les composants du système et le système lui-même peuvent être dans $(K + 1)$ états possibles. Le remplacement des composants défectueux est la seule option de maintenance disponible. Dans [150], les auteurs considèrent le problème de MS pour un MSS où les composants sont caractérisés par deux états de fonctionnement. Un algorithme génétique est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation qui en résulte. Pandey et al. [151] considèrent un MSS où les composants sont caractérisés par plusieurs états de performances. Les taux de transition entre les états du composant sont supposés constants; le fonctionnement des composants est modélisé par des chaînes de Markov à temps continu. Le travail le plus récent dans [152] a étudié la maintenance sélective pour un MSS en tenant compte des dépendances économiques entre les composants des systèmes. Dans [153], plusieurs niveaux de maintenance imparfaite sont considérés et le système est composé de composants multi-états modélisés de la même manière que dans [151]. Une procédure basée sur la programmation linéaire est proposée pour réduire l'espace de recherche.

Concernant les modèles de maintenance imparfaite exploités dans le cadre de la maintenance sélective, les paramètres de réduction d'âge et d'ajustement sont supposés constants. Cependant, cette hypothèse peut ne plus être valable dans de nombreuses situations réelles où il est difficile d'évaluer précisément la qualité d'une action de maintenance. En effet, une telle qualité est étroitement liée à la qualification et au degré d'expertise des réparateurs et aux méthodes et outils de maintenance utilisés pour effectuer l'action de maintenance. Il est donc plus réaliste de supposer que la qualité d'une action de maintenance est stochastique et pourrait donc être modélisée comme une variable aléatoire régie par une distribution de probabilité appropriée.

Ce chapitre aborde le problème de l'optimisation de la maintenance sélective dans un système multi-composant effectuant plusieurs missions avec un arrêt planifié entre deux missions consécutives. Pour améliorer la probabilité que le système réussisse la prochaine mission, la maintenance est effectuée sur les composants du système pendant un arrêt. Chaque composant se voit attribuer une liste d'actions de maintenance éligibles allant d'une réparation minimale à un remplacement en passant par des actions de maintenance intermédiaires imparfaites. La qualité d'une action de maintenance est supposée stochastique, reflétant le degré d'expertise du réparateur et les outils utilisés pour effectuer l'action de maintenance. Cette qualité est donc traitée comme une variable aléatoire avec une distribution de probabilité identifiée. Le problème de maintenance sélective vise donc à trouver un sous-ensemble optimal d'actions de maintenance à effectuer sur le système pendant la durée limitée de la rupture, ce qui garantit que la probabilité minimum préétablie de réussir la prochaine mission est atteinte. Les constructions fondamentales et les paramètres pertinents de ce problème d'optimisation non-linéaire et stochastique sont développés et discutés. Il est ensuite mis en pratique pour un système série-parallèle et la valeur ajoutée de sa résolution en tant que problème stochastique est démontrée.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La Section 2 décrit le système étudié et les structures des temps et des coûts de maintenance adoptées. La Section 3 traite du modèle de la qualité stochastique de la maintenance imparfaite. Dans la Section 4, le modèle probabiliste de l'achèvement de la mission est développé sur la base des résultats de la Section 3. Dans les Sections 5 et 6, une formulation stochastique du problème d'optimisation de la maintenance sélective est présentée, ses principales propriétés sont également discutées. Pour illustrer l'approche proposée, des exemples numériques sont fournis dans la Section 7. Des conclusions sont présentées dans la Section 8.

Le travail exposé dans ce chapitre repose sur les hypothèses suivantes :

1. Le système consiste en plusieurs composants binaires réparables.
2. Les composants du système sont stochastiquement indépendants (s -independent).
3. Pendant l'arrêt, les composants du système ne vieillissent pas, c'est-à-dire que les composants ne vieillissent que lorsqu'ils sont en fonctionnement.

4. Les durées de vie d'un composant du système sont connues.
5. Aucune activité de maintenance n'est autorisée pendant la mission, c'est-à-dire que les activités de maintenance ne sont autorisées que pendant l'arrêt.
6. Après remplacement, un composant devient "comme neuf".
7. Un seul réparateur ou canal de réparation est disponible.

2 Description du système, et modèles de temps et de couts maintenance

Nous considérons un système multi-composant qui, sans perte de généralité, est représenté par un diagramme bloc de fiabilité série-parallèle composé de n sous-systèmes en série. Un sous-système i ($i = 1, \dots, n$) est composé de N_i composants C_{ij} ($j = 1, \dots, N_i$) en parallèle. Nous supposons que le système vient juste d'achever la mission courante et entame un arrêt planifié d'une durée fixe au cours de laquelle des activités de maintenance peuvent être effectuées. Par la suite, le système sera remis en service pour exécuter la prochaine mission de durée connue U avec un niveau de fiabilité requis prédéterminé. À la fin de la mission courante, chaque composant peut être soit en état de fonctionnement ou de panne. Deux variables d'état Y_{ij} et X_{ij} sont alors utilisées pour identifier l'état du composant C_{ij} , respectivement, à la fin de la mission courante et au début la mission suivante :

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } C_{ij} \text{ fonctionne à la fin de la mission courante,} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (7.1)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } C_{ij} \text{ fonctionne au début de la mission suivante,} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (7.2)$$

Pour chaque composant C_{ij} correspond une liste de L_{ij} options (niveaux) de maintenance disponibles $\{1, \dots, l, \dots, L_{ij}\}$ où les valeurs particulières $l = 1$ et $l = L_{ij}$ représentent, respectivement, le cas d'une réparation minimale et d'un remplacement. Les valeurs intermédiaires des niveaux $1 < l < L_{ij}$ représentent des niveaux de maintenance imparfaite qui, lorsqu'elles sont effectuées, elles ramènent l'état de santé du composant entre les deux conditions extrêmes : aussi bon que neuf (*as good as new*) et aussi mauvais qu'âgé (*as bad as old*).

En fonction du niveau requis de fiabilité du système pour exécuter la mission suivante, un composant C_{ij} peut être sélectionné pour une action de maintenance avec un niveau $l > 0$. Le temps ainsi que le coût de maintenance dépendent du niveau de maintenance effectuée, de l'âge ainsi que de l'état (fonctionnement ou panne) du composant sur lequel l'action de maintenance est réalisée. En effet, une faible valeur du niveau d'amélioration en fiabilité induit un faible coût de maintenance. D'autre part, le coût induit par un niveau d'amélioration sur un composant jeune est inférieur à celui induit par le même niveau d'amélioration réalisé sur un composant plus âgé. En outre, il est réaliste et pratique de supposer que la maintenance d'un composant défectueux est plus coûteuse par rapport à sa maintenance lorsqu'il fonctionne encore. Dans le présent travail, il est également supposé que les coûts de maintenance et les temps de remplacement dépendent uniquement de l'état du composant (fonctionnement ou panne). De plus, le niveau $l = 1$ de maintenance (réparation minimal) n'est éligible que pour un composant défaillant et son coût et son temps sont indépendants de l'âge du composant. Ces quantités sont évaluées dans les sections suivantes.

Un niveau l de maintenance, lorsqu'il est réalisé sur un composant C_{ij} , induit un coût MC_{ijl} défini tel que :

$$MC_{ijl} = \begin{cases} MC_{ijl}^p, & \text{si } Y_{ij} = 1 \text{ et } l > 1, \\ MC_{ijl}^c, & \text{si } Y_{ij} = 0. \end{cases} \quad (7.3)$$

Dans l'équation ci-dessus, le coût de maintenance induit par le composant C_{ij} lorsqu'il subit une action de maintenance de niveau l est égal à MC_{ijl}^p ou MC_{ijl}^c selon que le composant C_{ij} est en état de fonctionnement ou en panne à la fin de la mission en cours, avec $MC_{ijl}^c > MC_{ijl}^p$. Selon les hypothèses mentionnées ci-dessus, les valeurs particulières du coût de maintenance sont définies pour

$l = 1$ (réparation minimale) et $l = L_{ij}$ (remplacement). Pour un composant en panne à la fin de la mission courante, $MC_{i1}^c = MRC_{ij}$ et $MC_{ijL_{ij}}^c = RC_{ij}^c$, alors que dans le cas où le composant fonctionne encore, $MC_{ijL_{ij}}^p = RC_{ij}^p$ et MC_{i1}^p n'est pas admissible (i.e. qu'une réparation minimale est admissible en tant qu'option de maintenance uniquement pour un composant en panne).

Par analogie au coût de maintenance défini ci-dessus, un niveau l de maintenance réalisée sur un composant C_{ij} requiert un temps MT_{ijl} défini tel que :

$$MT_{ijl} = \begin{cases} MT_{ijl}^p, & \text{si } Y_{ij} = 1 \text{ et } l > 1, \\ MT_{ijl}^c, & \text{si } Y_{ij} = 0. \end{cases} \quad (7.4)$$

De manière similaire, les valeurs particulières du temps de maintenance sont définies pour les réparations minimales (niveau $l = 1$) et les opérations de remplacement (niveau $l = L_{ij}$). Pour un composant en panne à la fin de la mission courante, $MT_{i1}^c = MRT_{ij}$ et $MT_{ijL_{ij}}^c = RT_{ij}^c$, alors que dans le cas où le composant est encore en état de fonctionnement, $MT_{ijL_{ij}}^p = RT_{ij}^p$ et MT_{i1}^p n'est pas admissible.

Le coût et le temps assignés aux niveaux intermédiaires de maintenance $1 < l < L_{ij}$ sont liés à l'âge et à l'état (fonctionnement ou panne) d'un composant en plus du niveau d'amélioration l . Pour un tel niveau d'amélioration, et pour déterminer le coût et le temps consommés des ressources en maintenance, il faut d'abord évaluer l'amélioration et l'impact de la maintenance sur l'âge et le taux de panne d'un composant. Dans nos travaux, un tel impact est modélisé comme une variable aléatoire reflétant ainsi la qualité stochastique d'une action de maintenance.

3 Modélisation de la qualité d'un niveau de maintenance imparfaite

Dans ce travail de recherche, le modèle de maintenance imparfaite est basé sur le concept d'âge virtuel initialement défini par de Malik [145]. Le principe de ce modèle consiste à réduire l'âge d'un système par le biais d'un coefficient dit de réduction d'âge. Plus explicitement, et en se situant dans notre contexte, après une maintenance imparfaite, l'âge t d'un composant du système est réduit à $\varphi \times t$ où φ est le coefficient de réduction d'âge ($0 \leq \varphi \leq 1$). En conséquence, le composant devient comme neuf (*as good as new*) si son âge est remis à zéro (cas où $\varphi = 0$), alors qu'il devient *aussi mauvais qu'âgé* : (*as bad as old*) si le coefficient de réduction d'âge $\varphi = 1$. Dans le dernier cas, la maintenance imparfaite correspond à la réparation minimale qui consiste à restaurer le système à l'état de fonctionnement se situant immédiatement avant la panne.

En prenant compte le fait que la qualité de la maintenance imparfaite est stochastique, le modèle de réduction d'âge de Malik [145] doit être adapté à notre contexte. Par conséquent, pour un composant donné C_{ij} , chaque niveau de maintenance $l \in \{1, \dots, L_{ij}\}$ est caractérisé par un coefficient stochastique de réduction d'âge représenté par une variable aléatoire Φ_{ijl} définie sur le support $[0, 1]$, et ayant une fonction de densité de probabilité (pdf) $f_{\Phi_{ijl}}(\varphi)$ et une fonction de distribution (cdf) $F_{\Phi_{ijl}}(\varphi)$. La valeur moyenne et l'écart type de Φ_{ijl} sont, respectivement, notés par $\mu_{\Phi_{ijl}}$ et $\sigma_{\Phi_{ijl}}$. L'incertitude attribuée à chaque niveau de maintenance l est caractérisée par son écart-type $\sigma_{\Phi_{ijl}}$ qui reflète ainsi le degré d'expertise du réparateur pour effectuer correctement une action de maintenance. De ce fait, une valeur faible de $\sigma_{\Phi_{ijl}}$ indique un meilleur intervalle de confiance de la qualité de l'action de maintenance.

Sans perte de généralité, dans le présent chapitre, le coefficient stochastique de réduction d'âge Φ_{ijl} est régie par une loi Beta de paramètres (à valeurs positives) de forme a_{ijl} et b_{ijl} et ayant une fonction de densité de probabilité (pdf) $f_{\Phi_{ijl}}(\varphi)$ telle que :

$$f_{\Phi_{ijl}}(\varphi) = \frac{1}{Beta(a_{ijl}, b_{ijl})} \varphi^{a_{ijl}-1} (1-\varphi)^{b_{ijl}-1}, \quad (7.5)$$

où $Beta(a_{ijl}, b_{ijl})$ est la fonction Beta définie par $Beta(a_{ijl}, b_{ijl}) = \int_0^1 t^{a_{ijl}-1} (1-t)^{b_{ijl}-1} dt$. Par conséquent, la valeur moyenne et l'écart type du coefficient stochastique de réduction d'âge Φ_{ijl} sont :

$$\mu_{\Phi_{ijl}} = \frac{a_{ijl}}{a_{ijl} + b_{ijl}}, \text{ et } \sigma_{\Phi_{ijl}} = \sqrt{\frac{a_{ijl}b_{ijl}}{(a_{ijl} + b_{ijl})^2(a_{ijl} + b_{ijl} + 1)}}. \quad (7.6)$$

En guise d'illustration, les figures (7.1)-(7.3) représentent des exemples de fonctions de densité de probabilité correspondantes à des coefficients stochastiques de réduction d'âge. Dans la figure (7.1), la courbe correspond à la densité de probabilité (pdf) de l'action de remplacement (niveau $l = L_{ij}$) pour laquelle la valeur moyenne du coefficient stochastique de réduction d'âge est nulle ($\mu_{\Phi_{ijL_{ij}}} = 0$). La courbe de la figure (7.2) représente le cas d'une réparation minimale (niveau $l = 1$) dont la valeur moyenne du coefficient stochastique de réduction d'âge est $\mu_{\Phi_{i1}} = 1$. Entre ces deux actions extrêmes de maintenance, la figure (7.3) montre trois actions de maintenance imparfaites avec des coefficients moyens de réduction d'âge 0.2, 0.4 et 0.8.

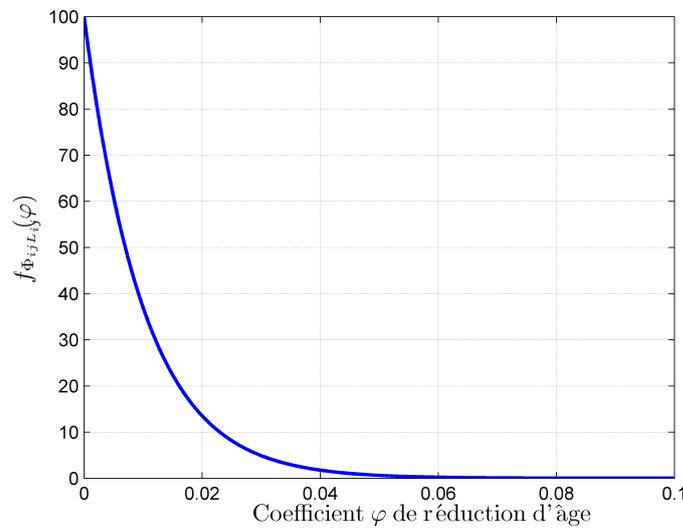


Figure 7.1 – Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas où $\mu_{\Phi_{ijl}} = 0$ et $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.01$.

Maintenant que la modélisation de la qualité d'une action de maintenance est exposée, nous nous intéressons au calcul du coût et du temps requis pour réaliser une action de maintenance imparfaite. Dans le présent travail, on considère que le coût MC_{ijl} du niveau de maintenance imparfaite $1 < l < L_{ij}$ effectué sur le composant C_{ij} est fonction de la valeur moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient stochastique de réduction d'âge Φ_{ijl} , en plus de l'âge B_{ij} et de l'état Y_{ij} (fonctionnement ou panne) du composant C_{ij} . Un tel coût est donné par l'expression suivante :

$$MC_{ijl} = \begin{cases} RC_{ij}^p \cdot (1 - \mu_{\Phi_{ijl}})^{\delta_{ij}(B_{ij})}, & \text{si } Y_{ij} = 1, \\ RC_{ij}^c \cdot (1 - \mu_{\Phi_{ijl}})^{\delta_{ij}(B_{ij})}, & \text{si } Y_{ij} = 0, \end{cases} \quad (7.7)$$

$$MT_{ijl} = \begin{cases} RT_{ij}^p \cdot (1 - \mu_{\Phi_{ijl}})^{\delta_{ij}(B_{ij})}, & \text{si } Y_{ij} = 1, \\ RT_{ij}^c \cdot (1 - \mu_{\Phi_{ijl}})^{\delta_{ij}(B_{ij})}, & \text{si } Y_{ij} = 0, \end{cases} \quad (7.8)$$

où nous rappelons que RC_{ij}^p et RC_{ij}^c sont les coûts des remplacements préventif et correctif, respectivement, et RT_{ij}^p et RT_{ij}^c sont les temps des remplacements préventif et correctif, respectivement. La fonction $\delta_{ij}(B_{ij})$ est une fonction de l'âge B_{ij} du composant C_{ij} à la fin de la mission courante. Cette fonction est définie par l'expression suivante :

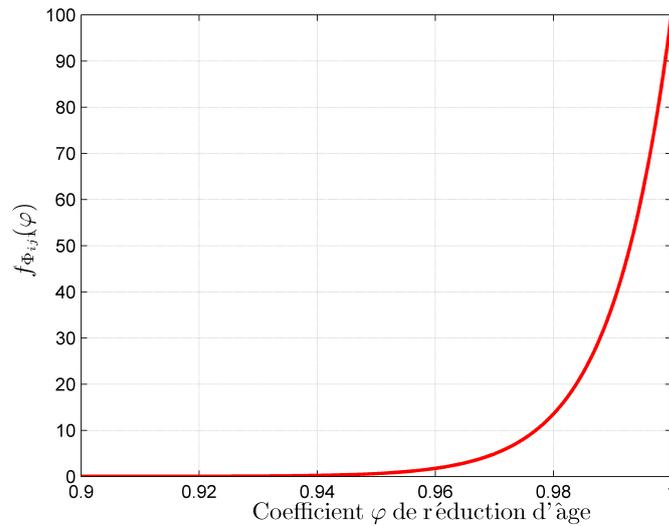


Figure 7.2 – Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas où $\mu_{\Phi_{ijl}} = 1$ et $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.20$.

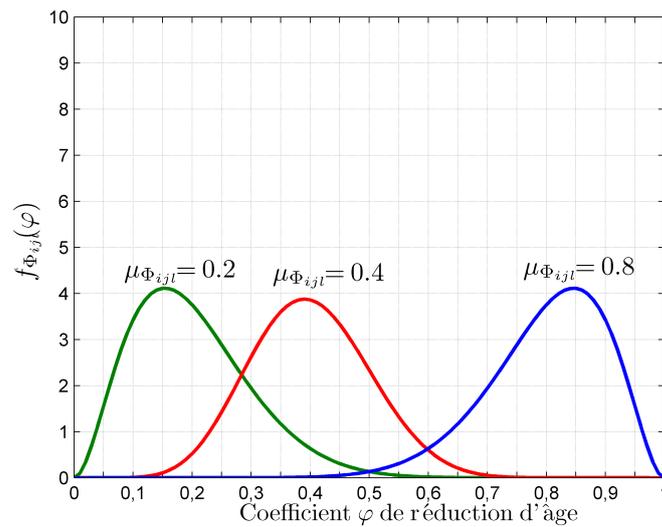


Figure 7.3 – Fonction de densité Beta du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas des niveaux intermédiaires de maintenance imparfaite.

$$\delta_{ij}(B_{ij}) = \frac{\int_{B_{ij}}^{+\infty} \mathcal{R}_{ij}(t) dt}{B_{ij} \cdot \mathcal{R}_{ij}(B_{ij})}, \quad (7.9)$$

où $\mathcal{R}_{ij}(t)$ représente la fonction fiabilité du composant C_{ij} .

4 Évaluation de la fiabilité de la mission suivante

Afin d'évaluer la fiabilité du système à accomplir la mission suivante, commençons d'abord par évaluer cette fiabilité pour un composant C_{ij} du système. Pour cela, il convient de noter que cette fiabilité est une probabilité conditionnelle qui dépend de l'âge du composant au début de la mission suivante. Cet âge,

noté par A_{ij} , doit alors être estimé en fonction de sa valeur initiale B_{ij} à la fin de la mission courante, mais aussi en fonction du niveau de maintenance réalisée si le composant C_{ij} figure parmi les composants à maintenir. Supposons alors qu'une maintenance de niveau l est effectuée sur le composant C_{ij} . Selon le modèle de maintenance imparfaite adoptée, l'âge A_{ij} est évalué tel que :

$$A_{ij} = \Phi_{ijl} \cdot B_{ij}, \quad (7.10)$$

où, rappelons le, le terme Φ_{ijl} est le coefficient stochastique de réduction d'âge correspondant au niveau l de maintenance.

À la fin de la mission courante, le composant C_{ij} peut être dans un état de fonctionnement ($Y_{ij} = 1$) ou dans un état de panne ($Y_{ij} = 0$). Si une réparation minimale ($l = 1$) est choisie comme niveau de maintenance alors que C_{ij} est en panne, dans ce cas, l'âge de C_{ij} reste, en moyenne, inchangé. En effet, au niveau $l = 1$ de maintenance correspond un coefficient stochastique $\Phi_{ijl} = \Phi_{ij1}$ de réduction d'âge dont la valeur moyenne est $\mu_{\Phi_{ij1}} = 1$. Si le plus haut niveau $l = L_{ij}$ de maintenance est réalisé, dans ce cas le composant C_{ij} devient comme neuf (*as good as new*) et son âge devient en moyenne nul ($\mu_{\Phi_{ijL_{ij}}} = 0$).

Soit $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})$ la fiabilité conditionnelle que le composant C_{ij} survive la mission suivante sachant qu'il admet un âge effectif A_{ij} . Si T_{ij} désigne la variable aléatoire des durées de vie du composant C_{ij} , alors la fiabilité conditionnelle $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})$ est évaluée comme suit :

$$\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij}) = \Pr(T_{ij} > A_{ij} + U | T_{ij} > A_{ij}) \cdot X_{ij}, \quad (7.11)$$

où, en utilisant l'équation (7.10), la probabilité conditionnelle $\Pr(T_{ij} > A_{ij} + U | T_{ij} > A_{ij})$ est telle que :

$$\Pr(T_{ij} > A_{ij} + U | T_{ij} > A_{ij}) = \frac{\Pr(T_{ij} > \Phi_{ijl} \cdot B_{ij} + U)}{\Pr(T_{ij} > \Phi_{ijl} \cdot B_{ij})}. \quad (7.12)$$

En exploitant le fait que le coefficient Φ_{ijl} est stochastique de support $[0, 1]$ et de fonction de densité de probabilité $f_{\Phi_{ijl}}(\varphi)$, la fiabilité $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})$ s'exprime alors telle que :

$$\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij}) = \left(\frac{\int_0^1 \mathcal{R}_{ij}(\varphi B_{ij} + U) f_{\Phi_{ijl}}(\varphi) d\varphi}{\int_0^1 \mathcal{R}_{ij}(\varphi B_{ij}) f_{\Phi_{ijl}}(\varphi) d\varphi} \right) \cdot X_{ij} \quad (7.13)$$

La fiabilité $\mathcal{R}^c(U | A_{11}, \dots, A_{nN_n})$ de l'ensemble du système séries-parallèle est évaluée à partir de la fiabilité $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})$ de chaque composant C_{ij} :

$$\mathcal{R}^c(U | A_{11}, \dots, A_{nN_n}) = \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} [1 - \mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})] \right). \quad (7.14)$$

Pour illustrer l'impact de la qualité d'une maintenance sur la fiabilité, nous continuons à considérer un seul composant, soit C_{ij} . Supposons que l'âge du composant à la fin de la mission courante est évalué à $B_{ij} = 15$, que la durée de la mission suivante est fixée à $U = 8.8$. Supposons également que les durées de vie du composant C_{ij} sont régies par une loi de Weibull ayant des paramètres de forme et d'échelle $\beta_{ij} = 1.5$ et $\eta_{ij} = 15$, respectivement. Supposons qu'une action de maintenance de niveau l , dont le coefficient de réduction d'âge est en moyenne égal à 0.35, est réalisée sur le composant C_{ij} . Dans le cas déterministe, c'est-à-dire le cas où la qualité de l'action de maintenance est supposée déterministe, la probabilité que la composante C_{ij} réussisse la prochaine mission est évaluée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij}) = 49.68\%$. Cependant, si l'on considère un coefficient stochastique de réduction d'âge tel que Φ_{ijl} est distribué selon une loi Beta de moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}} = 0.35$ et d'écart type $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.20$, la probabilité de survivre la prochaine mission est évaluée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij}) = 51.44\%$ ce qui donne une différence de 1.75% par rapport à la valeur obtenue via l'approximation déterministe. Une telle différence peut être très critique dans certaines missions particulières du système.

Le cas où le niveau de maintenance réalisé correspond au remplacement du composant est un cas particulier où la fiabilité se trouve sur-estimée par le modèle stochastique de maintenance imparfaite. En effet, considérons un composant C_{ij} avec les mêmes données utilisées précédemment. Supposons que C_{ij} subit une action de maintenance de niveau L_{ij} , i.e. C_{ij} devient *comme neuf* après l'action de maintenance. Dans le cas déterministe, la probabilité que ce composant survive la mission suivante est évaluée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U|A_{ij}) = 63.80\%$. Cependant, si le coefficient de réduction d'âge stochastique $\Phi_{ijL_{ij}}$ de L_{ij} est considéré et est supposé distribué selon une loi Beta de moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}} = 0.35$ et d'écart type $\sigma_{\Phi_{ijl}} = 0.01$, dans ce cas, la probabilité de survie de la prochaine mission est sous-estimée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U|A_{ij}) = 63.38\%$. Il en résulte alors une différence de 0.42% par rapport à la fiabilité fournie par l'approximation déterministe.

Les exemples ci-dessus montrent que, supposer que le coefficient de réduction d'âge est déterministe plutôt que stochastique peut avoir des conséquences d'ordre économiques, de sûreté et de sécurité. En effet, en utilisant le coefficient de réduction déterministe, l'évaluation de la fiabilité peut être plus petite ou plus grande que celle déterminée en considérant le coefficient de réduction stochastique. Dans le cas où la fiabilité réelle du système est sous-estimée, le plan de maintenance suggéré fera appel à des niveaux plus élevés de maintenance et plus coûteux. Dans le cas contraire, i.e. le cas où la fiabilité réelle du système est surestimée, le plan de maintenance suggéré peut entraîner un niveau inférieur de fiabilité à celui requis pour opérer la prochaine mission.

5 Le problème d'optimisation stochastique de la MS

Supposons que le système a terminé l'exécution de la mission courante et que les activités de maintenance peuvent être exécutées sur ses composants. En raison de la limitation du budget de maintenance et de la durée de l'arrêt, tous les composants ne peuvent pas être maintenus. Par conséquent, le problème de la MS doit être résolu. Ce problème consiste à sélectionner un sous-ensemble de composants, puis à déterminer le niveau de maintenance à effectuer sur ces composants sélectionnés. L'objectif pourrait être soit de maximiser la probabilité d'achèvement de la mission suivante, soit de minimiser le coût total induit par la maintenance, ou encore de minimiser le temps total requis par les activités de maintenance.

Pour le problème de la MS abordé dans le présent chapitre, nous minimisons le coût total de maintenance en tenant compte le niveau minimal requis en fiabilité pour opérer la prochaine mission de durée U , en plus de la durée limitée \mathcal{T}_0 de l'arrêt. Pour évaluer le coût total induit par les actions de maintenance et le temps total correspondant, sous les contraintes de ressources de maintenance, nous définissons la variable de décision suivante z_{ijl} :

$$z_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{si le composant } C_{ij} \text{ est sélectionné pour une maintenance de niveau } l, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (7.15)$$

Rappelons que, selon l'état du composant C_{ij} au début de la période de maintenance, si C_{ij} est en état de fonctionnement, seuls les niveaux de maintenance $l \geq 2$ sont éligibles. En d'autres termes, la réparation minimale ne peut être effectuée que sur des composants en panne. De plus, les composants en fonctionnement sont sujets à une maintenance préventive, tandis que les composants en pannes reçoivent une maintenance corrective. Par conséquent, le coût total de maintenance est calculé comme la somme du coût total induit par les actions de maintenance correctives et préventives. Le même calcul est appliqué au temps total de maintenance.

Soient PMC le coût total induit et PMT le temps total requis par les actions de maintenance préventive. De même, soient CMC le coût total induit et CMT le temps total requis par les actions de maintenance corrective. Ces quantités sont calculées dans ce qui suit.

5.1 Coût total en maintenance

Le coût total PMC induit par les actions de maintenance préventive est :

$$PMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=2}^{L_{ij}} MC_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl}, \quad (7.16)$$

où une action de maintenance préventive de niveau $l > 1$ est éligible sur le composant C_{ij} seulement si C_{ij} est en état de fonctionnement à la fin de la mission courante ($Y_{ij} = 1$). Le coût de maintenance MC_{ijl}^p est alors évalué selon les équations (7.3) et (7.7). Par analogie, le coût total CMC induit par les actions de maintenance corrective est évalué comme suit :

$$CMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} MC_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl}, \quad (7.17)$$

où $(1 - Y_{ij})$ indique qu'une action de maintenance corrective est disponible uniquement pour les composants en panne à la mission courante.

Des équations (7.16) et (7.17), il en résulte un coût total TMC de maintenance donné par la somme $TMC = PMC + CMC$:

$$TMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{l=2}^{L_{ij}} MC_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} MC_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl} \right). \quad (7.18)$$

5.2 Temps total en maintenance

De même que pour le calcul du coût total de maintenance, les temps totaux nécessaires pour effectuer les actions de maintenance préventive et corrective sont :

$$PMT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=2}^{L_{ij}} MT_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl}, \quad (7.19)$$

$$CMT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} MT_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl}, \quad (7.20)$$

où les temps de maintenance MT_{ijl}^p et MT_{ijl}^c sont évalués selon les équations (7.4) et (7.8). Par conséquent, le temps total passé en maintenance à la fin de la mission courante est donné par la somme par $TMT = PMT + CMT$:

$$TMT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{l=2}^{L_{ij}} MT_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} MT_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl} \right). \quad (7.21)$$

Par la suite, nous développons le modèle d'optimisation stochastique de la MS pour un système série-parallèle. L'objectif étant de déterminer un plan optimal de MS pour minimiser le coût total de maintenance sujet à deux contraintes principales : un niveau minimal \mathcal{R}_0 requis de fiabilité pour l'accomplissement de la mission suivante, et la durée \mathcal{T}_0 limitée de l'arrêt planifié.

Le problème d'optimisation de la MS est non linéaire et stochastique. Il est formulé comme suit :

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{l=2}^{L_{ij}} MC_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} MC_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl} \right) \quad (7.22)$$

Sujet à :

$$\prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} [1 - \mathcal{R}_{ij}^c(U | A_{ij})] \right) \geq \mathcal{R}_0, \quad (7.23)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{l=2}^{L_{ij}} MT_{ijl}^p \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} MT_{ijl}^c \cdot (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl} \right) \leq \mathcal{T}_0, \quad (7.24)$$

$$\sum_{l=1}^{L_{ij}} (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl} + \sum_{l=2}^{L_{ij}} Y_{ij} \cdot z_{ijl} \leq 1, \quad (7.25)$$

$$z_{ij1} \leq 1 - Y_{ij}, \quad (7.26)$$

$$X_{ij} = Y_{ij} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} (1 - Y_{ij}) \cdot z_{ijl}, \quad (7.27)$$

$$A_{ij} = [\Phi_{ijl} \cdot z_{ijl} + (1 - z_{ijl})] \cdot B_{ij}, \quad (7.28)$$

$$z_{ijl} \in \{0, 1\}; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, N_i; \quad l = 1, \dots, L_{ij}. \quad (7.29)$$

Dans le modèle d'optimisation ci-dessus, les équations (7.23) et (7.24) sont les contraintes, respectivement, du niveau minimal requis de fiabilité et du temps alloué à la maintenance. Pour chaque composant C_{ij} , l'équation (7.25) indique qu'un seul niveau de maintenance peut être sélectionné si le composant doit être maintenu. La contrainte (7.26) indique qu'une réparation minimale est éligible uniquement sur un composant en panne. La contrainte (8.35) permet de mettre à jour l'état (fonctionnement ou panne) des composants. La contrainte (7.28) est la contrainte la plus compliquée nécessitant un traitement spécifique. En effet, si le composant est maintenu, son âge effectif devient une variable stochastique. Ceci est la conséquence de la qualité stochastique des actions de maintenance.

6 Exemples numériques

6.1 Expérience 1 : cas d'un système avec un seul composant

Pour démontrer l'impact de la qualité stochastique des actions de maintenance sur les décisions de sélection du niveau de maintenance, nous nous concentrons d'abord sur un seul composant, soit C_{ij} , d'un système à plusieurs composants. Les durées de vie de ce composant sont supposées être distribuées selon une loi de Weibull avec des paramètres de forme et d'échelle fixés à $\beta_{ij} = 1.5$ et $\eta_{ij} = 15$, respectivement. Pour ce composant, une liste de quatre niveaux de maintenance possibles est disponible. Nous supposons que le coefficient de réduction d'âge de chaque niveau de maintenance est régi par une distribution Beta. Les paramètres de ces distributions sont donnés par la table (7.1). Les fonctions de densité de probabilité correspondantes au remplacement et à la réparation minimale du composant sont données dans les figures (7.1) et (7.2), alors que celles des actions de maintenance intermédiaires sont représentées sur la figure (7.4).

Nous supposons également que l'âge B_{ij} du composant C_{ij} à la fin de la mission actuelle est estimé à $B_{ij} = 15$, que la durée de la prochaine mission $U = 8.8$ et que le niveau minimum \mathcal{R}_0 requis pour que le système opère la mission suivante est $\mathcal{R}_0 = 45\%$. Dans ce qui suit, nous comparons et analysons les résultats du problème d'optimisation obtenu en utilisant les valeurs moyennes du coefficient de réduction d'âge et celles obtenues en considérant les distributions complètes de ces coefficients de réduction d'âge. Les valeurs de fiabilité du composant en fonction de chaque niveau de maintenance sont données dans la

Niveau l	$\mu_{\Phi_{ijl}}$	$\sigma_{\Phi_{ijl}}$
1	1	0.01
2	0.6	0.2
3	0.4	0.2
4	0	0.01

Table 7.1 – Moyenne & écart type des coefficients Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas de l'expérience 1.

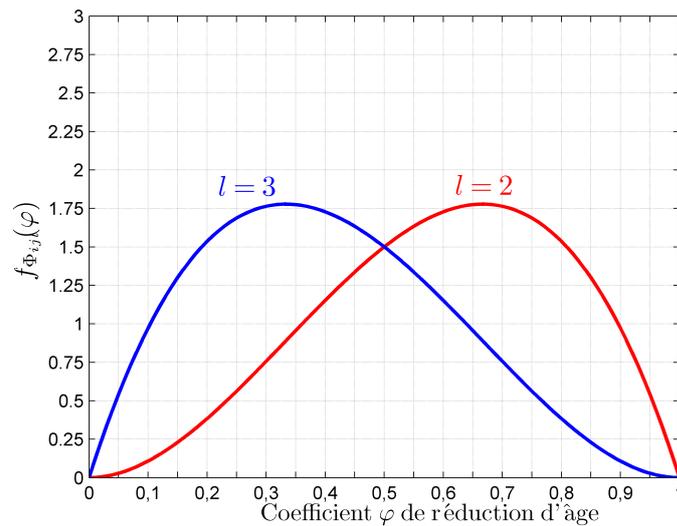


Figure 7.4 – Fonctions de densité des coefficients Φ_{ijl} intermédiaires de réduction d'âge : cas de l'expérience 1.

table (7.2) pour les coefficients moyens de réduction d'âge (cas déterministe) ainsi que pour les coefficients aléatoires de réduction d'âge (cas stochastique).

Niveau l	Fiabilité (%) (cas déterministe)	Fiabilité (%) (cas stochastique)
1	36.84	36.94
2	43.69	45.17
3	48.33	50.02
4	63.80	63.38

Table 7.2 – Fiabilité obtenue dans les cas déterministe et stochastique : cas de l'expérience 1.

Compte tenu du niveau minimum requis de fiabilité, le niveau de maintenance $l = 1$ n'est pas réalisable dans les cas aussi bien stochastique que déterministe. Si le modèle déterministe du coefficient de réduction d'âge est considéré, le niveau de maintenance $l = 2$ ne permet d'atteindre qu'une fiabilité de 43,69% qui est, notons-le, inférieur au niveau requis de fiabilité $\mathcal{R}_0 = 45\%$. Par conséquent, le choix se pose entre $l = 3$ et $l = 4$. Cependant, si on examine la valeur de la fiabilité résultante dans le cas stochastique, la valeur obtenue pour le niveau $l = 2$ est plutôt suffisante pour garantir le niveau minimum requis de fiabilité. De plus, son coût est moins élevé que ceux induits par les niveaux de maintenance $l = 3$ et $l = 4$. Ce modeste exemple démontre qu'il est plus efficace et plus réaliste de considérer l'aspect stochastique du coefficient de réduction d'âge lorsqu'il s'agit des problèmes d'optimisation de la maintenance, en général, et de la maintenance sélective en particulier.

6.2 Expérience 2 : cas d'un système multi-composant

Dans cette deuxième expérience, l'impact du coefficient stochastique de réduction d'âge sur les décisions en maintenance sélective est étudié pour un système série-parallèle (voir figure 7.5). Ce système est composé de $n = 2$ sous-systèmes en série, où le premier est lui-même composé de $N_1 = 2$ composants C_{11} et C_{12} en parallèle, tandis que le second contient $N_2 = 3$ composants C_{2j} ($j = 1, 2, 3$) disposés en parallèle. Les temps de défaillance d'un composant C_{ij} du système ont une distribution de Weibull dont les paramètres de forme et d'échelle sont respectivement donnés par β_{ij} et η_{ij} ($i = 1, 2$ et $j = 1, \dots, N_i$). Les valeurs de ces paramètres sont indiquées dans la table (7.3). Cette table donne aussi la valeur de B_{ij} ainsi que la valeur de la variable d'état Y_{ij} correspondantes, respectivement, à l'âge et à l'état (fonctionnement ou panne) du composant C_{ij} à la fin de la mission courante. Selon cette table, seuls les composants C_{11} et C_{21} ont survécu à la mission courante ($Y_{11} = Y_{21} = 1$) alors que les autres composants sont en état de panne.

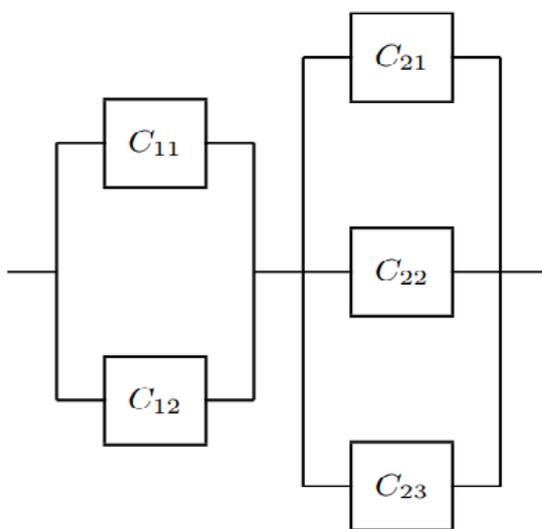


Figure 7.5 – Système série-parallèle de l'expérience 2.

C_{ij}	β_{ij}	η_{ij}	B_{ij}	Y_{ij}
C_{11}	1.5	22.5	10	1
C_{12}	1.8	30	15	0
C_{21}	3	22.5	10	1
C_{22}	2.8	30	15	0
C_{23}	2.5	30	10	0

Table 7.3 – Paramètres des composants du système de l'expérience 2.

Dans cette expérience, on considère qu'une même liste de 4 niveaux possibles de maintenance est disponible pour tous les composants du système. Rappelons que les niveaux de maintenance $l = 1$ et $l = 4$ représentent les réparations minimales et les actions de remplacement, respectivement. Dans cette expérience, nous supposons que le coefficient Φ_{ijl} stochastique de réduction d'âge de chaque niveau de maintenance est régi par une distribution Beta. La valeur moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge associé au niveau de maintenance l ($l = 1, \dots, 4$) sont données par la table (7.4). L'écart-type $\sigma_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge associé au niveau de maintenance l ($l = 1, \dots, 4$) sont données par la table (7.5). Les paramètres de forme de la loi Beta régissant le coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge peuvent être déduits de l'équation (7.6).

C_{ij}	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$
C_{11}	1	0.75	0.30	0
C_{12}	1	0.65	0.55	0
C_{21}	1	0.65	0.25	0
C_{22}	1	0.60	0.35	0
C_{23}	1	0.65	0.25	0

Table 7.4 – valeur moyenne $\mu_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas du système de l'expérience 2.

C_{ij}	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$
C_{11}	0.01	0.18	0.18	0.01
C_{12}	0.01	0.18	0.18	0.01
C_{21}	0.01	0.18	0.18	0.01
C_{22}	0.01	0.18	0.18	0.01
C_{23}	0.01	0.18	0.18	0.01

Table 7.5 – Ecart type $\sigma_{\Phi_{ijl}}$ du coefficient Φ_{ijl} de réduction d'âge : cas du système de l'expérience 2.

La table (7.6) montre le temps MRT_{ij} et le coût MRC_{ij} d'une réparation minimale ainsi que les temps RT_{ij}^p , RT_{ij}^c , et les coûts RC_{ij}^p et RC_{ij}^c de remplacements préventif et correctif, respectivement. Les temps et les coûts correspondants aux niveaux intermédiaires de maintenance sont obtenus via les équations (7.7), (7.8) et (7.9).

C_{ij}	MRT_{ij}	MRC_{ij}	RT_{ij}^p	RC_{ij}^p	RT_{ij}^c	RC_{ij}^c
C_{11}	3	6	1	12	5	14
C_{12}	3	5	1	12	5	14
C_{21}	2	5	2	14	4	16
C_{22}	2	6	2	15	4	17
C_{23}	3	6	1	12	5	14

Table 7.6 – Valeurs des temps et des coûts correspondants aux réparation minimales et aux remplacement préventif et correctif des composants : cas de l'expérience 2.

Pour l'analyse ci-dessous, nous supposons que la durée U de la mission suivante est estimée à $U = 14$ et que le temps \mathcal{T}_0 alloué à l'arrêt planifié est évalué à $\mathcal{T}_0 = 4$. Le niveau minimum requis \mathcal{R}_0 de la fiabilité du système pour exécuter la prochaine mission est fixé à $\mathcal{R}_0 = 72\%$. Si aucune maintenance n'est effectuée sur les composants du système, la probabilité que le système réussisse la prochaine mission est évaluée à $\mathcal{R}^c(U|_{A_{11}, \dots, A_{23}}) = 14.5\%$. Cette valeur de fiabilité est en effet inférieure à celle requise pour l'exécution de la mission. Pour améliorer cette fiabilité, le problème de maintenance sélective est donc résolu.

En tenant compte des contraintes liées au niveau minimum requis de fiabilité \mathcal{R}_0 et au temps limité \mathcal{T}_0 de l'arrêt, le problème d'optimisation de la maintenance sélective n'a pas de solution dans le cas où les coefficients de réduction d'âge sont considérés déterministe. Dans ce cas, il n'y a pas de plan de maintenance sélective capable d'améliorer la fiabilité du système pour atteindre le niveau minimum requis pour la prochaine mission. Cependant, si ce même problème de maintenance sélective est résolu en considérant des coefficients stochastiques de réduction d'âge, alors une solution optimale est possible. En effet, la solution optimale obtenue suggère un plan de maintenance sélective selon lequel seuls les composants C_{12} , C_{22} et C_{23} sont sélectionnés pour une maintenance de niveau $l = 2$. La fiabilité résultante du système est évaluée à $\mathcal{R}^c(U|_{A_{11}, \dots, A_{23}}) = 72.02\%$. Le coût total induit par ce plan de maintenance sélective est de $TMC = 13.43$ et le temps total en maintenance correspondant est $TMT = 3.92$. Ce

résultat, conforte la conclusion de la première expérience.

7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé notre contribution quant au problème d'optimisation de la maintenance sélective pour un système multi-composant. Notre contribution consiste à tenir compte explicitement des incertitudes liées aux actions de maintenance. Le système effectue plusieurs missions séparées par des arrêts programmés au cours desquelles la maintenance des composants peut avoir lieu. Un composant peut recevoir différents niveaux de maintenance dont chacun est caractérisé par un degré d'amélioration de la fiabilité. L'effet de la qualité aléatoire de chaque niveau de maintenance est une variable aléatoire régie par une distribution de probabilité appropriée. Ces distributions sont utilisées pour évaluer avec précision la fiabilité résultante du système. Ces informations sont intégrées dans le problème de maintenance sélective résultant en un modèle d'optimisation stochastique qui, une fois résolu, fournit une solution plus efficace en termes de coût et plus précise quant à l'estimation de la fiabilité du système.

Chapitre 8

Maintenance conditionnelle sélective des systèmes multi-composant

1 Introduction

Les modèles actuels de maintenance sélective sont basés sur les distributions d'âge des composants. Dans ce cas, le taux de pannes est utilisé comme modèle de représentation du processus de vieillissement. L'inconvénient principal d'une telle approche réside dans le fait qu'elle ne permet d'évaluer que les deux états d'un composant : en fonctionnement ou en panne [154]. Cependant, de nombreux composants subissent des dommages et se détériorent avec l'âge et l'usage, en particulier dans le cas des infrastructures de génie civil, et des systèmes hydrauliques et mécaniques [155]. Partant de ce constat, nous proposons une nouvelle approche de modélisation et d'optimisation de la maintenance sélective pour des systèmes où les processus de dégradation des composants sont explicitement pris en compte. Cette nouvelle approche fait référence à celles dédiées à la maintenance conditionnelle (*Condition-Based Maintenance* : CBM)

S'agissant des modèles de dégradation stochastique utilisés dans la CBM des systèmes multi-composants, Marseguerra et al. [156] ont proposé une approche d'optimisation de maintenance multi-objectif combinant la simulation de Monte Carlo et les algorithmes génétiques pour déterminer les niveaux de dégradation optimaux au-dessus desquels les composants du système doivent être maintenus. Comme fonctions objectives, les auteurs ont considéré la disponibilité moyenne du système et le bénéfice net généré au cours d'une mission. Castanier et al. [157] ont considéré un système de deux composants en série. En utilisant une inspection non périodique combinée avec le renouvellement correctif et préventif des composants, un modèle d'optimisation de la maintenance est proposé pour calculer les temps optimaux d'inspection et de renouvellement minimisant les coûts d'inspection et de maintenance à long terme (i.e., sur un horizon infini). D'autres approches, telles que celles développées dans [158, 159], traitent des problèmes d'optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes multi-composants avec des dépendances économiques, structurelles et stochastiques.

Dans le contexte de la CBM, quelques travaux de recherche dans la littérature intègrent explicitement la maintenance imparfaite. Wang et Pham [160] ont proposé un modèle dans lequel les intervalles de temps de maintenance préventive sont modélisés par un processus de quasi-renouvellement. Un facteur d'amélioration est utilisé pour augmenter le seuil de défaillance critique. Dans [161, 162], un coefficient de réduction de dégradation, selon lequel une maintenance imparfaite réduit la dégradation par un facteur aléatoire, est utilisé. Récemment, Zhang et al. [163], ont proposé un modèle de facteur d'amélioration aléatoire pour réduire le taux de dégradation plutôt que le niveau de dégradation.

La majorité des approches en CBM existantes ont adopté un modèle de coût asymptotique pour optimiser les politiques de maintenance, et ce sans tenir compte des contraintes de ressources en maintenance. De plus, comme ces modèles d'optimisation des coûts asymptotiques supposent un horizon temporel infini, ils ne sont pas valables pour des systèmes exploités selon un horizon fini [164]. Le modèle

de coût asymptotique est également inapproprié pour la catégorie de systèmes considérée dans le présent travail, et ce du fait qu'ils sont conçus pour opérer plusieurs missions en alternance avec des arrêts programmés de durées finies.

Dans [164], les auteurs ont calculé la distribution de probabilité du coût de maintenance dans un horizon de temps fini. Cependant, leur approche repose sur un système réduit à une seule entité (composant critique). Liu et al. [165] ont développé une politique de maintenance préventive dynamique pour un système à plusieurs composants. Dans [165], lorsque la fiabilité du système tombe à un seuil spécifique, les composants à maintenir sont ensuite choisis en fonction d'une mesure d'importance. Le système est supposé fonctionner en continu et les temps requis pour effectuer la maintenance ne sont pas pris en compte. La formulation du problème résultant est un modèle d'optimisation sans contrainte et ignore les limitations des ressources en maintenance.

Le présent travail propose une extension au problème de la maintenance sélective classique. Notre approche permet de résoudre le problème de la maintenance sélective en utilisant les règles et concepts définis dans le cadre de la CBM. Chaque composant du système est alors supposée se dégrader selon un processus stochastique tel que les processus de Markov, Wiener, gamma et des processus de Gauss inversés [166, 155, 163]. Sans perte de généralité, les composants sont supposés se dégrader selon un processus gamma. Un tel processus de dégradation convient pour caractériser les dommages progressifs accumulés de façon monotone au fil du temps [167, 155]. De plus, son principal avantage est que le développement mathématique requis est assez simple et que son interprétation physique est facile à comprendre. Pour cette raison, il a été largement utilisé dans des problèmes d'optimisation de la CBM (voir par exemple [168, 169, 170] et les travaux plus récents [171, 172]). van Noortwijk a présenté une excellente revue de littérature de l'application du processus gamma dans la CBM [155]. D'autres discussions et développements mathématiques du processus gamma sont présentés dans [173, 174].

Dans le présent chapitre, nous adoptons l'approche de modélisation déterministe du modèle de maintenance imparfaite utilisé dans [172] et l'étendons aux systèmes multi-composants alternant des missions et des arrêts planifiés. Pour améliorer les performances (fiabilité) du système à opérer sa prochaine mission, les activités de maintenance sont effectuées sur les composants du système pendant la durée de l'arrêt. Rappelons qu'en raison des durées limitées des arrêts ainsi que des ressources en maintenance, tous les composants ne sont pas susceptibles d'être entretenus. Le but de ce chapitre est d'exposer un nouveau modèle de maintenance sélective où les dégradations phénoménologiques des composants du système sont explicitement prises en considération. Le modèle de maintenance sélective qui en résulte est appelé problème de maintenance conditionnelle sélective (CBSMP). Une nouvelle formulation intégrant la dégradation stochastique, l'inspection périodique et la maintenance imparfaite dans un seul modèle d'optimisation CBSMP non linéaire est proposée. Les constructions fondamentales et les paramètres de ce problème d'optimisation non-linéaire sont développés pour un système série-parallèle. L'objectif est de minimiser le coût total moyen qui est la somme des coûts totaux de maintenance, d'inspection et de pénalité sous les contraintes à la fois de la durée limitée de l'arrêt et à la fiabilité minimale requise pour opérer la prochaine mission.

Le travail exposé dans ce chapitre repose sur les hypothèses suivantes :

1. Le système consiste en plusieurs composants binaires réparables.
2. Les composants du système sont stochastiquement indépendants (s -independent).
3. Pendant l'arrêt, les composants du système ne vieillissent et ne s'usent pas, c'est-à-dire que les composants ne vieillissent et ne s'usent que lorsqu'ils sont en fonctionnement.
4. Un composant du système tombe en panne lorsque son niveau de dégradation atteint un seuil donné.
5. Les seuils de dégradation des composants du système sont connus.
6. Aucune activité de maintenance n'est autorisée pendant la mission, c'est-à-dire que les activités de maintenance ne sont autorisées que pendant l'arrêt.
7. Les activités d'inspection sont effectuées périodiquement pendant la mission.
8. Les inspections sont parfaites, sans erreur et révèlent la dégradation exacte des composants.

9. La défaillance d'un composant n'est connue qu'après inspection, c'est-à-dire que les pannes ne sont pas auto-déclarées.
10. Chaque composant contribue à la performance du système. Un composant défaillant induit un coût de pénalité proportionnel à la durée de son indisponibilité.
11. Après remplacement, un composant devient "comme neuf".
12. Un seul réparateur ou canal de réparation est disponible.

Selon l'hypothèse (3), un composant est supposé se dégrader uniquement lorsqu'il opère une mission. L'état de santé du composant se détériore progressivement jusqu'à atteindre un seuil prédéfini auquel le composant est déclaré défaillant. Par conséquent, le processus de vieillissement est basé sur l'exploitation du composant et reflète ainsi le temps cumulé pendant lequel le composant a été utilisé. L'instant initial (0) à partir duquel le processus de vieillissement commence correspond à l'instant où le composant est mis en service et le composant est soit neuf, soit vient d'être remplacé par un composant identique "comme neuf". Cette hypothèse est valable dans de nombreuses situations pratiques. Par exemple, chaque fois qu'un disjoncteur interrompt un courant électrique, un arc est produit entre ses contacts. Ainsi, le disjoncteur se dégrade avec le temps de fonctionnement plutôt qu'avec le temps calendaire. La dégradation correspondante s'accumule jusqu'à atteindre un seuil de défaillance où le disjoncteur est incapable de remplir sa fonction. Un deuxième exemple peut également être une plaquette de frein qui vieillit chaque fois que le système de freinage est actionné. Un pneu est également un composant typique dont le processus de vieillissement est principalement fonction du nombre de kilomètres parcourus.

Bien que les seuils de dégradation des composants puissent être traités comme des variables de décision, ils sont considérés dans le présent travail (voir l'hypothèse 5) comme des données d'entrée au problème d'optimisation. Leurs valeurs sont généralement spécifiées par des standards et des normes de sécurité spécifiques [175, 176, 177, 178].

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La Section 2 décrit les principales caractéristiques du système étudié. Dans cette section, le modèle de dégradation des composants est décrit et sa fiabilité conditionnelle correspondante est calculée. Le modèle de maintenance imparfaite est décrit dans la Section 3 avec les structures des temps et des coûts des actions de maintenance. Dans la Section 4, notre formulation mathématique est proposée pour le CBSMP considéré. Pour illustrer l'approche proposée, des expériences numériques sont discutées à la Section 5. Les conclusions sont exposées à la Section 6.

2 Description du système

Le modèle d'optimisation de la maintenance conditionnelle sélective (CBSM) est général dans le sens où il peut s'adapter à différents diagrammes blocs de fiabilité. À des fins d'illustration, la CBSM est appliqué à un système série-parallèle composé de n sous-systèmes disposés en série, dont chacun est composé de N_i composants P_{ij} ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, N_i$). Nous supposons que le système vient juste d'achever la mission courante et entame un arrêt planifié d'une durée fixe \mathcal{T}_0 au cours duquel des activités de maintenance peuvent être effectuées. Par la suite, le système sera remis en service pour exécuter la prochaine mission de durée connue U avec un niveau de fiabilité \mathcal{R}_0 requis prédéterminé. À la fin de la mission en cours (c'est-à-dire au début de l'arrêt planifié), deux variables d'état binaires X_{ij} et Y_{ij} sont utilisées pour identifier l'état du composant P_{ij} :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } P_{ij} \text{ fonctionne au début de l'arrêt} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8.1)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } P_{ij} \text{ fonctionne à la fin de l'arrêt} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8.2)$$

2.1 Modèle de dégradation du composant

La dégradation du composant P_{ij} est gouvernée par un processus stochastique gamma stationnaire $\{W_{ij}(t) : t \geq 0\}$ tel que :

1. $W_{ij}(0) = 0$.
2. $W_{ij}(t)$ admet des incréments indépendants,
3. Pour $0 \leq s < t$, la variable aléatoire $\Delta W_{ij}(s, t) = W_{ij}(t) - W_{ij}(s)$ suit une loi gamma de densité de probabilité $f_{ij}(s, t, x)$ et de distribution $F_{ij}(s, t, x)$ définies pour $x \geq 0$ telles que :

$$f_{ij}(s, t, x) = \frac{x^{(t-s)\alpha_{ij}-1}}{\Gamma((t-s)\alpha_{ij}) \eta_{ij}^{(t-s)\alpha_{ij}}} \exp\left(\frac{-x}{\eta_{ij}}\right), \quad (8.3)$$

$$F_{ij}(s, t, x) = \Pr(\Delta W_{ij}(s, t) < x) \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^x f_{ij}(s, t, y) dy, \\ &= \frac{\Gamma\left((t-s)\alpha_{ij}, \left(\frac{x}{\eta_{ij}}\right)\right)}{\Gamma((t-s)\alpha_{ij})}. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Dans les équations ci-dessus, $(t-s)\alpha_{ij}$ et η_{ij} sont respectivement la fonction de forme et le paramètre d'échelle. La fonction $\Gamma(x)$ est la fonction gamma calculée comme $\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u} du$, et $\Gamma(a, b) = \int_b^\infty u^{a-1} e^{-u} du$ est la fonction gamma incomplète définie pour $a > 0$ et $b \geq 0$. De l'instant 0 jusqu'à l'instant t , la dégradation moyenne $\mathbb{E}[W_{ij}(t)]$ et la variance $\mathbb{V}ar[W_{ij}(t)]$ du processus gamma sont respectivement données par $\mathbb{E}[W_{ij}(t)] = \eta_{ij}\alpha_{ij}t$ et $\mathbb{V}ar[W_{ij}(t)] = \eta_{ij}^2\alpha_{ij}t$.

Le composant P_{ij} est défaillant lorsque son niveau de dégradation atteint la valeur seuil H_{ij} . Soit a_{ij} l'âge du composant P_{ij} à la fin de la mission en cours. Nous rappelons ici que l'âge effectif du composant est défini comme le temps de fonctionnement cumulé à partir du moment où il était "aussi bon que neuf". Supposons qu'à la fin de la mission courante, le niveau de dégradation du composant P_{ij} est $W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}$. Par conséquent, la variable X_{ij} de l'équation (8.1) peut être définie comme suit :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } W_{ij}(a_{ij}) < H_{ij}; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8.6)$$

2.2 Fiabilité d'un composant à opérer la prochaine mission

Les durées de vie du composant P_{ij} sont représentées par la variable aléatoire T_{ij} qui représente le temps du premier passage (*First Passage Time*) du seuil de dégradation H_{ij} :

$$T_{ij} = \inf \{t : W_{ij}(t + a_{ij}) \geq H_{ij} \mid W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}\} \quad (8.7)$$

La fonction de distribution de T_{ij} est $G_{ij}(t) = \Pr(T_{ij} \leq t \mid W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij})$. Elle est calculée comme suit :

$$\begin{aligned} G_{ij}(t) &= \Pr(W_{ij}(t + a_{ij}) > H_{ij} \mid W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}) \\ &= 1 - F_{ij}(0, t, H_{ij} - d_{ij}) \\ &= \bar{F}_{ij}(0, t, H_{ij} - d_{ij}). \end{aligned} \quad (8.8)$$

La fonction de densité de probabilité $g_{ij}(t) = \frac{\partial G_{ij}(t)}{\partial t}$ correspondant aux durée de vie T_{ij} du composant P_{ij} est :

$$g_{ij}(t) = \frac{\alpha_{ij}}{\Gamma(\alpha_{ij}t)} \int_{\frac{H_{ij}-d_{ij}}{\eta_{ij}}}^\infty [\ln(u) - \Psi(\alpha_{ij}t)] u^{\alpha_{ij}t-1} \exp(-u) du, \quad (8.9)$$

où $\Psi(u) = \frac{d \ln(\Gamma(u))}{du}$ est la fonction Digamma.

Si, à la fin de la mission courante, le composant P_{ij} fonctionne encore ($X_{ij} = 1$), alors la probabilité que le composant P_{ij} survive la prochaine mission de durée U , étant donné que sa dégradation actuelle est mesurée à d_{ij} , est calculée par la fiabilité conditionnelle $\mathcal{R}_{ij}^c(U \mid d_{ij})$ comme suit :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{R}_{ij}^c(U | d_{ij}) &= \Pr(W_{ij}(a_{ij} + U) < H_{ij} | W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}) \\
 &= \Pr(W_{ij}(a_{ij} + U) - W_{ij}(a_{ij}) < H_{ij} - d_{ij}) \\
 &= \Pr(\Delta W_{ij}(a_{ij}, a_{ij} + U) < H_{ij} - d_{ij}) \\
 &= \int_0^{H_{ij} - d_{ij}} f_{ij}(0, U, x) dx,
 \end{aligned} \tag{8.10}$$

où $f_{ij}(0, U, x)$ est obtenu de l'équation (8.3).

En exploitant l'équation (8.5), l'équation (8.10) s'écrit telle que :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{R}_{ij}^c(U | d_{ij}) &= F_{ij}(0, U, H_{ij} - d_{ij}) \\
 &= \frac{\Gamma\left(\alpha_{ij}U, \left(\frac{H_{ij} - d_{ij}}{\eta_{ij}}\right)\right)}{\Gamma(\alpha_{ij}U)}.
 \end{aligned} \tag{8.11}$$

3 Niveaux de maintenance des composants : structures des durées et des coûts

Chaque composant P_{ij} peut subir une action de maintenance de niveau l choisi parmi une liste de $L_{ij} + 1$ niveaux de maintenance potentiels (options) $l, l \in \{0, \dots, L_{ij}\}$. A chaque option de maintenance l correspond un coefficient de réduction de dégradation φ_{ijl} défini tel que $0 \leq \varphi_{ijl} \leq 1$. Ces niveaux de maintenance imparfaite sont utilisés à la fois pour la maintenance préventive (MP) et les actions de maintenance corrective (CM). Cependant, et comme il a été préalablement mentionné au chapitre précédent, une action de maintenance imparfaite peut être réalisée sur un composant défaillant si et seulement si elle est capable de réduire la dégradation du composant à un niveau strictement inférieur au seuil de dégradation qui lui est associé.

Si, à la fin de la mission courante, le niveau de dégradation $W_{ij}(a_{ij})$ du composant P_{ij} est mesuré à $W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}$ supérieur au seuil de défaillance H_{ij} , alors une maintenance corrective (CM) de niveau l ($l = 1, \dots, L_{ij}$) peut être exécutée sur le composant P_{ij} . Par contre, si le niveau de dégradation d_{ij} est inférieur au seuil de défaillance H_{ij} , alors une maintenance préventive (MP) de niveau l peut alors être sélectionnée pour être exécuté sur le composant P_{ij} . Juste après l'exécution d'une action de maintenance de niveau l , le niveau de dégradation du composant devient alors $\varphi_{ijl}d_{ij}$.

Pour le niveau de maintenance le plus élevé $l = L_{ij}$, le coefficient de réduction de dégradation est $\varphi_{ijL_{ij}} = 0$. Ainsi, pour $l = L_{ij}$, la dégradation d'un composant est remise à zéro, ce qui signifie que le composant est remplacé par un composant neuf ou il a été restauré dans une condition *comme neuve*. Si le niveau de maintenance le plus bas $l = 0$ est sélectionné, aucune maintenance n'est effectuée et la décision de maintenance est alors reportée à un arrêt ultérieur. Les autres valeurs de l entre ces deux extrêmes, à savoir $0 < l < L_{ij}$, représentent des niveaux intermédiaires de maintenance imparfaite. Il est raisonnable de supposer qu'une MC est plus coûteuse et prend plus de temps qu'une MP, comme cela est communément adopté dans la littérature. Dans le présent travail, les coûts et les durées de maintenance pour le composant P_{ij} sont modélisés en fonction du niveau de l'action de maintenance effectuée, du niveau de dégradation du composant et du type de maintenance (MP ou MC).

Soient C_{ij}^p et T_{ij}^p , respectivement, le coût et la durée du niveau le plus élevé disponible d'une MP. Conformément à l'approche utilisée dans [40], les coûts PMC_{ijl} et les durées PMT_{ijl} d'une MP de niveau l sont définis par :

$$PMC_{ijl} = C_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p}, \tag{8.12}$$

$$PMT_{ijl} = T_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p}. \tag{8.13}$$

De même, si nous notons par C_{ij}^c et T_{ij}^c , respectivement, le coût et la durée du niveau le plus élevé disponible d'une MC, les coûts CMC_{ijl} et les durées CMT_{ijl} d'une MC de niveau l sont définis par :

$$CMC_{ijl} = C_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c}, \quad (8.14)$$

$$CMT_{ijl} = T_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c}. \quad (8.15)$$

Les paramètres réels positifs ξ_{ij}^p et ξ_{ij}^c caractérisent la relation entre le coût (le temps) induit par une action de maintenance imparfaite et la réduction de dégradation correspondante [150, 38, 40]. Ces paramètres peuvent être interprétés comme des caractéristiques liées au processus de dégradation du composant et peuvent être estimés à partir de l'historique des temps de défaillance et de réparation.

4 Modélisation mathématique du problème de la CBSM

Nous considérons un système qui vient d'achever une mission et mis ensuite à disposition pour subir des actions de maintenance pendant la durée de l'arrêt planifié. Rappelons qu'en raison des ressources de maintenance limitées, à savoir la durée de l'arrêt et le budget de maintenance, tous les composants ne peuvent pas être maintenus. Le but est alors de sélectionner un sous-ensemble des composants à maintenir et de déterminer les niveaux de maintenance à effectuer sur ces composants. L'objectif de la CBSMP pourrait être de maximiser la fiabilité de la prochaine mission, minimiser le coût total de maintenance ou minimiser la durée totale de maintenance. Dans ce chapitre, l'objectif est de minimiser le coût total moyen induit par les coûts d'inspection et de maintenance, en plus du coût de pénalité induit par les défaillances des composants au cours de la mission suivante.

Pour ce faire, nous introduisons d'abord une variable de décision et calculons la dégradation et la fiabilité d'un composant du système lorsqu'il est soumis à la CBSM. Cette variable de décision est notée z_{ijl} et identifie le niveau l de maintenance effectuée sur un composant P_{ij} donné du système :

$$z_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{Si une maintenance de niveau } l \geq 1 \text{ est réalisée sur } P_{ij} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8.16)$$

À la fin de la mission courante, considérons un composant P_{ij} ayant un âge effectif a_{ij} et un niveau de dégradation correspondante $W_{ij}(a_{ij}) = d_{ij}$. Si le composant reçoit une maintenance de niveau l (i.e., $z_{ijl} = 1$) avec un coefficient de réduction de dégradation φ_{ijl} , alors la dégradation du composant P_{ij} évolue selon un processus gamma $\{W_{ij}(t) : t \geq 0\}$ avec un niveau de dégradation initiale mis à jour $d_{ijl} = \varphi_{ijl} \cdot z_{ijl} \cdot d_{ij}$. Cependant, si le composant n'est pas maintenu, alors son niveau de dégradation reste inchangé ($d_{ijl} = d_{ij}$). Ces deux cas peuvent être combinés tels que :

$$d_{ijl} = [\varphi_{ijl} \cdot z_{ijl} + (1 - z_{ijl})] d_{ij}. \quad (8.17)$$

La probabilité $\mathcal{R}_{ij}^c(U | d_{ijl})$ que le composant P_{ij} survive la prochaine mission sachant qu'il a été sujet à une maintenance de niveau l est obtenue en combinant les équations (8.11) et (8.17) :

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{ij}^c(U | d_{ijl}) &= F_{ij}(0, U, H_{ij} - d_{ijl}) \cdot Y_{ij} \\ &= \frac{\Gamma\left(\alpha_{ij} U, \left(\frac{H_{ij} - d_{ijl}}{\eta_{ij}}\right)\right)}{\Gamma(\alpha_{ij} U)} \cdot Y_{ij} \end{aligned} \quad (8.18)$$

La fiabilité conditionnelle résultante de tout le système série-parallèle pour opérer la prochaine mission est donnée par :

$$\mathcal{R}^c = \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} \left(1 - \sum_{l=0}^{L_{ij}} \mathcal{R}_{ij}^c(U | d_{ijl}) \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} \right) \right). \quad (8.19)$$

4.1 Coût total et temps requis en maintenance pendant la durée de l'arrêt

Les coûts totaux PMC et CMC induits, respectivement, par les actions de maintenance préventive et corrective sont calculés par :

$$PMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} C_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl} \quad (8.20)$$

$$CMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} C_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \quad (8.21)$$

Des équations (8.20) et (8.21), il en résulte un coût total TMC de maintenance donné par la somme $TMC = PMC + CMC$:

$$TMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} \left(C_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl} + C_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \right). \quad (8.22)$$

De manière similaire, les temps totaux PMT et CMT requis, respectivement, pour réaliser les actions de maintenance préventive et corrective sont donnés tels que :

$$PMT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} T_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl}, \quad (8.23)$$

$$CMT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} T_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \quad (8.24)$$

Le temps total TMT requis pour réaliser toutes les actions de maintenance est la somme $TMT = PMT + CMT$ telle que :

$$TMC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} \left(T_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl} + T_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \right) \quad (8.25)$$

4.2 Coût total moyen d'inspection durant la prochaine mission

Au cours de la mission suivante, des inspections sont effectuées périodiquement aux instants $\tau, 2\tau, \dots, K\tau$ où $K = \frac{U}{\tau}$ et τ est une variable de décision. Le coût d'inspection unitaire d'un composant P_{ij} est noté I_{ij} . Si une inspection révèle qu'un composant est défaillant (c'est-à-dire que sa dégradation est au-delà du seuil critique H_{ij}), il reste tel quel jusqu'au prochaine arrêt planifié où des décisions de maintenance sélective seront prises. Cependant, le coût de pénalité induit par sa défaillance est comptabilisé. Il convient de noter ici que le processus d'inspection d'un composant est suspendu dès-lors qu'une inspection révèle que le composant est défaillant. Le coût d'inspection total moyen TIC_{ij} induit par ce composant lors de la prochaine mission est donné par la proposition suivante.

Proposition 8.1. *Le coût total moyen d'inspection TIC_{ij} induit par le composant P_{ij} est donné par :*

$$TIC_{ij} = \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K k I_{ij} \int_0^{H_{ij} - d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx, \quad (8.26)$$

où $\bar{F}_{ij}(0, t, x) = 1 - F_{ij}(0, t, x)$.

Le coût total moyen d'inspection TIC induit par tous les composants qui fonctionnent au début de la mission suivante est alors calculé comme suit :

$$TIC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} TIC_{ij} \cdot Y_{ij}, \quad (8.27)$$

où TIC_{ij} et Y_{ij} sont, respectivement, donnés par les équation (8.26) et (8.2).

4.3 Coût total moyen de pénalité

Dans ce travail de recherche, nous avons supposé que chaque composant contribue à la performance globale du système pour opérer une mission. Par conséquent, Un composant défaillant entraîne un coût de pénalité proportionnel à la durée de son indisponibilité. Ce coût de pénalité peut représenter des pertes de productivité, des impacts sur l'environnement ou encore des besoins énergétiques accrus résultants de sa défaillance.

Dans ce qui suit, le coût moyen de pénalité PC_{ij} dû à l'indisponibilité d'un composant, soit P_{ij} , est d'abord calculé. Si le composant P_{ij} est dans un état de panne au début de la mission suivante (c'est-à-dire qu'il n'a pas été réparé pendant l'arrêt planifié et donc $X_{ij} = Y_{ij} = 0$), alors le coût de pénalité qui en résulte est simplement calculé comme :

$$PC_{ij} = \Pi_{ij} \cdot U \quad (8.28)$$

où Π_{ij} est le coût de pénalité par unité de temps correspondant au composant P_{ij} . Cependant, si P_{ij} fonctionne au début de la prochaine mission, le coût total moyen de pénalité est calculé selon la proposition suivante.

Proposition 8.2. *Le coût total moyen PC_{ij} induit par un composant opérationnel P_{ij} au cours de la mission suivante est :*

$$PC_{ij} = \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K \Pi_{ij} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (U-t)g_{ijl}(t)dt \right) \times \left(\int_0^{H_{ij}-d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx \right), \quad (8.29)$$

où $g_{ijl}(t)$ est la fonction de densité conditionnelle donnée par l'équation (8.9), et d_{ijl} est le niveau de dégradation donné par l'équation (8.17).

Le coût total moyen de pénalité TPC encouru pour tous les composants du système est alors calculé à partir des equations 8.28 et 8.29 tel que :

$$TPC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \Pi_{ij} \left(U(1 - Y_{ij}) + Y_{ij} \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (U-t)g_{ijl}(t)dt \right) \times \left(\int_0^{H_{ij}-d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx \right) \right).$$

Par conséquent, la fonction coût TEC à minimiser est donnée par la somme $TEC = TMC + TIC + TPC$ telle que :

$$TEC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left[\sum_{l=1}^{L_{ij}} \left(C_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl} + C_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \right) + \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K k I_{ij} Y_{ij} \int_0^{H_{ij}-d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx + \Pi_{ij} (1 - Y_{ij}) U + \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K \Pi_{ij} Y_{ij} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (U-t)g_{ijl}(t)dt \right) \left(\int_0^{H_{ij}-d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx \right) \right] \quad (8.30)$$

4.4 Modèle d'optimisation CBSMP

Le modèle d'optimisation non-linéaire ayant pour objectif de déterminer les décisions CBSM optimales en minimisant le coût total moyen TEC est formulé comme suit :

Minimiser

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \left[\sum_{l=1}^{L_{ij}} \left(C_{ij}^p (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^p} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl} + C_{ij}^c (1 - \varphi_{ijl})^{\xi_{ij}^c} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} \right) + \right. \\
 & \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K k I_{ij} Y_{ij} \int_0^{H_{ij} - d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx + \Pi_{ij} (1 - Y_{ij}) U + \\
 & \left. \sum_{l=0}^{L_{ij}} \sum_{k=1}^K \Pi_{ij} Y_{ij} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (U - t) g_{ijl}(t) dt \right) \left(\int_0^{H_{ij} - d_{ijl}} f_{ij}(0, (k-1)\tau, x) \bar{F}_{ij}(0, \tau, H_{ij} - d_{ijl} - x) dx \right) \right] \quad (8.31)
 \end{aligned}$$

Sujet à :

$$\prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} \left(1 - \sum_{l=0}^{L_{ij}} \mathcal{R}_{ij}^c (U |_{d_{ijl}}) \cdot Y_{ij} \cdot z_{ijl} \right) \right) \geq \mathcal{R}_0, \quad (8.32)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{L_{ij}} (CMT_{ijl} \cdot (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl} + PMT_{ijl} \cdot X_{ij} \cdot z_{ijl}) \leq \mathcal{T}_0, \quad (8.33)$$

$$\sum_{l=1}^{L_{ij}} z_{ijl} \leq 1, \quad \forall i, j \quad (8.34)$$

$$Y_{ij} = X_{ij} + \sum_{l=1}^{L_{ij}} (1 - X_{ij}) \cdot z_{ijl}, \quad \forall i, j \quad (8.35)$$

$$d_{ijl} = [\varphi_{ijl} \cdot z_{ijl} + (1 - z_{ijl})] \cdot d_{ij}, \quad \forall i, j \quad (8.36)$$

$$z_{ijl} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, N_i\}, \forall l \in \{1, \dots, L_{ij}\}.$$

Dans le modèle d'optimisation ci-dessus, la fonction objectif (8.31) est la somme des coûts moyens de maintenance, d'inspection et de pénalité. La contraintes (8.32) relève du niveau minimum requis de fiabilité pour opérer la prochaine mission. La contraintes (8.33) dicte le fait que le temps total requis pour la maintenance des composant doit ne pas dépasser la durée limitée de l'arrêt planifié. Pour chaque composant P_{ij} , la contrainte (8.34) indique qu'un seul niveau de maintenance peut être réalisé si le composant est sélectionné pour une maintenance. La contrainte (8.35) permet de mettre à jour l'état de fonctionnement des composants au début de la prochaine mission. La contrainte (8.36) permet de réévaluer le niveau de dégradation de tous les composants au début de la mission suivante.

5 Résultats numériques

Des expériences numériques sont menées pour démontrer la validité de l'approche proposée. Tout d'abord, un seul composant est considéré pour analyser l'impact des coûts de pénalité et d'inspection par rapport aux décisions en maintenance sélective. L'effet sur les décisions de la CBSM de la variance du processus de dégradation gamma du composant est également étudié mais n'est pas présenté dans ce chapitre. Cette étude de sensibilité est détaillée dans [27]. Par ailleurs, des expériences sont fournies pour étudier les solutions CBSM pour un système à plusieurs composants et analyser les compromis entre les décisions de CBSM et la gestion des ressources en maintenance.

5.1 Exemple 1 : cas d'un système réduit à un seul composant

Dans cet exemple, un seul composant P_{ij} d'un système multi-composant est considéré. L'objectif de la présente expérience est de montrer comment les coûts d'inspection et de pénalité induit par la défaillance du composant influent sur les décisions en maintenance. Le processus de dégradation du composant P_{ij} est régi par un processus gamma stationnaire avec un paramètre d'échelle η_{ij} et une fonction de forme $w_{ij}(t)$ telle que $\eta_{ij} = 2.6$ et $w_{ij}(t) = \alpha_{ij}t$ avec $\alpha_{ij} = 0.19$. Le seuil de dégradation selon lequel le composant P_{ij} est jugé défaillant est évalué à $H_{ij} = 18$. Le niveau de dégradation à la fin de la mission courante est mesuré à $d_{ij} = 12$ ce qui implique que le composant P_{ij} fonctionne encore ($d_{ij} < H_{ij}$), et donc la variable d'état $X_{ij} = 1$. La durée de la prochaine mission est fixée à $U = 25$. En conséquence, la fiabilité conditionnelle du composant pour la prochaine mission est de $\mathcal{R}_{ij}^c(U|d_{ij}) = 10.68\%$. Pour améliorer cette fiabilité, des actions de maintenance doivent être effectuées.

Pour la maintenance du composant P_{ij} , une liste de 8 niveaux de maintenance possibles sont disponibles et leurs coefficients respectifs de réduction de dégradation φ_{ijl} ($l = 1, \dots, 8$) sont reportés dans la table 8.1. Puisque le composant P_{ij} fonctionne toujours à la fin de la mission courante, seules les données de maintenance préventive sont prises en compte. Le coût et la durée d'un remplacement préventif sont fixés, respectivement, à $C_{ij}^p = 1.5$ et $T_{ij}^p = 2$, et le paramètre constant ξ_{ij}^p est fixé à $\xi_{ij}^p = 0.45$. Les coûts et les durées correspondants aux niveaux de maintenance intermédiaires sont obtenus à partir des équations (8.12) et (8.13). Le coût d'inspection est de $I_{ij} = 0.02$ alors que le coût de pénalité par unité de temps $\Pi_{ij} = 0.15$.

l	1	2	3	4	5	6	7	8
φ_{ijl}	0.8	0.75	0.6	0.45	0.4	0.25	0.15	0

Table 8.1 – Coefficients de réduction de dégradation des niveaux de maintenance.

Si le décideur en maintenance requiert un niveau de fiabilité minimum de $\mathcal{R}_0 = 55\%$ pour la prochaine mission, alors la solution optimale suggère le plan CBSM qui consiste à mener les opérations suivantes. Tout d'abord, une action de maintenance de niveau $l = 7$ doit être effectuée sur le composant à la fin de la mission en cours. Deuxièmement, un plan d'inspections périodiques doit être réalisé tous les $\tau = 3.57$ unité de temps. La fiabilité qui en résulte est évaluée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U|d_{ijl}) = 77.92\%$ à un coût total moyen de $TEC = 1.77$.

Impact du coût de pénalité

Les résultats de la table (8.2) sont obtenus pour $\mathcal{R}_0 = 55\%$ et pour différentes valeurs du coût de pénalité Π_{ij} . Ces résultats montrent clairement les compromis entre les décisions de la CBSM et le coût de pénalité. Lorsque ce coût n'est pas pris en compte ($\Pi_{ij} = 0$), la solution optimale suggère de réaliser une action de maintenance de niveau $l = 4$. Ce niveau de maintenance permet au composant de réussir la mission suivante avec une fiabilité de $\mathcal{R}_{ij}^c(U|d_{ijl}) = 57.82\%$. De plus, le composant est soumis à des inspections périodiques après chaque $\tau = 12.5$ unités de temps durant la prochaine mission. Le coût total moyen induit par ces plans d'inspection et de maintenance est de 0.98. Maintenant, si le coût de pénalité est augmenté à $\Pi_{ij} = 0.05$, le niveau de maintenance suggéré est toujours le même, mais la solution résultante suggère plus d'inspections pendant la prochaine mission ; la période d'inspection est réduite à $\tau = 4.17$ unités de temps. Si on augmente le coût de pénalité à $\Pi_{ij} = 0.30$, la solution optimale suggère le niveau de maintenance le plus élevé $l = L_{ij} = 8$ ce qui équivaut à remplacer le composant par un nouveau pour assurer une fiabilité maximale de $\mathcal{R}_{ij}^c(U|d_{ijl}) = 84.72\%$ pour la prochaine mission. Dans ce cas, le composant est également soumis à plus d'inspections qui doivent être effectuées périodiquement après chaque $\tau = 3.13$ unités de temps.

Impact du coût d'inspection

Π_{ij}	l	τ	$\mathcal{R}_{ij}^c(U _{d_{ijl}})$	TEC
0	4	12.5	57.82	0.98
0.08	4	5	57.82	1.23
0.10	4	4.17	57.82	1.29
0.20	5	3.57	61.77	1.54
0.30	7	3.57	77.92	1.77
0.50	8	3.57	84.72	2.10
0.60	8	3.13	84.72	2.26

Table 8.2 – Résultats de l'exemple 1 : impact du coût de pénalité.

En utilisant les mêmes données d'entrée de l'expérience ci-dessus, l'objectif de cette nouvelle expérience est d'étudier l'effet du coût d'inspection I_{ij} sur les décisions de la CBSM. Pour un coût de pénalité par unité de temps fixé à $\Pi_{ij} = 0.1$, les résultats obtenus sont reportés dans la table (??). À partir de cette table, on peut observer que le niveau de maintenance augmente avec le coût d'inspection. Par conséquent, lorsque le coût d'inspection est élevé, la solution du problème de maintenance sélective suggère, d'une part, le renouvellement du composant et, d'autre part, la réduction du nombre d'inspections. Dans le cas où le coût d'inspection est fixé à $I_{ij} = 0.01$, la stratégie optimale consiste à effectuer une maintenance de niveau $l = 4$ et des opérations d'inspection à chaque $\tau = 2.78$ unité de temps. Dans ce cas, la fiabilité résultante pour la prochaine mission est évaluée à $\mathcal{R}_{ij}^c(U|_{d_{ijl}}) = 57.82\%$ et le coût total moyen est évalué à 1.51. Dans le cas où l'inspection est augmentée à $I_{ij} = 0.05$, alors le plan de maintenance optimal consiste à effectuer un remplacement (le plus haut niveau de maintenance $l = 8$), et des opérations d'inspection périodiques à des intervalles de $\tau = 12.5$ unités de temps.

I_{ij}	l	τ	$\mathcal{R}_{ij}^c(U _{d_{ijl}})$	TEC
0.01	4	2.78	57.82	1.51
0.02	5	4.17	61.77	1.57
0.04	7	6.25	77.92	1.64
0.05	8	12.5	84.72	1.65

Table 8.3 – Résultats de l'exemple 1 : impact du coût d'inspection.

5.2 Exemple 2 : cas d'un système série-parallèle

Dans ce second exemple, notre approche est appliquée à un système série-parallèle constitué de $n = 2$ sous-systèmes en série. Les deux premiers sous-systèmes sont composés respectivement de $N_1 = 2$ et $N_2 = 3$ composants disposés en parallèle. Les composantes P_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, \dots, N_i$) se dégradent selon un processus gamma stationnaire dont le paramètre d'échelle et la fonction de forme sont respectivement donnés par η_{ij} et $w_{ij}(t) = \alpha_{ij}t$. Les valeurs des paramètres (η_{ij} et α_{ij}) sont indiquées dans la table (8.4). Les valeurs des seuils de défaillance H_{ij} et des niveaux d_{ij} de dégradation ainsi que les valeurs des variables d'état X_{ij} du composant P_{ij} à la fin de la mission courante sont également fournies dans la table (8.4). Selon les données de cette table, les composants P_{12} et P_{22} sont défaillants ($Y_{12} = Y_{22} = 0$), alors que les autres composants fonctionnent encore. Dans cet exemple, la durée de la prochaine mission est fixée à $U = 28$.

Les durées et les coûts des remplacements préventif et correctif, ainsi que les valeurs des paramètres ξ_{ij}^p et ξ_{ij}^c sont données par la table (8.5). Cette table fournit également les coûts de pénalité par unité de temps ainsi que les coûts d'inspection. On suppose que pour tous les composants, il existe une liste commune de 8 niveaux de maintenance. Les coefficients de réduction de dégradation pour les niveaux de maintenance sont les mêmes que dans l'exemple précédent (voir table 8.1). Il convient de rappeler que les coûts et les durées correspondants aux niveaux intermédiaires de maintenance sont calculés à l'aide des équations (8.12) - (8.15).

P_{ij}	η_{ij}	α_{ij}	H_{ij}	d_{ij}	X_{ij}
P_{11}	2.61	0.17	18	10	1
P_{12}	2.75	0.15	15	18	0
P_{21}	2.91	0.12	16	7	1
P_{22}	2.91	0.09	15	16	0
P_{23}	1.97	0.17	10	4	1

Table 8.4 – Données des composants du système de l'exemple 2.

P_{ij}	C_{ij}^p	T_{ij}^p	C_{ij}^c	T_{ij}^c	Π_{ij}	I_{ij}	ξ_{ij}^p	ξ_{ij}^c
P_{11}	1.25	2	7.50	4	0.80	0.01	0.45	0.15
P_{12}	2.50	4	11.25	8	1.00	0.01	2.00	1.20
P_{21}	1.25	2	7.50	4	0.75	0.01	0.45	0.30
P_{22}	1.25	2	7.50	4	0.4	0.01	2.00	1.50
P_{23}	2.50	4	11.25	8	0.6	0.01	0.65	0.10

Table 8.5 – Données d'inspection, de maintenance et de pénalité du système de l'exemple 2.

La durée de l'arrêt planifié est fixé à $\mathcal{T}_0 = 4$ unités de temps et la fiabilité minimum requise pour la prochaine mission est $\mathcal{R}_0 = 75\%$. Si aucune action de maintenance ne devait être effectuée à la fin de la mission courante, la fiabilité pour la mission suivante serait alors de $\mathcal{R}^c = 14,40\%$, ce qui est loin de satisfaire le niveau de fiabilité minimum requis $\mathcal{R}_0 = 75\%$. Par conséquent, la maintenance des composants est obligatoire pour éviter une défaillance du système. Après avoir résolu le CBSMP, le plan de maintenance sélective optimal obtenu suggère le plan d'inspection et de maintenance suivant : a) les composants P_{11} et P_{21} subissent une MP de niveau $l = 8$; ils sont par conséquent restaurés à leur état neuf; b) les composants encore en fonctionnement subissent des inspections périodiques toutes les $\tau = 1.75$ unités de temps. La fiabilité du système qui en résulte est de $\mathcal{R}^c = 76,35\%$. Le coût total moyen induit par ce plan maintenance sélective est de $TMC = 53.34$ et le temps de maintenance total requis correspondant est de $TMT = 4$.

Il est à noter que dans la solution optimale obtenue, parce que la durée de l'arrêt est insuffisante, les composants P_{12} et P_{22} ne sont pas réparés (ils restent en panne) et le composant P_{23} ne reçoit aucune maintenance préventive. Si le décideur en maintenance admet une certaine flexibilité et peut augmenter la durée de l'arrêt de seulement 1 unité de temps (cela revient aussi à retarder la prochaine mission), la nouvelle solution optimale suggérerait un plan modifié d'inspection et de maintenance qui consiste à réaliser des actions de MP de niveaux $l = 8$ et $l = 7$, respectivement, sur les composants P_{11} et P_{21} , et une MC imparfaite de niveau $l = 3$ sur le composant P_{22} réduisant ainsi son niveau de dégradation à $d_{22,3} = 9.6$. Cette nouvelle solution suggérerait également d'effectuer des inspections périodiques à des intervalles de $\tau = 2$ unités de temps. La fiabilité qui en résulterait est $\mathcal{R}^c = 78.34\%$, ce qui équivaut à environ 2% d'amélioration des performances du système. Ainsi, comme on peut s'y attendre, la quantité de ressources allouées aux activités de maintenance a un impact sur la décision de maintenance sélective. Un tel problème de gestion des ressources est discuté dans l'exemple suivant.

5.3 Exemple 3 : Impact des ressources en maintenance

Les ressources en maintenance, en particulier dans les domaines industriels critiques, jouent un rôle central dans la prise de décision et l'exécution efficace des tâches de maintenance. Ces ressources sont généralement limitées et matérialisées soit par le temps, le budget ou le personnel. Le décideur en maintenance doit alors assurer un compromis entre les ressources en maintenance disponibles. Dans le cadre de la maintenance sélective, le responsable de la maintenance peut être confronté à des situations particulières où seulement de courtes durées des arrêts planifiés sont disponibles mais avec plus de latitude sur le plan budgétaire, ou vice versa. Dans d'autres circonstances, toutefois, le décideur en maintenance doit faire face à des contraintes de temps et de budget.

Dans ces situations, l'objectif du décideur consiste à maximiser la fiabilité du système pour exécuter

la mission suivante tout en tenant compte des limitations à la fois de la durée de l'arrêt et du budget. Ici, il est intéressant de noter que le budget de la maintenance permet non seulement d'effectuer les activités de maintenance à la fin de la mission en cours, mais aussi d'effectuer des activités d'inspection et supporter les pénalités dues aux indisponibilités des composants. Un tel budget est ci-après noté par \mathcal{C}_0 .

Le but de la présente expérience est d'analyser les compromis entre le budget disponible et la durée de maintenance. Les résultats sont obtenus dans le cas où les composants du système sont inspectés toutes les deux unités de temps, c'est-à-dire $\tau = 2$. La figure (8.1) montre les courbes de variation de la fiabilité optimale du système en fonction du budget \mathcal{C}_0 alloué à la maintenance. Chaque courbe de la figure (8.1) est paramétré par une valeur donnée \mathcal{T}_0 .

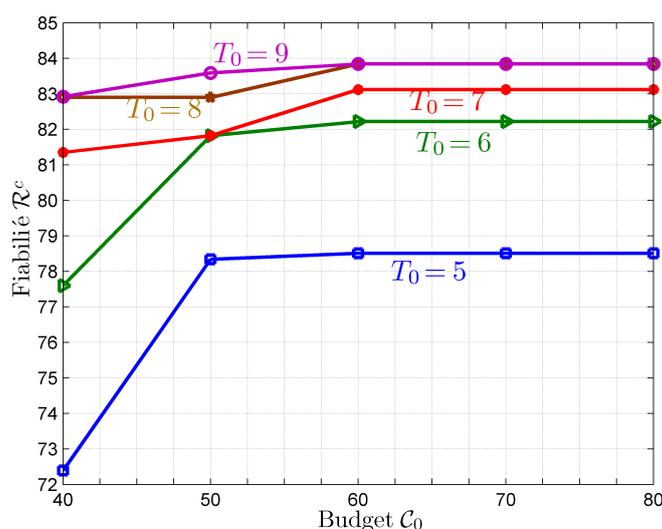


Figure 8.1 – Variations de la fiabilité conditionnelle optimale du système vs les ressources en maintenance.

En utilisant la figure (8.1), il est possible d'estimer le temps et le budget à allouer aux activités de maintenance afin que la prochaine mission puisse être complétée avec succès et avec la meilleure performance possible. Par exemple, supposons que la durée \mathcal{T}_0 de l'arrêt planifié et le budget \mathcal{C}_0 de la maintenance sont fixés, respectivement, à $\mathcal{T}_0 = 5$ et $\mathcal{C}_0 = 40$. Dans ce cas, la fiabilité maximale du système pour la mission suivante est de $\mathcal{R}^c = 72.39\%$. Si 1 unité de temps supplémentaire est disponible pour prolonger la durée de l'arrêt, avec le même budget de maintenance, la fiabilité maximale du système s'élèverait alors à $\mathcal{R}^c = 77.6\%$, soit donc une amélioration additionnelle d'environ 5.21%.

De la figure (8.1), on peut observer que pour une durée fixe de l'arrêt planifié, il y a une fiabilité maximale du système qui peut être atteinte. Par exemple, si cette durée est fixée à $\mathcal{T}_0 = 7$, le niveau de fiabilité maximum atteignable est de 83.12% avec un coût total moyen estimé à 50.87 et un temps total consommé en maintenance égale à 6.99. Dans ce cas, puisqu'il n'y a pas de temps supplémentaire disponible pour prolonger la durée de l'arrêt, augmenter le budget de maintenance serait alors inutile.

On peut également étudier la situation où le gestionnaire de maintenance a plus de flexibilité quant au budget de maintenance mais avec la durée de l'arrêt considérée comme une contrainte forte. Par exemple, si $\mathcal{C}_0 = 40$ et $\mathcal{T}_0 = 6$, alors la fiabilité maximum du système qui en résulte est $\mathcal{R}^c = 77.6\%$. Dans ce cas, augmenter le budget de maintenance de 10 unités monétaires augmenterait la fiabilité maximale du système de 4.22%. Si \mathcal{C}_0 est encore augmenté de 10 unités monétaires additionnelles, la fiabilité augmenterait encore pour atteindre la valeur de $\mathcal{R}^c = 82.22\%$. Cependant, augmenter le budget de maintenance au-delà de 60 unités monétaires ne donnerait pas d'amélioration supplémentaire en raison de la limitation imposée par la durée de l'arrêt. Cette analyse peut en fait aider le responsable de la maintenance à décider quant à l'allocation des ressources en maintenance.

6 Conclusion

Ce travail de recherche a porté sur le problème d'optimisation de la maintenance sélective pour un système avec des composants se dégradant continuellement et soumis à une inspection périodique. La dégradation des composants du système est modélisée par un processus gamma stationnaire (qui pourrait être étendu à d'autres processus stochastiques). Le système effectue des missions consécutives séparées par des arrêts programmés au cours desquels la maintenance de ses composants a lieu. Chaque composant tombe en panne chaque fois que son niveau de dégradation atteint un seuil prédéfini. Les défaillances des composants du système ne sont révélées que par des inspections périodiques effectuées au cours d'une mission.

Pour améliorer la fiabilité du système, les composants peuvent recevoir une maintenance de différents niveaux. Une politique de maintenance imparfaite est utilisée pour aussi bien la maintenance corrective que préventive. Un niveau de maintenance est caractérisé par un coefficient de réduction de dégradation. Les structures de coût de maintenance et de durée sont développées pour prendre en compte la relation entre le coût et la durée d'une action de maintenance imparfaite et le coefficient de réduction de dégradation qui en résulte.

Un modèle mathématique de cette nouvelle approche du problème de maintenance sélective est formulé pour minimiser le coût total moyen qui est la somme des coûts totaux de maintenance, d'inspection et de pénalité sujet à la durée limitée de l'arrêt planifié et à la fiabilité minimale requise pour la prochaine mission. Ce problème est résolu et une analyse de sensibilité est effectuée pour étudier les compromis entre les coûts d'inspection et de pénalité, et les objectifs de fiabilité ainsi que l'allocation des ressources en maintenance, à savoir la durée des arrêts et le budget de la maintenance.

Chapitre 9

Optimisation intégrée de la production et de la maintenance imparfaite d'un système de production

1 Introduction

La majeure partie des travaux de recherche disponible, traitant de l'intégration de la production et de la maintenance préventive (MP), se concentre sur l'ordonnancement des opérations. Les modèles de planification intégrée de production et de MP supposent que les périodes pendant lesquelles la MP doit avoir lieu sont connues à l'avance et sont principalement formulées comme un problème d'ordonnancement déterministe avec des contraintes de disponibilité. Ces modèles sont généralement résolus en utilisant des versions adaptées des méthodes classiques de résolution des problèmes d'ordonnancement [179, 180, 181, 182, 183, 184].

Cependant, au cours des deux dernières décennies, les travaux de recherche qui relèvent de l'intégration de la production et de la MP, au niveau de la planification tactique, a connu une progression significative. Tout d'abord, le modèle de production économique (EPQ) de Haris [185], a été largement étudié donnant lieu à plusieurs extensions. Rosenblatt et Lee [186] ont étudié les effets d'un processus de production imparfait (ayant des temps de défaillance exponentiellement distribués) sur le temps de cycle optimal de production. Dans les travaux de Hariga et al. [187], le modèle de Rosenblatt et Lee [186] a été étendu en considérant des fonctions générales de distributions des temps de défaillance du système de production. Porteus [188] considère les options d'investissement pour réduire les coûts de qualité et d'installation. Lee et Rosenblatt [189], proposent un modèle EPQ intégrant l'inspection et la maintenance où le coût de la restauration est lié au retard dû à la détection des défaillances, et le temps de décalage est gouverné par une distribution exponentielle. Ce modèle a été ensuite étendu par Lin et al. [190] pour le cas d'une distribution générale des temps de défaillances avec un taux de pannes croissant .

Ben Daya [191] (voir aussi [192]) a développé un modèle intégré pour la détermination conjointe de l'EPQ, la qualité et le niveau de MP pour un système de production ayant un taux de pannes croissant. Récemment, des travaux tels que [193, 194] proposent un modèle intégré d'optimisation de l'EPQ en considérant une activité de remanufacturing en plus d'une MP imparfaite. D'autres travaux considèrent un modèle EPQ intégré pour un système de production imparfait où les articles produits sont vendus avec une politique de garantie [195, 196, 197]. Certains travaux [198, 199, 200] prennent en considération un critère de non-conformité de la production dans la décision conjointe de production et de maintenance.

Jafari et Makis [201] ont proposé une approche de modélisation basée sur les processus de Markov à temps continu et du modèle de risque proportionnel (*Proportional Hazard Model* : PHM) pour l'optimi-

sation conjointe de l'EPQ et la MP dans un système de production soumis à une détérioration aléatoire. La politique de maintenance adoptée consiste à effectuer un remplacement correctif en cas de défaillance ou à effectuer un remplacement préventif lorsque le taux de défaillance atteint un seuil préétabli ou que l'âge de système de production dépasse une valeur prédéfinie. Les auteurs ont ensuite développé et résolu le problème d'optimisation résultant en utilisant les processus de décision semi-Markovien (SMDP : *Semi-Markov Decision Processes*). Récemment, Jafari et Makis [202] ont proposé un modèle d'optimisation conjointe de EPQ et de maintenance conditionnelle (CBM) pour un système de production partiellement observable en utilisant une approche de contrôle bayésienne. Ces mêmes auteurs ont proposé un modèle intégré d'optimisation de l'EPQ et de la CBM pour un système de production composé de deux machines économiquement dépendantes et disposées en série [203].

Cheng et al. [204] ont développé un modèle d'optimisation intégré de la politique EPQ et de la CBM dans un système de production composé de plusieurs composants économiquement dépendants. Chaque composant du système se détériore de manière aléatoire selon un processus gamma stationnaire. Les niveaux de dégradation des composants sont révélés par des opérations d'inspection effectuées une fois qu'un lot est produit. La fonction de coût à minimiser est formulée en termes de coûts de production et de maintenance, de setup, de stockage et de pénurie. La méthode de résolution utilisée repose sur une combinaison de la technique de simulation de Monte Carlo et de l'algorithme génétique.

Peng et Houtum [205] considère un système de production sujet à une maintenance conditionnelle. Un remplacement correctif est réalisé lorsque la dégradation cumulée atteint un seuil critique. Pour améliorer la fiabilité du système, un remplacement préventif est effectué à un seuil de dégradation spécifié. L'objectif est de minimiser le coût total moyen composé des coûts de setup, de stockage ainsi que les coûts des remplacement préventifs et correctifs. En utilisant la théorie de renouvellement, Peng et Houtum établissent les conditions d'optimalité d'un plan intégré de EPQ et de maintenance préventive.

Wienstein et Chung [206] ont présenté un modèle hiérarchique de planification et d'ordonnement de la production en trois parties tenant compte de la fiabilité du système de production. La première partie du modèle est un modèle agrégé de planification de la production formulé comme un programme linéaire. La deuxième partie est un programme de production principal ayant pour objectif de minimiser les écarts pondérés par rapport aux objectifs spécifiés au niveau de la planification globale. La troisième partie du modèle traite des exigences de chargement des postes de travail utilisés pour simuler les pannes sur un horizon de planification donné. Pour la sélection de la politique de maintenance, plusieurs expériences sont effectuées pour tester les facteurs significatifs tels que la catégorie et la fréquence des activités de maintenance, les coûts de maintenance, l'importance de la défaillance, et la politique globale de production.

Le problème de la planification conjointe de la production et de la maintenance a été également traité dans le cadre de la sous-traitance. Cette dernière est devenu, dans certains contextes industriels, une solution permettant d'améliorer les performances (délais, demande, et coûts globaux) et la flexibilité [207]. C'est ainsi que des travaux ont proposé des approches pour l'analyse des performances des stratégies de sous-traitance combinées aux stratégies de productions dans une chaîne logistique [208, 209, 210, 211]. D'autres travaux ont aussi été développés tenant compte les stratégies de sous-traitance comme une dimension supplémentaire dans la résolution des problèmes de planifications de la production et de la maintenance [212, 213]. Parmi ces travaux figurent aussi ceux développés au sein du laboratoire LGIPM de l'Université de Lorraine [214, 215, 216]. Récemment, Diallo et al. [2] ont mené et proposé une revue de littérature des approches qui relèvent des problèmes de fiabilité, de maintenance et de la qualité dans les chaînes logistiques à boucle fermée.

Aghezzaf et al. [217] ont proposé un modèle d'optimisation permettant de générer des plans optimisés de production et de MP au niveau tactique. Le modèle suppose que le système est sujet à des réparations minimales en cas de pannes pendant une période de production. Lorsqu'une MP est effectuée, le système revient à un état neuf. Dans [217], les auteurs supposent également que toute action de maintenance, qu'elle soit une réparation minimale ou une MP, réduit la capacité de production disponible du système. Ce travail est étendu dans [218] pour l'optimisation simultanée de la production et de la MP dans un système de production multi-lignes. Najid et al. [219] ont étendu le modèle dans [218] en tenant compte les fenêtres de temps de la demande et en intégrant le coût de pénurie. Nourelfath et Chatelet [220]

ont étudié un problème de planification pour un système de production composé d'un ensemble de machines disposés selon un diagramme bloc de fiabilité série-parallèle, et tenant compte les dépendances économiques et les défaillances de causes communes (*Common Cause Failure* : CCF) des machines. Fitouhi et Nourelfath [221] ont étendu le modèle établi dans [217] aux systèmes multi-états (MSS). Récemment, Yalaoui et al. [222] ont proposé des algorithmes exactes et des heuristiques pour résoudre efficacement le modèle d'optimisation développé dans [218]. Des extensions plus récentes des travaux dans [217] sont apparues dans [223, 224, 58].

Ce chapitre propose un modèle général de planification de la production qui, en plus des données de production, prend également en compte les données de fiabilité du système afin de générer des plans de production tactiques optimaux conjointement avec les périodes optimales de MP. L'ordonnancement effectif de la maintenance est ensuite effectué, au niveau opérationnel, pendant les périodes optimales générées. Le modèle tente d'obtenir un compromis optimal entre les coûts liés à la production et les coûts liés à la maintenance tout en répondant aux exigences de production globales. Le modèle suppose que la maintenance est imparfaite et est d'abord formulée, dans ses variables naturelles, comme un problème d'optimisation non-linéaire mixte en nombres entiers. Il est alors montré qu'il peut être reformulé en tant que problème linéaire, qui peut ainsi être résolu avec les solveurs disponibles. Cependant, le nombre de variables et des contraintes résultantes de cette reformulation sont trop importantes. Une approche approximative de résolution est alors proposée et discutée. Le contenu de ce chapitre est issu des

travaux de thèse de Mr Le Tam en cours de préparation dans le cadre de notre collaboration avec Prof. Aghezzaf [58]. Il convient de noter que le modèle d'optimisation exposé a été étudié dans un autre travail publié sous forme d'un chapitre de livre [60] et où différentes méthodes de résolution ont été implémentées et discutées sur la base de solutions de benchmarks existants. Parmi ces méthodes nous citons la relaxation Lagrangienne et la décomposition de Dantzig-Wolfe [225].

2 Modèle de planification intégrée de la production et de la maintenance préventive imparfaite

Nous considérons un système de production initialement neuf et sujet à des défaillances stochastiques et admet un taux de pannes $r_0(t)$. Pour améliorer ses durées de vie, le système subit des actions de MP. Dans ce chapitre, une MP est considérée imparfaite et est modélisée conformément à l'approche du taux de pannes hybride initialement défini par Lin et al. [146] et largement exploité dans la littérature [105, 226, 99]. Si, après la $k^{\text{ème}}$ MP, le taux de pannes atteint ou dépasse un seuil $r_{k_{max}}(t)$, le système subit une action de renouvellement et son taux de pannes est réinitialiser à $r_0(t)$. Si la $k^{\text{ème}}$ MP a lieu T_k unités de temps après un renouvellement, alors le taux de pannes $r_k(t)$ ($t \in [0, T_{k+1} - T_k[$, et $k = 1, \dots, k_{max}$) du système est défini comme suit :

$$r_k(t) = \beta_k r_0(t + \alpha_k T_k), \quad (9.1)$$

où α_k et β_k sont, respectivement, le coefficient de réduction d'âge et le coefficient d'accroissement (ajustement) du taux de pannes. Ces deux coefficient sont définis tels que $0 = \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{k_{max}} = 1$ et $1 = \beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_{k_{max}}$. Nous supposons que le taux de pannes $r_0(t)$ est une fonction monotone croissante.

Sur un horizon fini de planification $H = \{1, \dots, T\}$, le système a pour mission de produire un ensemble de produits/éléments $j \in P = \{1, \dots, N\}$. Nous supposons que chaque période $t \in H$ a une longueur fixe notée τ et que chaque produit $j \in P$ lui correspond une demande déterministe d_{jt} qui doit être satisfaite à la fin de la période t . La quantité $d_{tT}^j = \sum_{t'=t}^T d_{t'}^j$ est la demande cumulée du produit $j \in P$ pendant l'intervalle $[t, T]$. Chaque élément $j \in P$ est produit avec un taux de production connu ρ_j exprimé en unités de produit par unité de temps. Le système de production a une capacité constante connue (donnée en unités de temps) et est notée par κ_{max} . Nous supposons que chaque action de maintenance effectuée sur le système consomme une quantité donnée de capacité du système.

Le modèle intégré d'optimisation permet de déterminer les plans intégrés optimaux de production et de MP. Le modèle suppose qu'une maintenance corrective, en termes d'une réparation minimale, est

exécutée immédiatement après une défaillance du système. Sans perte de généralité, nous supposons que pendant la période de planification, le taux de pannes ne dépasse jamais le seuil $r_{k_{max}}(t)$.

Pour définir les variables du modèle, on note par Q_{jt} la quantité d'éléments $j \in P$ produite durant la période $t \in H$, I_{jt} l'inventaire du produit $j \in P$ à la fin de la période $t \in H$, x_{jt} la variable de décision binaire évaluée à 1 si la production de l'élément $j \in P$ est lancée dans la période $t \in H$ et 0 sinon, y_t la variable de décision binaire évaluée à 1 si le système est mis en production (setup) à la période $t \in H$ et 0 sinon et $\mathbf{y} = (y_t)_{t \in H}$ indiquent le vecteur des décisions de setup. On note aussi par z_{st}^k , avec $k \leq s \leq t$, la variable binaire de décision fixée à $z_{st}^k = 1$ si la dernière MP du système avant la période t est la k^{me} et a eu lieu pendant la période s . Par convention, nous supposons qu'une MP est réalisée au début de la période 1, soit $z_{11}^1 = 1$.

S'agissant des paramètres du modèle, on représente par θ_{PM}^k et c_{PM}^k le temps et le coût moyen respectifs de la k^{eme} MP. On note également par θ_{CM}^k et c_{CM}^k , respectivement, le temps et le coût moyen pour effectuer une MC suite à une panne ayant lieu après la k^{eme} MP. Nous considérons aussi le coût fixe (setup) f_{jt} encouru si le système fonctionne pendant la période $t \in H$ pour produire l'élément $j \in P$, le coût variable p_{jt} de production de l'élément $j \in P$ dans la période $t \in H$, et le coût h_{jt} de stockage du produit $j \in P$ à la fin de la période $t \in H$. Enfin, on note par $c_{st}^k(\mathbf{y})$ et $\kappa_{st}^k(\mathbf{y})$ les coûts moyens de maintenance et les pertes en capacité de production pour la période t , et ce lorsque la dernière action de MP avant la période t a eu lieu dans la période s , avec $k \leq s \leq t$. Ces paramètres dépendent du vecteur de setup \mathbf{y} et peuvent être calculés tels que :

$$c_{st}^k(\mathbf{y}) = \begin{cases} c_{PM}^k + c_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 \left(u + \alpha_k \left[\sum_{t'=1}^{s-1} y_{t'} \right] \tau \right) du & \text{si } t = s, k \leq s, \\ c_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 \left(u + \alpha_k \left[\sum_{t'=1}^{s-1} y_{t'} \right] \tau + \left[\sum_{t'=s}^{t-1} y_{t'} \right] \tau \right) du & \text{si } s < t \leq T, \end{cases} \quad (9.2)$$

$$\kappa_{st}^k(\mathbf{y}) = \begin{cases} \theta_{PM}^k + \theta_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 \left(u + \alpha_k \left[\sum_{t'=1}^{s-1} y_{t'} \right] \tau \right) du & \text{si } t = s, k \leq s, \\ \theta_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 \left(u + \alpha_k \left[\sum_{t'=1}^{s-1} y_{t'} \right] \tau + \left[\sum_{t'=s}^{t-1} y_{t'} \right] \tau \right) du & \text{si } s < t \leq T. \end{cases} \quad (9.3)$$

Dans les équations ci-dessus, notez que nous commençons par $k = 1$, ce qui signifie que le premier renouvellement du système a eu lieu au début de la première période ($t = 1$) de l'horizon de planification H .

En guise d'illustration, et pour faciliter la compréhension des développements qui suivent, considérons un système de production avec une capacité maximale κ_{max} . Supposons que le système ait subi deux actions de MP, comme le montre la figure (9.1). Les flèches indiquent les périodes pendant lesquelles le système est configuré (setup) pour la période de production.

Supposons que les durées de vie du système suivent une loi Gamma $\mathcal{G}(\gamma, \eta)$ de paramètre de forme $\gamma > 0$, de paramètre d'échelle $\eta > 0$ et de densité de probabilité $f(t)$ définie pour $t \geq 0$ telle que :

$$f(t) = \frac{\eta^\gamma t^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right), \quad (9.4)$$

où $\Gamma(\gamma)$ est la fonction gamma définie par $\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty u^{\gamma-1} e^{-u} du$, et les paramètres de forme et d'échelle sont, respectivement, fixés à $\gamma = 2$ et $\eta = 0.5$.

Nous supposons également que $(\theta_{PM}^k = 1, c_{PM}^k = 28)$ et $(\theta_{CM}^k = 5, c_{CM}^k = 35)$ soit le temps et le coût moyens de la k^{eme} MP et corrective du système de production. Les coefficients α_k et β_k sont donnés par $\alpha_1 = 0$ et $\alpha_k = 0.15 + 0.1(k-1)$ pour $k = 2, \dots, 8$; et $\beta_k = 1$ pour $k = 1, \dots, 8$. La table (9.1) montre, respectivement, le plan de MP, les instants de setup, l'âge après chaque MP, le nombre moyen de pannes et la perte moyenne de la capacité de production dans chaque période.

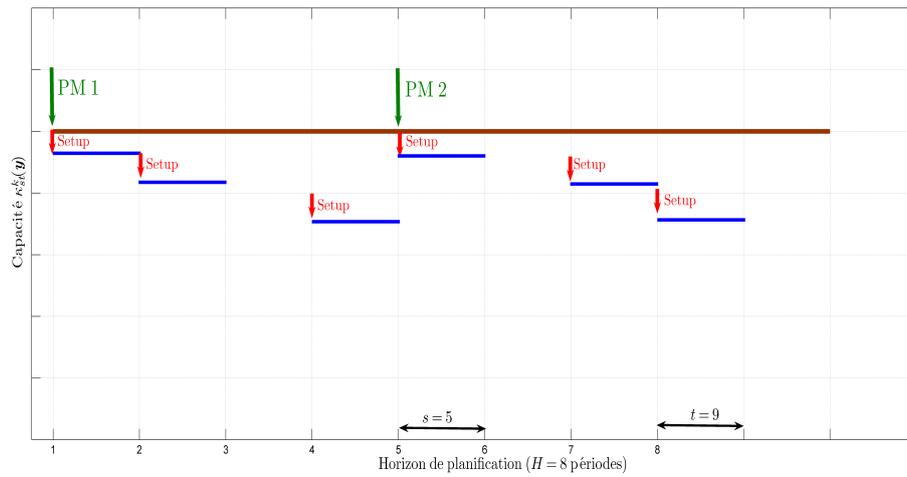


Figure 9.1 – Exemple illustratif d'un plan de MP avec des set-up de production.

Période	Age réel	PM	Setup	Age virtuel	Nbr Moyen de pannes	Perte moyenne en capacité
1	0.00τ	$k = 1$	1	0.00τ	0.901	5.507
2	1.00τ		1	1.00τ	1.489	7.446
3	2.00τ		0	2.00τ	1.664	8.318
4	3.00τ		1	2.00τ	1.664	8.318
5	4.00τ	$k = 2$	1	0.75τ	1.412	8.061
6	5.00τ		0	1.75τ	1.632	8.161
7	6.00τ		1	1.75τ	1.632	8.161
8	7.00τ		1	2.75τ	1.731	8.659

Table 9.1 – Exemple illustratif d'un plan intégré de production et de maintenance imparfaite.

Le problème de planification intégrée de la production et de la MP imparfaite (**IPImPMPP**) peut maintenant être modélisé sous la forme d'un programme non-linéaire mixte en nombre entier (MINLP)

comme décrit suit :

IPIImPMPP :

Minimiser :

$$Z_{PPM}^{IP} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (f_{jt}x_{jt} + p_{jt}Q_{jt} + h_{jt}I_{jt}) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s c_{st}^k(\mathbf{y})y_t z_{st}^k \quad (9.5)$$

Sujet à :

$$Q_{jt} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.6)$$

$$Q_{jt} - \min \left\{ d_{tT}^j, \kappa_{max} \right\} x_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.7)$$

$$x_{jt} - y_t \leq 0, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.8)$$

$$\sum_{j=1}^N \rho_j Q_{jt} + \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \kappa_{st}^k(\mathbf{y})y_t z_{st}^k \leq \kappa_{max}, \quad \forall t \in H \quad (9.9)$$

$$\sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s z_{st}^k = 1, \quad \forall t \in H \quad (9.10)$$

$$z_{st}^k - z_{s,t+1}^k \geq 0, \quad \forall k, s, t \in H, k \leq s \leq t \leq T-1 \quad (9.11)$$

$$\sum_{s=k-1}^{t-1} z_{s,t-1}^{k-1} - z_{tt}^k \geq 0, \quad \forall k, t \in H, 2 \leq k \leq T, k \leq t \quad (9.12)$$

$$Q_{jt}, I_{jt} \geq 0, \quad x_{jt}, y_t, z_{st}^k \in \{0, 1\} \quad \forall j \in P, s, t \in H, k \leq s \leq t.$$

Dans la formulation du problème **IPIImPMPP**, les équations (9.6) sont les contraintes de conservation de flux dans chaque période $t \in H$. Ils garantissent que le stock disponible, augmenté de la quantité produite dans une période t , soit suffisant pour satisfaire la demande d_{jt} du produit j durant cette période. Le surplus de la production est stocké pour les demandes des périodes suivantes. Les contraintes (9.7) garantissent que, lorsque la production d'un élément est planifiée sur une période, le système soit configuré (setup). Ils forcent également le déboursement des coûts fixes des éléments ayant été produits durant la période. Les contraintes (9.8) indiquent si le système fonctionne ou non dans chaque période, ce qui est le cas s'il est configuré (setup) pour produire un produit. Les contraintes (9.9) sont des restrictions de capacité définies pour chaque période $t \in H$. Ils garantissent que la quantité produite au cours de la période t ne dépasse pas la capacité disponible du système compte tenu de son état en termes de perte moyenne de capacité au cours de cette période. Les contraintes (9.10) déterminent les périodes pendant lesquelles les activités de MP ont lieu. Pour assurer la cohérence du problème, les contraintes (9.11) garantissent le fait que si la dernière action de MP, avant la période de temps $t+1$, a lieu dans la période $s < t$ et c'est la $k^{\text{ème}}$ action de maintenance, alors cette action de MP doit aussi être la $k^{\text{ème}}$ et la dernière à avoir lieu avant la période t . De même, les contraintes (9.12) assurent que la $k^{\text{ème}}$ MP a lieu dans une certaine période $t \geq k$, seulement si la $(k-1)^{\text{ème}}$ MP a eu lieu dans une certaine période s avant t ($s < t$).

Le problème d'optimisation **IPIImPMPP** est un problème d'optimisation non-linéaire et sa non-linéarité provient du terme $\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s c_{st}^k(\mathbf{y})z_{st}^k$ dans la fonction objectif et du terme $\sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \kappa_{st}^k(\mathbf{y})z_{st}^k$ dans les contraintes (9.9). Cependant, lorsque les périodes pendant lesquelles le système est configuré (setup) pour la production sont connues à l'avance, les termes de coût moyen de maintenance et de capacité moyenne de production disponible, pendant chaque période, peuvent être directement déterminées. Dans ce cas, le problème devient alors un problème d'optimisation linéaire intégrant un problème de dimensionnement de lot capacitif multiproduits avec des activités de MP. Dans ce qui suit, nous proposons une reformulation de ce modèle en tant que programme linéaire mixte-entier (MILP), qui peut ensuite être résolu en utilisant les solveurs disponibles tels que CPLEX et Gurobi.

3 Reformulation linéaire du problème IPIImPMPP

Comme indiqué ci-dessus, la formulation naturelle du problème **IPIImPMPP** est non-linéaire. Cependant, elle peut être reformulée et modélisée sous la forme d'un programme linéaire. Pour les variables du nouveau modèle, on considère la variable binaire $u_{st}(p, q)$, avec $p \leq s \leq t$ et $0 \leq q \leq t - s + 1$, telle que $u_{st}(p, q) = 1$ si un setup du système de production est réalisé p fois pendant l'horizon de planification $\{1, \dots, s - 1\}$ et q fois pendant les périodes $\{s, \dots, t - 1\}$. Nous définissons également la variable binaire $v_{st}^k(p, q)$, avec $p \leq s \leq t$, $k \leq s$ et $q \leq t - s + 1$, telle que $v_{st}^k(p, q) = 1$ si un setup du système de production est réalisé p fois pendant l'horizon de planification $\{1, \dots, s - 1\}$ et q fois pendant les périodes $\{s, \dots, t\}$, et la $k^{\text{ème}}$ maintenance a lieu à la période s . Finalement, nous définissons par $c_{st}^k(p, q)$ et $\kappa_{st}^k(p, q)$, respectivement, le coût moyen de maintenance et la perte moyenne de capacité de production du système pendant la période t , et ce lorsque la dernière action de MP avant la période t a eu lieu au début de la période s ($s \leq t$). Ces paramètres sont calculés tels que :

$$c_{st}^k(p, q) = \begin{cases} c_{PM}^k + c_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 (u + \alpha_k p \tau) du & \text{si } t = s, \\ c_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 (u + \alpha_k p \tau + q \tau) du & \text{si } s < t \leq T, \end{cases} \quad (9.13)$$

$$\kappa_{st}^k(p, q) = \begin{cases} \theta_{PM}^k + \theta_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 (u + \alpha_k p \tau) du & \text{si } t = s, \\ \theta_{CM}^k \int_0^\tau \beta_k r_0 (u + \alpha_k p \tau + q \tau) du & \text{si } s < t \leq T. \end{cases} \quad (9.14)$$

En exploitant les variables définies ci-dessus, la formulation linéaire **Re-IPIImPMPP** du problème original **IPIImPMPP** est formulée comme dans la page suivante. Conformément à cette formulation, les contraintes (9.16)-(9.22) restent inchangées par rapport aux contraintes (9.6)-(9.12). Les contraintes (9.23), (9.24) et (9.25) déterminent les valeurs des variables u et v . Les dernières contraintes (9.26) et (9.27) établissent une relation entre les variables y et z avec u et v . Cela signifie que si la $k^{\text{ème}}$ et dernière MP avant la période t a lieu dans la période $s \leq t$, et si l'opération de setup est réalisée p fois pendant l'horizon $\{1, \dots, s - 1\}$ et q fois pendant les périodes $\{s, \dots, t - 1\}$ alors $v_{st}^k(p, q) = 1$.

Le modèle **Re-IPIImPMPP** permet d'obtenir des solutions optimales au problème original **IPIImPMPP** de la planification intégrée de la production et de la MP imparfaite. Cependant, cette linéarisation génère une explosion du nombre de variables et de contraintes. Par conséquent, avec ce modèle, nous ne pourrions résoudre, dans un temps raisonnable de calcul, que des tailles modérées des instances du problème **IPIImPMPP**. En revanche, le modèle **Re-IPIImPMPP** fournit des solutions optimales ou des bornes inférieures. Par conséquent, il peut être utilisé pour évaluer les performances de toute heuristique proposée comme solution au problème original. Dans ce qui suit, nous proposons une méthode de résolution basée sur le principe de *fix-and-optimize*. Cette procédure permet de résoudre un modèle linéaire équivalent à **Re-IPIImPMPP** mais avec moins de variables et de contraintes.

Re-IPImPMPP :

Minimiser :

$$Z_{PPM}^{IP} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (f_{jt}x_{jt} + p_{jt}Q_{jt} + h_{jt}I_{jt}) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} c_{st}^k(p, q)v_{st}^k(p, q) \quad (9.15)$$

Sujet à :

$$Q_{jt} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.16)$$

$$Q_{jt} - \min \left\{ d_{tT}^j, \kappa_{max} \right\} x_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.17)$$

$$x_{jt} - y_t \leq 0, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.18)$$

$$\sum_{j=1}^N \rho_j Q_{jt} + \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} \kappa_{st}^k(p, q)v_{st}^k(p, q) \leq \kappa_{max}, \quad \forall t \in H \quad (9.19)$$

$$\sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s z_{st}^k = 1, \quad \forall t \in H \quad (9.20)$$

$$z_{st}^k - z_{s,t+1}^k \geq 0, \quad \forall k, s, t \in H, k \leq s \leq t \leq T-1, \quad (9.21)$$

$$\sum_{s=k-1}^{t-1} z_{s,t-1}^{k-1} - z_{tt}^k \geq 0, \quad \forall k, t \in H, 2 \leq k \leq T, k \leq t \quad (9.22)$$

$$\sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} p \cdot u_{st}(p, q) - \sum_{s'=1}^{s-1} y_{s'} = 0, \quad \forall s, t \in H, s \leq t \quad (9.23)$$

$$\sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} q \cdot u_{st}(p, q) - \sum_{s'=s}^{t-1} y_{s'} = 0, \quad \forall s, t \in H, t, s \leq t \quad (9.24)$$

$$\sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} u_{st}(p, q) = 1, \quad \forall s, t \in H, s \leq t \quad (9.25)$$

$$y_t + z_{st}^k + u_{st}(p, q) - v_{st}^k(p, q) \leq 2, \quad \forall k, s, t, p, q, p \leq s-1, q \leq t-s \quad (9.26)$$

$$\sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \sum_{p=0}^{s-1} \sum_{q=0}^{t-s} v_{st}^k(p, q) - y_t \leq 0, \quad \forall t \quad (9.27)$$

$$Q_{jt}, I_{jt} \geq 0, \quad x_{jt}, y_t, z_{st}^k, u_{st}(p, q), v_{st}^k(p, q) \in \{0, 1\} \quad \forall j \in P, s, t \in H, k \leq s \leq t.$$

4 Méthode de résolution

Si l'on connaît par avance les périodes pendant lesquelles la production est planifiée, c'est-à-dire si les valeurs des variables $(y_t)_{t \in H}$ sont fixées, on peut alors calculer le coefficient $c_{st}^k(\mathbf{y})$ et les paramètres $\kappa_{st}^k(\mathbf{y})$ deviennent constants. Par conséquent, le modèle d'optimisation **IPImPMPP** devient un programme linéaire. La méthode de résolution proposée dans ce chapitre tire profit de cette linéarisation et fournit une procédure de résolution basée sur le principe de *fix-and-optimize* plus efficace pour les grandes instances du problème **IPImPMPP**.

Étant donné un vecteur $\bar{\mathbf{y}}$ de setup de la production, nous définissons le vecteur (\bar{p}, \bar{q}) ayant comme composantes ceux données par $\bar{p}_{st} = \sum_{s'=1}^{s-1} \bar{y}_{s'}$ si $s \geq 2$, et 0 sinon; et $\bar{q}_{st} = \sum_{s'=s}^{t-1} \bar{y}_{s'}$ si $t \geq s+1$ et 0 sinon, pour chaque couple de période $s, t \in H$, tel que $s \leq t$. On définit le paramètre p_{jt}^E de coût tel que :

$$p_{jt}^E = \max_{t' \in H} \left\{ f_{jt'} + p_{jt'} + \sum_{s'=1}^T h_{js'} + \sum_{t''=1}^T \sum_{s'=1}^{t''} \sum_{k=1}^{s'} c_{s't''}^k(\bar{p}_{s't''}, \bar{q}_{s't''}) \right\}.$$

Nous considérons le problème $\mathbf{Re-IPImPMPP}_{FSV}(\bar{p}, \bar{q})$ obtenu à partir du problème $\mathbf{Re-IPImPMPP}$ en fixant le vecteur \bar{y} de setup et en relaxant les contraintes de l'équation (9.18) :

$\mathbf{Re-IPImPMPP}_{FSV}(\bar{p}, \bar{q})$:

$$Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}) = \text{Minimiser} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (f_{jt}x_{jt} + p_{jt}Q_{jt} + p_{jt}^E Q_{jt}^E + h_{jt}I_{jt}) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s c_{st}^k(\bar{p}_{st}, \bar{q}_{st})z_{st}^k \quad (9.28)$$

Sujet à : (9.29)

$$Q_{jt} + Q_{jt}^E + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.16)$$

$$Q_{jt} - \left(\sum_{t'=t}^T d_{jt'} \right) x_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in P, t \in H \quad (9.17)$$

$$\sum_{j=1}^N \rho_j Q_{jt} + \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s \kappa_{st}^k(\bar{p}_{st}, \bar{q}_{st})z_{st}^k \leq \kappa_{max}, \quad \forall t \in H \quad (9.19)$$

$$\sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s z_{st}^k = 1, \quad \forall t \in H \quad (9.20)$$

$$z_{st}^k - z_{s,t+1}^k \geq 0, \quad \forall k, s, t \in H, k \leq s \leq t \leq T-1, \quad (9.21)$$

$$\sum_{s=k-1}^{t-1} z_{s,t-1}^{k-1} - z_{tt}^k \geq 0, \quad \forall k, t \in H, 2 \leq k \leq T, k \leq t \quad (9.22)$$

$$Q_{jt}, Q_{jt}^E, I_{jt} \geq 0, x_{jt}, z_{st}^k \in \{0, 1\} \quad \forall j \in P, s, t \in H, k \leq s \leq t.$$

On peut observer que l'ajout des variables Q_{jt}^E pour $j \in P$ et $t \in H$, permet de résoudre le problème d'infaisabilité pour certaines valeurs du vecteur (\bar{p}, \bar{q}) . Le paramètre de coût p_{jt}^E est choisi de sorte que la variable Q_{jt}^E prenne une valeur positive seulement si le problème est infaisable. Le problème $\mathbf{Re-IPImPMPP}_{FSV}(\bar{p}, \bar{q})$ peut être résolu en tant que programme linéaire mixte-entier en utilisant les solveurs MILP disponibles tels que Cplex ou Gurobi. Les nombres de variables et de contraintes sont significativement réduits relativement à ceux du modèle $\mathbf{Re-IPImPMPP}$.

Par la suite, on note par $(Q_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}), x_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}), z_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}))$ et $Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q})$, respectivement, la solution optimale pour le problème $\mathbf{Re-IPImPMPP}_{FSV}(\bar{p}, \bar{q})$ ainsi que sa valeur coût correspondante. On notera également $(Q^{OPT}, x^{OPT}, z^{OPT})$ et Z_{OPT}^{PM} , respectivement, la meilleure solution obtenue et sa valeur coût correspondante telles que :

$$Z_{OPT}^{PM} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (f_{jt}x_{jt}^{OPT} + p_{jt}Q_{jt}^{OPT} + h_{jt}I_{jt}^{OPT}) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^s c_{st}^k \left(\sum_{j \in P}^{s-1} \max \{x_{js'}^{OPT}\}, \sum_{j \in P}^{t-1} \max \{x_{js'}^{OPT}\} \right) z_{st}^{k, OPT}. \quad (9.30)$$

Le pseudo-code de la procédure proposée est décrit dans l'algorithme (9.1). Deux remarques importantes peuvent être mentionnées. Toute d'abord, dans la plupart des cas où la procédure s'arrête, la solution résultante est une solution optimale réalisable. Ceci est principalement dû au fait que, si le nombre de setup dans la solution optimale du problème $\mathbf{Re-IPImPMPP}$ est m^* , la boucle "While" de l'algorithme (9.1) améliore cette solution pour déterminer pour chaque couple de période (s, t) , où $s \leq t$, les valeurs optimales. Deuxièmement, la procédure peut également être exploitée comme une heuristique qui s'arrête lorsqu'un critère d'arrêt prédéfini est satisfait.

Algorithm 9.1 Heuristique *Fix-and-Optimize*

```

1: for  $m = 1$  to  $T$  do
2:   for  $l = 1$  to  $m$  do
3:     for  $t = 1$  to  $T$  do
4:       for  $s = 1$  to  $t$  do
5:         let  $\bar{p}_{st} = \min \{l, s - 1\}$  et  $\bar{q}_{st} = \min \{m, t - s\}$ 
6:       end for
7:     end for
8:     Solutionner le problème Re-IPImPMPP $_{FSV}(\bar{p}, \bar{q})$ 
9:     Soit  $Z_{opt}^{PM} := Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q})$ , et
10:    Soit  $(Q^{OPT}, x^{OPT}, z^{OPT}) := (Q_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}), x_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}), z_{FSV}^{PM}(\bar{p}, \bar{q}))$ .
11:    while Optimal  $\neq$  Yes do
12:      for  $t = 1$  to  $T$  do
13:        for  $s = 1$  to  $t$  do
14:          Soit  $\bar{p}_{st}^* = \sum_{s'=1}^{s-1} \max_{j \in P} \{x_{js'}^{OPT}\}$  et
15:          Soit  $\bar{q}_{st}^* = \sum_{s'=s}^{t-1} \max_{j \in P} \{x_{js'}^{OPT}\}$ 
16:        end for
17:      end for
18:      Re-solutionner le problème Re-IPImPMPP $_{FSV}(\bar{p}^*, \bar{q}^*)$ 
19:      if  $Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*) < Z_{opt}^{PM}$  then
20:        Soit  $Z_{opt}^{PM} := Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*)$ , et
21:        Soit  $(Q_{OPT}, x_{OPT}, z_{OPT}) := (Q_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*), x_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*), z_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*))$ .
22:        Soit Optimal  $\neq$  Yes
23:      else  $\{Z_{FSV}^{PM}(\bar{p}^*, \bar{q}^*) \geq Z_{opt}^{PM}\}$ 
24:        Soit Optimal = Yes
25:      end if
26:    end while
27:  end for
28: end for

```

Instance	Solution obtenue par le modèle Re-IPImPMPP		Solution obtenue par l'heuristique de l'algorithme 1		Gap (%)
	Valeur	Temps CPU	Valeur	Temps CPU	
A2007	815.435	1.59	815.435	3.19	0.000
tr6_15	337,355.000	4606.00	337,355.000	4,339.00	0.000
tr6_30	677,888.000	20,533.36	677,948.000	2125.16	0.009
tr12_15	1,245,873.000	2810.00	1,245,920.000	2710.00	0.004
tr12_30	4,296,869.000	19,652.90	4,398,920.000	2088.91	2.375
tr24_15	2,502,277.000	1720.00	2,502,640.000	2920.00	0.015
tr24_30	8,305836.000	28,842.40	8,306,310.000	2031.02	0.006
set1ch	107,532.000	260.00	107,532.000	130.00	0.000

Table 9.2 – Résultats obtenus pour les instances résolues du problème.

5 Exemples numériques

Nous présentons et discutons les résultats des expériences effectuées sur un ensemble d'études de cas sélectionné de benchmarks de la littérature existante. En particulier, une collection d'instances de test provenant de LOTSIZELIB [227] est utilisée pour évaluer les performances du modèle d'optimisation **Re-IPImPMPP** et l'algorithme (9.1) proposé pour la planification intégrée de la production et de la MP imparfaite. Bien entendu, les instances du LOTSIZELIB ont été adaptées à la problématique étudiée en intégrant d'autres données d'entrée. Plus précisément, des données relatives à la fiabilité et à la maintenance du système de production sont générées et ajoutées aux données de production. Les instances de LOTSIZELIB sont notées par trN_T , où $N \in \{6, 12, 24\}$ est le nombre de produits et $T \in \{15, 30\}$ est le nombre de périodes, l'instance *set1ch* est empruntée de [228]. Les modèles MILP sont codés en AMPL et sont résolus en utilisant le solveur CPLEX 12.6 sur un processeur Intel (R) Core (TM) i7-3770, 3.40 GHz, 4 Core (s) et 32 Go de RAM fonctionnant sous Windows 7. Les temps CPU sont donnés en secondes.

A titre d'exemple, considérons l'instance du problème où la production doit être planifiée sur un horizon de 8 périodes. Pour les données de fiabilité et de maintenance, nous supposons que le système de production est sujet à une détérioration aléatoire et que le taux de défaillance est régi par une loi Gamma dont la densité de probabilité est définie par l'équation (9.4) avec les paramètres de forme $\gamma = 2$ et d'échelle $\eta = 0.5$. Les coefficients α_k de réduction d'âge et les coefficients β_k d'accroissement du taux de pannes, conformément au modèle de maintenance imparfaite utilisé, sont générés à partir des formules suivantes :

$$\alpha_k = \frac{k}{3k+7} \text{ et } \beta_k = \frac{12k+1}{11k+1}.$$

Les résultats obtenus sont reportés dans la table (9.2). La première colonne du tableau identifie les différentes instances du problème résolues ; la première d'entre elles (A2007) est empruntée des travaux de Aghezzaf et al. [218]. La deuxième colonne indique la valeur coût optimale obtenue pour chaque instance en résolvant le problème **Re-IPImPMPP**. Le temps de calcul requis est reporté dans la troisième colonne. La quatrième colonne de cette table indique la valeur coût de chaque instance obtenue par l'heuristique *Fix-and-Optimize* proposée (voir algorithme 9.1), et le temps de calcul résultant est indiqué dans la cinquième colonne.

Lorsque l'on compare les résultats de l'algorithme *Fix-and-Optimize* aux résultats du modèle **Re-IPImPMPP**, il est clair que l'algorithme proposé est efficace et fournit des solutions proches de l'optimum. En fait, d'après la table (9.2), les résultats obtenus révèlent que l'écart le plus élevé ne dépasse pas 2.4%. Cette écart est défini comme le ratio de la différence entre la valeur obtenue par l'heuristique proposée et celle obtenue de la résolution du modèle **Re-IPImPMPP** divisée par la valeur obtenue de la résolution du modèle **Re-IPImPMPP**. En termes de temps de calcul, même si l'heuristique peut nécessiter jusqu'à une heure et demi pour certaines instances, elle reste plus performante que la résolution directe du modèle **Re-IPImPMPP** qui requiert jusqu'à 8 heures pour atteindre l'optimalité pour la même instance.

6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une approche de la planification intégrée de la production et de la MP imparfaite, au niveau tactique, pour un système de production sujet à des défaillances aléatoires. Pour modéliser la MP imparfaite, un modèle de taux de pannes hybride est adopté. Tout d'abord, un modèle d'optimisation du problème est développé. Ce modèle est naturellement formulé comme un programme d'optimisation non-linéaire mixte en nombres entiers. Ensuite, une formulation linéaire mixte équivalente est proposée. A l'issue de cette linéarisation, le nombre de variables ainsi que les contraintes devient rapidement très important pour des instances moyennes du problème. Cela constitue une limitation de l'utilisation de la forme linéaire du problème original. Néanmoins, nous avons montré qu'elle peut être utilisée pour fournir une borne inférieure servant ainsi d'indice de performance et de base de comparaisons.

Une procédure itérative basée sur le principe de *fix-and-optimize* est ensuite proposée en prenant le soin de minimiser le nombre des variables et de contraintes. Le modèle reformulé et la procédure proposée sont testés sur un ensemble d'instances adaptées à partir de celles utilisées pour des problèmes de lot-sizing à capacité finie. Les résultats obtenus montrent que la procédure proposée procure d'assez bons résultats, malgré le temps CPU qui reste encore relativement important. Cette procédure itérative peut, cependant, être également utilisée comme une heuristique qui consiste à interrompre le processus de recherche de solutions lorsqu'un niveau de performance acceptable prédéfini est atteint.

Ce chapitre propose ainsi un premier modèle d'optimisation pratique pour résoudre le problème de la planification intégrée de la production et de la MP imparfaite, au niveau tactique. Il ouvre également des pistes pour l'amélioration du modèle d'optimisation proposé et pour le développement de nouvelles approches heuristiques de ce problème complexe d'optimisation. Le modèle proposé et sa reformulation fournissent également un premier instrument pour mesurer la performance des approches heuristiques à développer, avant qu'elles ne soient incorporées dans un module de planification intégrée d'un ERP.

Troisième partie

Projet de recherche et Conclusion générale

Chapitre 10

Projet de recherche

1 Introduction

Mon projet de recherche est organisé en deux volets. Le premier concerne mes perspectives des travaux de recherche à mener à court, à moyen et à long termes. Le second est dédié à mes perspectives de collaborations, de responsabilités et de rayonnement scientifiques.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques perspectives de recherche en lien avec les travaux exposés dans les trois axes de recherche. Certaines problématiques de recherche issues de ces perspectives sont déjà en cours d'investigation. Pour d'autres problématiques, les premiers résultats sont développés et peuvent faire l'objet de papiers de conférences internationales ou de propositions à soumettre pour des revues internationales.

Nos perspectives de recherche ont pour finalité de relever un ensemble de défis d'ordre scientifique, technologique, organisationnel et de développement durable. Chacun de ces défis soulève des problématiques liées à la classe et à la complexité des systèmes investis, à la qualité et à la quantité des données considérées, et aux interactions du système avec son environnement d'exploitation. Ces problématiques constituent la source et la préoccupation de nos travaux de recherche présents et futurs. En dépit des résultats obtenus, il reste encore de nombreuses pistes de recherche à investir surtout que nous vivons le nouvel ère de l'industrie mondiale ; l'ère de l'*Usine du Futur*, de l'*Industrie 4.0*, du *smart manufacturing*,... Dans ce contexte, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes et leur exploitation rationnelle est un challenge qui confère un rôle déterminant à la fonction maintenance qui rend les stratégies de maintenance plus complexes. Cette complexité est due à deux facteurs principaux. Le premier est inhérent à la nature des systèmes qui ne peuvent plus être considérés comme de simples entités réduites à un seul composant critique, mais doivent être considérés comme constitués d'une multitude de composants technologiquement hétérogènes, interdépendants et fonctionnellement connectés selon des structures complexes. Le deuxième facteur est lié au fait que, en plus des considérations techniques et économiques, ces stratégies doivent être élaborées en tenant compte plusieurs autres considérations telles que écologiques et énergétiques.

Mes travaux futurs de recherche s'inscrivent dans ce contexte. Leur développement tirera profit des résultats d'ores et déjà obtenus et peuvent être structurés autour de trois perspectives majeures :

1. La généralisation de nos travaux de recherche antérieurs en matière de développement de stratégies de maintenance dédiées à des systèmes complexes.
2. La planification intégrée des stratégies de production et de maintenance pour les systèmes de production multilignes.
3. Le développement de méthodes efficaces et efficientes de résolution des problèmes d'optimisation issus de nos travaux de recherche.

Le lecteur notera que nos perspectives des travaux de recherche sont en cohérence avec les thématiques de recherche développées au sein du département Logistique & Maintenance du LGIPM, et plus particulièrement, de l'équipe Management de la Production et de la Maintenance (MPM) dont je suis membre. Ces perspectives peuvent également être intégrées au sein de laboratoires de recherche dont les préoccupations scientifiques concernent la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.

2 Perspectives des travaux de recherche

2.1 Stratégies de maintenance des systèmes complexes

Cette perspective de recherche est composée d'un ensemble de trois parties majeures de problématiques dont les objectifs généraux consistent à développer des extensions de nos résultats des travaux de recherche des axes A_1 (Stratégies de maintenance des systèmes dans le cadre d'une chaîne logistique inverse et dans un contexte de développement durable) et A_2 (Modélisation et analyse des performances des systèmes complexes multi-mission). Ces extensions se matérialisent par :

- L'exploitation d'autres formalismes et outils mathématique de modélisation.
- La relaxation de certaines hypothèses contraignantes.
- La prise en compte des contraintes liées à la conception et à la taille des systèmes.
- La prise en compte des contraintes relatives aux profils des missions et à l'environnement d'exploitation.

Les trois parties de problématiques de recherche sont décrites comme suit.

Partie 1

Cette première partie concerne les travaux développés dans notre problématique P_1A_1 de l'axe de recherche A_1 intitulée "Stratégies de maintenance basées sur les données hétérogènes de durées de vie". Dans cette problématique, nos travaux de recherche partent de deux constats stipulant que la plupart des modèles de maintenance existants :

- Reposent sur l'hypothèse classique selon laquelle la distribution des durées de vie du système est bien caractérisée et a priori connue.
- Supposent que l'environnement dans lequel le système est exploité est statique et n'induit donc aucune modification des caractéristiques de fiabilité du système.

Ces hypothèses sont restrictives et ne reflètent pas la réalité. En effet, les systèmes de nombreux secteurs industriels accomplissent leurs missions dans des environnements d'exploitation hétérogènes, chacun d'eux est caractérisé par un degré de sévérité permettant de mesurer son impact sur les performances du système. A titre d'exemple, les moteurs utilisés dans les engins de perforation et dont le processus de dégradation dépend de la charge mais également des conditions climatiques d'exploitation. Dans d'autres industries, les systèmes de production sont d'abord exploités dans un environnement et ensuite transférés à un autre environnement d'exploitation pouvant être plus ou moins sévère que le premier. Ne pas tenir compte de la variabilité et l'hétérogénéité des conditions d'exploitation des systèmes peut compromettre les décisions en maintenance et en production avec des conséquences néfastes sur les plans économique, humain et écologique.

Dans ce cadre, nos premiers travaux ont permis de développer une approche statistique d'optimisation des stratégies de maintenance pour un système soumis à des défaillances aléatoires. Le système étant supposé avoir déjà été exploité pendant un certain intervalle de temps dans un environnement donné et ensuite transféré dans un nouvel environnement pour une autre exploitation. La stratégie de maintenance considérée est dite de type âge. Elle consiste à remplacer le système soit lorsque son âge atteint une valeur T (remplacement préventif) soit quand une panne se produit (remplacement correctif) ; la variable de décision étant la valeur T qui est la date de la maintenance préventive. L'approche proposée permet de prendre en compte la variabilité et l'impact des conditions d'exploitation sur les performances du système. En plus, elle relaxe l'hypothèse selon laquelle les distributions des durées de vie du système

sont connues, mais qu'elles sont plutôt estimées à partir des données des durées de vie collectées dans chaque environnement d'exploitation.

Nous rappelons aussi que l'ensemble des résultats déjà obtenus sont basés sur l'hypothèse que les systèmes étudiés ne sont pas réparables. Dans ce cas, un système est réduit à un seul composant dit composant critique. En plus, seuls deux environnements d'exploitation sont considérés.

Dans cette problématique de recherche, à court terme, nos travaux ont pour objectifs de développer d'autres modèles statistiques d'optimisation des stratégies de maintenance imparfaite en considérant plusieurs environnements d'exploitation de durées finies. En plus des coûts de maintenance, d'autres coûts tels que de transfert et d'exploitation du système seront pris en compte.

A moyen et à long termes, nos travaux futurs considérerons des systèmes multi-composant qui accomplissent leurs missions sur un horizon fini composé de plusieurs environnements d'exploitation différents. Les systèmes visés sont complexes et peuvent être composés de plusieurs sous-systèmes. Ces derniers sont eux-mêmes formés de plusieurs composants, fonctionnellement connectés pour l'accomplissement de la mission pour laquelle le système a été conçu. Dans ces travaux nous nous intéresserons aux systèmes où un composant peut être modélisé par un ensemble d'états dont chacun est caractérisé par un niveau de performance donné (*multi-state systems* : MSS). Nous considérerons aussi le cas où les composants du système sont fonctionnellement connectés selon une structure complexe (structure en réseaux).

Dans cette partie de nos travaux futurs, nous visons également à développer des stratégies de maintenance orientées données en considérant que les lois de dégradations ou des durées de vie des composants du système sont inconnues et doivent être modélisées et estimées à partir des données collectées. En plus des temps de défaillances et de réparation, ces données sont représentatives des relations de dépendance entre les composants du système. Les données sont considérées de nature hétérogène en conséquence de la variabilité des conditions d'exploitation mais aussi à une possible exploitation distribuée du système. Une telle exploitation concerne les systèmes dont des groupes de composants sont répartis sur plusieurs sites géographiques (structure en réseaux) avec des paramètres climatiques et des sollicitations opérationnelles distinctes.

Partie 2

La seconde partie des problématiques futures a pour objectif général de développer des approches de modélisation, d'analyse et d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes complexes où le modèle théorique des durées de vie ou de dégradation des composants est supposé connu à l'avance. Dans cette seconde partie de recherche, nos travaux s'inscrivent dans la continuité des travaux de recherche développés dans le cadre de la troisième problématique de recherche du premier axe (A_1). Il s'agit de la problématique qui aborde l'impact des opérations de remanufacturing sur les stratégies de maintenance des systèmes.

Dans ce contexte, les systèmes considérés peuvent être neufs ou usagés (SHS/EoL/EoU). Ces derniers sont récupérés via des circuits établis dans une chaîne logistique à boucle fermée. Dans cette partie de nos travaux de recherche, les problématiques que nous aborderons sont décrites par la suite.

A court et moyen termes, les stratégies de maintenance que nous visons peuvent être soit des stratégies basées sur le temps (TBM), soit des stratégies conditionnées par la dégradation des composants (CBM), soit encore des stratégies hybrides basées sur la combinaison des deux premières. Dans la continuité de nos travaux antérieurs, le développement de telles stratégies prendra en compte les relations de dépendance (économique, stochastique et structurelle) entre les composants du système, les conditions environnementales d'exploitation ainsi que les contraintes écologiques.

La problématique des pièces de rechange dans le développement de modèles de stratégies de maintenance est l'une de nos préoccupations de recherche à court terme. Cette problématique sera abordée dans un contexte de remanufacturing et de multi-composant en tenant compte des facteurs et incertitudes liés à la qualité de telles pièces et à leur disponibilité dans le marché. Nous

avons mentionné, lors de l'exposé de nos travaux de recherche, que le remanufacturing est un maillon de la chaîne logistique inverse qui contribue à réduire les risques écologiques et de consommation d'énergie.

A court et moyen termes, il s'agit de proposer des extensions de nos travaux antérieurs sur l'utilisation mixte des pièces de rechange neuves et remanufacturées dans les stratégies de maintenance. Notre finalité est le développement de nouvelles approches de maintenance des systèmes complexes permettant une optimisation technico-économique mais aussi performantes des points de vue écologique et énergétique. Les modèles d'optimisation que nous préconisons consistent à fournir des décisions conjointes des stratégies de maintenance et des stocks des pièces de rechange. Nous nous focaliserons également sur l'étude de l'impact des incertitudes sur les solutions obtenues à partir des modèles développés.

La modélisation de ces incertitudes est un verrou scientifique qui faudra lever par le choix judicieux des formalismes et des outils appropriés (probabilité, logique floue, ...) de modélisation des événements incertains. Cette étape de développement permettra d'affiner nos approches et d'assurer la robustesse des modèles d'optimisation développés. Cela aura pour conséquence de réduire le risque d'une décision inappropriée en maintenance. Un tel risque pourrait, en effet, engendrer des conséquences sur les plans matériel, économique, humain mais aussi environnemental.

A long terme, nos travaux de recherche aborderont des problématiques liées à l'obsolescence des technologies. Nous nous intéressons à développer des modèles d'aide à la décision qui intègrent, en plus des données de fiabilité et de maintenance des composants du système, l'ensemble des données relatives à l'évolution et à l'obsolescence des technologies. Dans nos travaux de recherche nous étudierons l'impact d'une telle obsolescence, et des décisions stratégiques d'investissement qui en résultent, sur les décisions en maintenance. La finalité est de développer un outil d'aide à la décision permettant aux industriels de s'inscrire dans une démarche globale de veille technologique tout en permettant d'anticiper sans subir l'obsolescence des technologies et saisir l'opportunité qu'engendre un changement technologique pour une meilleure gestion des installations.

Partie 3

Les travaux menés dans cette troisième partie de nos perspectives de recherche sont particulièrement dédiés aux systèmes complexes conçus pour exécuter une séquence qui alterne des missions et des arrêts programmés. Il s'agit des systèmes exposés dans notre axe de recherche A_2 intitulé "modélisation et analyse de performance des systèmes complexes multi-mission". Afin d'améliorer les performances du système pour exécuter sa prochaine mission, les composants du système peuvent être maintenus pendant les arrêts planifiés. Cependant, les ressources en maintenance sont souvent limitées en termes des durées allouées aux arrêts, du nombre d'opérateurs en maintenance, et de budget. De ce fait, seul un nombre limité de composants sont sélectionnés pour subir des opérations de maintenance. Une telle stratégie de maintenance est dite maintenance sélective. La majorité des travaux de recherche conduits dans ce domaine se base sur l'hypothèse que toute les actions de maintenance, effectuées sur les composants du système, sont réalisées par un seul réparateur.

Nos travaux récents visent à relaxer cette hypothèse en généralisant les résultats existants au cas où plusieurs réparateurs sont disponibles. Le problème de la maintenance sélective devient ainsi un problème plus réaliste mais avec une complexité importante. En effet, en plus des décisions concernant la sélection des composants et des niveaux de maintenance appliqués à ces composants, s'ajoute une décision supplémentaire relative au problème d'affectation des ressources en maintenance.

D'autres travaux en cours traitent des stratégies de maintenance sélective dans un contexte de sous-traitance. Nous considérons le cas de plusieurs sous-traitants et nous étudions les stratégies de contrats de maintenance sur la base du choix des sous-traitants. Nous proposons d'adapter les modèles issus des problèmes du choix de fournisseurs à nos travaux sur l'optimisation de la maintenance sélective. Nous proposons également d'établir des modèles d'optimisation multicritère permettant d'élaborer des solutions efficaces pour les décisions en maintenance conjointement avec celles concernant le choix des sous-traitants.

A court terme, nous développerons des extensions de nos travaux aux problèmes de la maintenance

sélective dans le cas où le système doit exécuter plus d'une mission. Ainsi, les décisions en maintenance seront de trois dimensions : 1) Quel composant doit-on maintenir? 2) Quel niveau de maintenance devrait être appliqué? 3) A quelle moment cette action de maintenance devrait être exécutée? Cette dernière dimension permet d'identifier l'arrêt programmé auquel une action de maintenance devrait être planifiée. Dans cette problématique, nous considérons le cas le plus général où l'horizon est composé d'une séquence qui alterne des missions et des arrêts programmés et dont les durées sont aléatoires. Les modèles d'optimisation à développer visent à résoudre, d'une manière globale, le problème de la maintenance sélective en tenant compte du profil et des contraintes spécifiques à chaque mission. Dans ces travaux, nous nous intéresserons également aux problèmes de la maintenance sélective des systèmes multi-état où un composant peut être lui même modélisé par un ensemble d'états dont chacun est caractérisé par un niveau de performance donné. Les résultats obtenus seront largement exploités dans nos travaux à moyen et à long termes.

A moyen et à long termes, nos travaux futurs s'inscrivent dans un cadre de soutien logistique intégré. Nous proposons de développer des approches de conception des systèmes complexes en tenant compte des contraintes liées à la maintenabilité et à la maintenance des composants du système, mais également à des contraintes écologiques et de consommation d'énergie. Nos travaux visent à tenir compte explicitement d'autres contraintes liées au profils des missions à réaliser par le système, à la maintenabilité (contraintes structurelles) et la maintenance des composants, à l'usage des pièces reconditionnées ou remanufacturées. C'est dans ce projet de recherche que s'inscrit une partie des travaux de thèse de doctorat de Mme Kenza Chaabane (2017-2020).

2.2 Planification intégrée des stratégies de production et de maintenance

Dans cette seconde perspective de recherche, nos travaux ont pour finalité de proposer des extensions à nos travaux développés autour de l'axe A_3 qui concernent la planification intégrée des stratégies de production et de maintenance des systèmes de production.

Dans cette perspective de recherche, les travaux en cours ont investi le problème d'optimisation conjointe de la qualité de la production et de la maintenance conditionnelle (CBM) dans un système de production mono-produit et sujet à une dégradation stochastique. Nous modélisons la dégradation comme un processus Gamma. Un tel processus est largement exploité dans les travaux de recherche comme le démontre la littérature existante sur les problèmes de la maintenance conditionnelle. Dans ce travail de recherche, nous supposons que le système est soumis à des inspections qui permettent d'évaluer son état de dégradation. Le système est considéré comme étant en "mode de défaillance" lorsque son niveau de dégradation dépasse un seuil prédéterminé. La production d'éléments non-conformes, ceux qui sont produits pendant la période où la dégradation dépasse le seuil de spécification, est explicitement prise en compte dans l'étape de modélisation. Pour optimiser les coûts de maintenance préventive tout en réduisant la production d'articles non-conformes, la dégradation du système doit être surveillée de manière optimale afin que la maintenance préventive soit effectuée à des intervalles de temps appropriés. Dans ce travail de recherche, l'objectif étant de développer un modèle d'optimisation intégrée capable de déterminer conjointement le cycle d'inspection optimal et le niveau de seuil de dégradation, au-delà desquels une maintenance préventive doit être effectuée, tout en minimisant la somme des coûts d'inspection et de maintenance.

A court terme, un autre travail sera mené dans le cadre d'une collaboration avec des collègues de l'Université de Gand (Belgique). Dans ce travail de recherche, nous considérons un problème de lot-sizing pour un système de production à dégradation stochastique et sujet à une stratégie de maintenance conditionnelle (CBM). Nous considérons qu'une inspection périodique est effectuée pour observer les niveaux de dégradation du système. Si le niveau de dégradation dépasse le seuil de défaillance, des éléments non-conformes (au sens que leur qualité n'est pas conforme aux exigences d'un standard donné), sont produits et un coût de maintenance correctif est encouru. Des actions de maintenance préventive sont effectuées pour réduire les risques de défaillance. En considérant l'intervalle d'inspection, le niveau de maintenance préventive et la taille du lot de production comme variables de décision, un modèle intégré est développé pour minimiser le coût moyen par unité de temps (coût asymptotique calculé sur

un horizon de planification infini) comprenant les coûts de setup, d'inspection et de maintenance, ainsi que le coût de production des pièces non-conformes.

A moyen terme, nos travaux de recherche visent à considérer, au lieu d'un système de production monolithique, des systèmes composés de plusieurs machines ou lignes de production. Les machines ainsi considérées sont sujettes à des défaillances aléatoires. Les modèles de défaillance considérés sont des modèles de durées de vie ou des modèles de dégradation. Dans cette perspective de recherche, plusieurs problématiques feront l'objet de nos investigations. En se basant sur nos travaux antérieurs ainsi que sur les résultats de nos travaux futurs sur les stratégies de maintenance des systèmes complexes, l'objectif étant de développer des approches de modélisation, d'analyse et de d'aide à la décision quant à la planification intégrée des stratégies de production et de maintenance des systèmes de production multiligne, multiproduit et sujets à des défaillances aléatoires. Dans ce contexte, et à titre d'exemples, des approches seront développées pour tenir compte des dépendances (économique, stochastique) des lignes de production. Nous aborderons la problématique de l'impact de la dégradation des lignes de production sur la qualité de la production, et développerons des approches incluant des possibilités de ramanufacturing des produits jugés non-conformes. Nos travaux futurs aborderont également la problématique des pièces de rechange tout en tenant compte de l'usage possible des pièces de rechange reconditionnées.

A long terme, nos travaux s'inscrivent dans l'ère du *smart manufacturing* et de l'*Industrie 4.0*, et contribuerons à alimenter les piliers de l'industrie du futur, notamment ceux liés aux ressources, au développement durable et aux stratégies de maintenance intelligente.

S'agissant des stratégies de maintenance intelligente, nous exploiterons nos résultats développés dans nos travaux antérieurs et ceux que nous développerons dans le cadre de nos perspectives de recherche décrites dans l'axe 1. Nos investigations se focaliseront également sur les problématiques traitant de l'impact des processus de production et des activités de maintenance sur la qualité de l'environnement par la prise en compte, par exemple, de l'empreinte carbone et de la pollution. Seront également abordées d'autres problématiques liées au partage et à la mutualisation des ressources aussi bien en production qu'en maintenance.

2.3 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Dans nos travaux de recherche l'aspect décisionnel est omniprésent tant au niveau inspection/maintenance qu'aux niveaux conception et production. En outre, de la majorité des problématiques de recherche traitées résultent des problèmes d'optimisation non-linéaires ou appartenant à la classe des problèmes NP-difficiles. Pour des tailles raisonnables de tels problèmes, les méthodes exactes issues de la recherche opérationnelle sont capables de fournir des solutions optimales. Cependant, le temps de calcul peut augmenter de manière exponentielle avec la taille du problème considéré.

Partant de ce constat, et dans l'objectif de permettre une meilleure prise de décision dans des délais raisonnables, notre troisième perspective de recherche vise à mettre en place des méthodes approchées de résolution issues de l'intelligence artificielle avec une possible combinaison (hybridation) avec des méthodes de recherche opérationnelle.

Dans les cas où l'optimalité n'est pas requise, les méthodes approchées, telles que les heuristiques et les métaheuristiques, sont des alternatives intéressantes de résolution des problèmes d'optimisation complexes et de grande taille. Ce constat est démontré par la quantité considérable de travaux de recherches apparus dans la littérature où des algorithmes sont développés en exploitant les métaheuristiques comme méthodes de résolution des problèmes d'optimisation. Le développement de ce domaine de recherche est lié principalement au contexte réel où les problèmes d'optimisation deviennent de plus en plus complexes à traiter. Ces méthodes sont composées de différent types d'algorithmes tels que de recherche locale (recuit simulé, grand déluge, recherche Tabou, ...) et évolutionnistes (génétique, colonies de fourmis, ...).

A court et à moyen termes, l'objectif de ces travaux de recherche est de développer des méthodes d'optimisation robustes permettant de prendre les meilleures décisions en ce qui concerne les problèmes :

- Des stratégies de maintenance qu’elles soient des stratégies basées sur le temps (TBM) ou sur l’état de santé des composants du système (CBM).
- De conception intégrée des systèmes. Dans ce cas, les décisions de conception et de stratégies de maintenance des composants sont élaborées conjointement.
- Des stratégies de maintenance et de production. Dans ce cas, les décisions conjointes concernent les planifications de la production et de la maintenance.

Dans le cadre de cette perspective de recherche, et pour chacun des problèmes d’optimisation issus de nos travaux de recherche, nous envisageons de procéder en deux étapes. La première étape consiste à analyser les différentes méthodes d’optimisation issues de la littérature et, pour chaque problème d’optimisation, sélectionner la méthode convenable. Sinon, nous envisagerons de développer de nouvelles méthodes. La deuxième étape consiste à tester les méthodes développées sur des instances de problèmes existants dans la littérature ou sur des instances que nous générerons de manière aléatoire.

3 Perspectives de collaboration, de responsabilité et de rayonnement scientifiques

La réalisation de nos perspectives de recherche reposera sur nos collaborations actuelles avec des collègues universitaires aux niveaux national et international. Nous envisageons de consolider et de renforcer ces collaborations par d’autres collaborations aussi bien académiques qu’industrielles. En plus de ces perspectives de collaborations, nous avons l’objectif d’assumer des responsabilités scientifiques et travailler sur des activités permettant un rayonnement à l’échelle nationale comme à l’échelle internationale. Toutes ces perspectives seront exposées dans la suite de ce chapitre.

3.1 Perspectives de collaborations scientifiques

Depuis mon recrutement en qualité de MCF, j’ai pu développer des collaborations en recherche scientifique avec des collègues académiques de France comme de l’étranger. Dans nos travaux futurs de recherche, nous avons l’objectif de renforcer ces collaborations et d’investir sur d’autres collaborations. Dans ce cadre, nous avons l’objectif et la détermination de monter des projets de recherche et développer des travaux d’encadrement de masters, de thèses de doctorat en cotutelle et des thèses de doctorat CIFRE.

3.1.1 Collaborations à l’échelle internationale

- Nous continuerons nos collaborations avec Prof. E.H. Aghezzaf, du Department of Industrial Systems Engineering and Product Design, de l’Université de Gand en Belgique. Ses principaux domaines de recherche sont l’optimisation et la simulation de systèmes, l’analyse de données, l’ingénierie des réseaux d’approvisionnement et de services. Nous continuerons à développer nos travaux de recherche communs, en particulier, ceux qui relèvent des stratégies intégrées de production et de maintenance des systèmes de production. Nous avons d’ores et déjà engagé une thèse en co-encadrement (thèse de Monsieur Le Tam 2013-2018) et une autre en cotutelle à partir de 2019. Dans ce cadre, nous avons pu initier une nouvelle collaboration avec Dr. D. Claeys du Department of Industrial Systems Engineering and Product Design, de l’Université de Gand. Les travaux de recherche de Dr. Claeys incluent l’ingénierie de la maintenance et l’analyse de modèles de files d’attente à temps discret et leurs applications à la recherche opérationnelle pour les systèmes de télécommunications.
- Nous renforcerons notre collaboration avec Dr. C. Diallo et Dr. U. Venktadri, Professeurs Associés au Department of Industrial Engineering de l’Université de Dalhousie de Halifax au Canada. Les travaux de de recherche de Dr. Diallo concernent l’ingénierie et la gestion de la fiabilité et de la maintenance, la conception et l’optimisation des chaînes d’approvisionnement en boucle fermée, la conception pour la durabilité et le remanufacturing.

Les travaux de recherche de Dr. Venkatadri concernent la recherche opérationnelle appliquée à la planification des installations et la gestion de la chaîne d’approvisionnement, le contrôle de la qualité et les systèmes d’information.

Nos intérêts communs en recherche concernent le développement des stratégies de maintenance pour des systèmes complexes en tenant compte des aspects de remanufacturing et de développement durable.

Ma nomination récente (depuis juin 2018 et est en cours d’officialisation) en tant que Professeur Associé (*Adjunct Professor*) au Department of Industrial Engineering de l’Université de Dalhousie est un moyen permettant de renforcer davantage les travaux de collaboration avec Dr. Diallo et Dr. Venktadri. En effet, cette nomination permettra de faciliter la mise en place de travaux d’encadrement des masters et des thèses de doctorat. Ce poste permettra également de faciliter mes visites de travail à l’Université de Halifax. En plus des travaux de recherche, il est question d’organiser des conférences plénières avec les collègues de l’Université de Halifax, particulièrement ceux du département d’accueil. Je compte répondre favorablement à des invitations pour intervenir auprès des étudiants pour des cours en fiabilité et en maintenance.

- Nous continuerons et renforcerons notre collaboration avec Prof. D. Ait-Kadi, Professeur au département de Génie mécanique de l’Université Laval. Ses activités de recherche relèvent principalement de la fiabilité et la gestion de la maintenance des systèmes de production de biens et de services. Nous aborderons des problèmes liés notamment à la gestion de la maintenance dans un contexte de remanufacturing, en particulier, et de développement durable, d’une manière générale.
- Récemment, nous avons relancé des travaux de collaboration avec Dr. N. Nahas, Professeur Assistant au Systems Engineering Department de King Fahd University of Petroleum & Minerals (KFUPM) en Arabie Saoudite. Les travaux de recherche de Dr. Nahas concernent la conception des systèmes de production, la fiabilité et la maintenance, les méthodes approchées (métaheuristiques) d’optimisation, et les l’optimisation discrète. Nos travaux de collaboration concernent, plus particulièrement, nos perspectives de recherche décrites dans l’axe 3. Il s’agit de développer des méthodes d’optimisation robustes pour des problèmes liés à nos intérêts communs en recherche, notamment en conception et en maintenance des systèmes de production.
- Nous envisageons d’initier une collaboration avec Dr. Perera Lokukaluge Prasad, Professeur à The Arctic University en Norvège. Les travaux de recherche du Dr. Perera Prasad incluent, entre autres, le contrôle des systèmes maritimes et offshore, l’apprentissage automatique et l’intelligence artificielle, la maintenance conditionnelle ainsi que l’efficacité énergétique. Lors de notre rencontre au Workshop on *Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology* (AMEST) organisé à Biarritz en 2016, nous avons discuté sur la possibilité de collaborer en recherche et de travailler sur des sujets concernant l’évaluation de performances et l’optimisation des stratégies de maintenance des systèmes offshore, en tenant compte des risques liés au report des actions de maintenance (maintenance retardée) sur les installations. Un tel report peut être engendré par des conditions climatiques sévères.
- Nous envisageons également de lancer une collaboration en recherche avec Dr. O. Kamach, Professeur habilité à l’École Nationale des Sciences Appliquées de Tanger (ENSAT) au Maroc. Les travaux de recherche de Dr. Kamach s’articulent autour de la synthèse de contrôleurs des systèmes à événements discrets (SED) et de l’ordonnancement. C’est sur des travaux en ordonnancement des tâches de maintenances et de production en présence de perturbations (indisponibilité des machines) que s’orienteront nos travaux de collaboration. Notre collaboration avec Dr. Kamach avait été lancée à la suite d’un séjour scientifique en tant que Professeur invité au sein de notre laboratoire LGIPM en 2013. Depuis, nous avons pu organiser la conférence internationale CPI à Tanger en 2015.

3.1.2 Collaborations à l’échelle nationale

Mon projet de collaborations au niveau national inclut mes perspectives de collaborations avec des collègues en local. En effet, j’ai pour objectif de consolider mes collaborations avec des collègues du

LGIPM : Dr. M. Dahane, Dr. S. Dellagi de l'équipe Management de la Production et de la maintenance (MPM) et Prof. Rezg de l'équipe Risk Analysis on Decision making (RIAD). Les deux équipes appartiennent au même département Logistique & Maintenance.

Les travaux de recherche de Dr. Dahane couvrent les problématiques issues de la fiabilité et de la maintenance intégrée à la production, du remanufacturing ainsi que de la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables (Reconfigurable Manufacturing Systems : RMS). C'est sur l'évaluation de la fiabilité et la maintenance de cette classe de systèmes que je proposerai de monter un projet de recherche. Avec Dr. Dahane, et en collaboration avec d'autres chercheurs d'autres laboratoires, nous avons déjà proposé un projet ANR relevant de l'énergie éolienne basée sur le remanufacturing. Nous avons ensemble convenu de réviser ce projet pour une seconde soumission. Nos intérêts communs de recherche portent sur les parties 1 et 2 de l'axe 1 de mes perspectives de recherche.

Les travaux de recherche de Dr. Dellagi et Prof. Rezg couvrent également des problématiques issues de la maintenance et de la production. Nous avons collaboré pour la production d'un livre intitulé "Joint Optimization of Maintenance and Production Policies" édité par Wiley-ISTE. Avec Prof. Rezg, nous avons co-encadré une thèse de doctorat (thèse de Mr. Chouikhi) et avons travaillé sur des problématiques liées à la maintenance conditionnelle tenant compte de les conditions d'exploitation du système et son impact sur l'environnement. Nous avons l'objectif de continuer sur cette problématique de recherche et collaborer sur les aspects d'encadrement de thèses de doctorat. Avec Dr. Dellagi, nous co-encadrons une thèse de doctorat (thèse de Mme Chaabane) depuis septembre 2017. Cette thèse porte sur des problématiques liées à la maintenance sélective des systèmes complexes qui opèrent une série de missions alternée avec des arrêts programmés. Cette problématique relève, en particulier, de la partie 3 de l'axe 1 de mes perspectives de recherche.

A l'échelle nationale j'envisage de consolider mes projets de collaboration avec Dr. M. Sahnoun, enseignant-chercheur au Centre de l'Enseignement en Sciences de l'Ingénieur (CESI). Ses travaux de recherche portent sur la modélisation et l'optimisation des performances des systèmes industriels. Avec Dr. Sahnoun, et en collaboration avec d'autres chercheurs d'autres laboratoires, nous avons proposé un projet ANR. Il s'agit du projet relevant de l'énergie éolienne basée sur le remanufacturing. Nous rappelons que ce projet ANR concerne les parties 1 et 2 de l'axe 1 de nos perspectives de recherche. Comme nous l'avions mentionné, nous avons l'objectif d'améliorer cette proposition et de la soumettre pour une seconde évaluation.

Durant mes années d'exercice en tant que MCF, j'ai pu identifier, à l'échelle nationale, les laboratoires de recherche dont les thématiques de recherche se rapprochent de mes préoccupations en recherche scientifique. À mon HDR, j'ai pour objectif, à court et moyen termes, d'établir des contacts avec des collègues de certains laboratoires et étudier les possibilités de mise en place de collaborations. Parmi ces laboratoires :

- Le laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble (G-SCOP). le contact sera établi, en particulier, avec l'équipe de recherche Gestion et Conduite des Systèmes de Production (GCSP). Les travaux de recherche de l'équipe GCSP consistent à développer des modèles d'optimisation des performances des systèmes de production de bien et de service. Les modèles développés prennent en considération des incertitudes issues de pannes ou de l'environnement du système de production. Nos travaux sur le développement des stratégies de maintenance et de conception intégrée tenant compte des incertitudes liées à l'environnement d'exploitation peuvent être un projet de collaboration avec l'équipe GCSP.
- Le Laboratoire de Modélisation et Sécurité des Systèmes (LM2S) de l'UTT. Le LM2S mène des recherches dans les domaines de la sûreté de fonctionnement, tant en phase de conception (fiabilité prévisionnelle) qu'en phase opérationnelle (maintenance), et de la surveillance des processus. Il aborde ces questions avec des approches essentiellement basées sur les probabilités et les statistiques. Ces problématiques de recherche s'inscrivent pleinement dans nos axes de recherche. De plus, certains de nos travaux font références à ceux développés par des chercheurs du LM2S,

notamment en maintenance conditionnelle.

- Le Laboratoire d’Optimisation des Systèmes Industriels (LOSI) de l’UTT. Les travaux de recherche menés au sein du LOSI ont pour objectif de développer des modèles et outils d’aide à la décision pour améliorer performances des systèmes industriels. Ces modèles concernent aussi bien la phase conception que la phase à l’exploitation. Le LOSI aborde également des problématiques liées à la planification intégrée de la production et de la maintenance. C’est sur ces problématiques, en particulier, que nous pourrions monter des projets de collaboration. D’autres projets peuvent être montés, avec la collaboration de mon collègue Dr. Dahane, sur les problématiques liées aux systèmes manufacturiers reconfigurables.
- Le département Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques complexes (ISET) du centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN). Les travaux de recherche menés au sein du département ISET ont pour objectif le développement des méthodologies, des modèles et des outils pour les processus de prises de décision nécessaires pour le contrôle et le pilotage des flux mais aussi de sûreté de fonctionnement. Les systèmes considérés sont complexes et relèvent de l’industrie manufacturière, de l’environnement, de l’énergie ... Le département ISET développe une thématique de recherche intitulée ”Sûreté de fonctionnement, PHM et maintenance (S-PHM2)”. Cette thématique aborde des problématiques, particulièrement, en maintenance conditionnelle et en PHM. C’est sur ces problématiques qu’un projet de collaboration peut être initié. Ces problématiques constituent, en effet, une part considérable de mes travaux de recherche présents et futurs.
- L’équipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs (SDC) du laboratoire Génie de Production de l’ENI de Tarbes. Par la mise en œuvre des ressources physiques et des acteurs humains, l’équipe SDC mène des activités de recherche qui relèvent de l’organisation, l’amélioration et du pilotage des systèmes de production de biens et de services. Deux thématiques de recherche sont développées par cette équipe de recherche. La première aborde les problèmes liés à l’ingénierie des connaissances, au retour d’expérience dans les processus et à la gestion opérationnelle des compétences. La seconde couvre des problèmes de recherche qui relèvent de la gestion des risques, du PHM et de la collaboration dans les chaînes logistiques. Mes travaux de recherche partagent plusieurs problèmes communs avec les travaux de l’équipe SDC, notamment ceux liés, d’une part, à l’ingénierie des connaissances et au retour d’expérience, et qui sont déterminant dans l’estimation des lois des durées de vie ou de dégradation, et d’autres part au PHM et aux chaînes logistiques. C’est sur ces problématiques qu’une collaboration en recherche peut être amorcée.

3.2 Perspectives de responsabilité et rayonnement scientifiques

Récemment, après évaluation de ma candidature, j’ai été nommé, pour une période de 3 ans (juin 2018 - juin 2021), membre expert du groupe Génie Civil, Industriel et des Systèmes (Groupe référencé 1509) du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada (*Natural Sciences and Engineering Research Council* : NSERC). A l’instar de l’Agence Nationale de la Recherche (ANR) en France, le CRSNG est un organisme du gouvernement du Canada qui octroie des subventions pour des projets de recherche et de formation en sciences naturelles et en génie. Il a pour rôle de promouvoir et d’appuyer la recherche. Ma responsabilité consiste à fournir une expertise quant à un ensemble de projets de recherche à subventionner. L’attribution des subventions est discutée lors des séances plénières organisées dans les locaux du CRSNG à Ottawa au Canada. Cette responsabilité renforcera mon rayonnement et ma reconnaissance en tant qu’expert, à l’échelle internationale, en génie des systèmes industriels. Elle offre également l’opportunité de rencontrer, lors des séances plénières d’évaluation des projets, des chercheurs de renommée internationale dans les domaines de recherche en génie industriel.

J’ai pour objectif de m’investir davantage dans les comités scientifiques et d’organisation des conférences internationales. Mon expérience passée me permet de mener à bien ces responsabilités. En effet, j’ai pu participer à un certain nombre de comités scientifiques et d’organisations, j’ai proposé plusieurs sessions spéciales dans des conférences telles que IFAC et IEEE. En collaboration avec des

collègues académiques et des partenaires industriels, je continuerai à proposer des sessions thématiques dans des conférences internationales ciblées. J'ai pour objectif de prendre la responsabilité d'organiser des workshops ou des conférences internationales dont les thématiques de recherche sont connexes à la mienne.

Durant ces années passées en tant que MCF, j'ai participé à l'évaluation de nombreux articles scientifiques pour plusieurs revues internationales. A court terme, j'ai l'objectif d'intégrer et de m'investir dans une responsabilité en tant que membre de l'Editorial-board de revues internationales de mon domaine de recherche telles que Reliability Engineering & System Safety (RESS), International Journal of Production Research (IJPR), International Journal of Production Economics (IJPE), Journal of Manufacturing Systems (JMS), Journal of Intelligent Manufacturing (JIM), Computers & Industrial Engineering (CIE), ...

Je tiens également à renforcer mon implication et prendre des responsabilités dans les groupes de travail tels que ceux du GDR-MACS. Dans ce cadre, en tant que membre du groupe H2M (Health Management & maintenance) du GDR-MACS et coordonnateur de l'axe T7 (Stratégies de maintenance), j'ai l'objectif de m'impliquer davantage dans ce groupe de travail. J'ai également pour objectif de proposer et d'animer des séances de travail et de réflexion sur des problématiques transversales entre différents groupes. Pour cela, en accord avec les animateurs du groupe H2M, je proposerai de procéder selon une démarche qui consiste à :

- Identifier les différents groupes dont les intérêts en recherche présentent une intersection avec ceux du groupe H2M.
- Organiser des séances de travail communes avec des exposés de doctorant, d'enseignant-chercheurs, mais également de professeurs invités de l'étranger ou d'industriels.
- Organiser des ateliers collaboratifs et des séances spéciales communes dans conférences aux niveaux national et international. Cette action peut être étendue à la co-organisation des conférences internationales et l'édition de numéros spéciaux dans revues nationales et internationales.
- Capitaliser les connaissances et le savoir faire de chaque groupe de travail et proposer des projets de recherche (ANR, Européen, ...).

Enfin, j'ai également pour objectif d'assurer la responsabilité scientifique d'un projet d'une équipe de recherche au sein de mon laboratoire. J'ai également comme projet de renforcer ma mobilité aux niveaux national et international. A moyen terme, j'envisage de déposer une demande de Congé pour Recherche ou Conversion Thématiques (CRCT). Ce congé permettra de m'investir davantage sur mes perspectives de recherche et de renforcer mes collaborations. Il me permettra aussi de m'investir sur le montage de projets de recherche avec des collaborateurs académiques et industriels.

4 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'un exposé détaillé de notre projet de recherche. Nos travaux de recherche se présentent selon trois perspectives majeures que sont le développement de stratégies de maintenance des systèmes complexes, la planification intégrée des stratégies de production et de maintenance pour les systèmes de production multilignes, et finalement le développement de méthodes de résolution des problèmes d'optimisation issus de nos travaux de recherche pour permettre une meilleure prise de décision.

Je mesure l'ampleur et la quantité de ces travaux de recherche. Je suis également conscient de l'effort considérable requis pour la réalisation de l'ensemble des problématiques qui s'y affèrent. Comme il a été précisé, je continuerai à développer mes travaux de recherche en s'appuyant sur des projets de collaboration avec des collègues académiques à l'échelle nationale comme à l'échelle internationale. Certaines parties de mes problématiques de recherche seront naturellement traitées dans le cadre de projets, de master de recherche et de thèses de doctorat.

Je termine ce chapitre par mentionner que j'investirai le transfert des problématiques de recherche aussi bien dans le milieu industriel qu'académique. Je m'investirai sur le montage de projets de collaboration industrielle. De par l'aspect applicatif, ces projets industriels renforceront mes préoccupations de

recherche et permettront plus de pragmatisme quant aux hypothèses de travail adoptées. Ces projets de collaboration sont aussi le moyen permettant à un industriel la formalisation et l'acquisition des compétences quant aux méthodes et approches formelles de modélisation d'analyse et de prise de décision. Sur le plan académique, mes résultats de recherches seront transmis aux étudiants, principalement au niveau master et doctorat, et ce par le biais des cours enseignés ou par des séminaires de formation et d'initiation à la recherche scientifique.

Conclusion générale

Dans ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches, nous avons exposé une synthèse des activités sur les plans de la recherche scientifique, pédagogique et administratif. Ces activités relèvent des périodes de thèse, d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER), de Postdoctorat et, plus particulièrement, de la période où j'ai commencé ma carrière en tant que Maître de Conférences. Dans ce mémoire, nous avons exposé un projet de recherche détaillé en termes de perspectives de recherche et de collaborations de responsabilités et de rayonnement scientifiques.

Mes travaux de recherche contribuent à la modélisation, l'analyse et l'aide à la décision pour les systèmes industriels sujets à des défaillances aléatoires. Plus explicitement, l'objectif de ces travaux de recherche consiste à développer des approches formelles de planification des stratégies de production et de maintenance combinées à des stratégies de garantie en incluant des critères liés à la qualité, la sécurité et le respect de l'environnement. L'ensemble des approches développées permet d'apporter des solutions et des éléments de réponse à des problématiques liées à la typologie et au profil des missions des systèmes considérés, aux conditions et interactions avec l'environnement d'exploitation, aux incertitudes liées à la qualité des actions de maintenance et à celle des pièces de rechange, aux données de fiabilité et de retour d'expérience, et à l'obsolescence des technologies.

Prenant acte de l'évolution marquante de l'industrie mondiale, nos perspectives de recherche sont inscrites dans un cadre où nous contribuerons à alimenter les piliers de l'industrie du futur, notamment ceux liés aux ressources, au développement durable et aux stratégies de maintenances intelligentes dédiées aux systèmes complexes. Nous investirons alors les problématiques liées à l'impact des processus de production et des activités de maintenance sur la qualité de l'environnement par la prise en compte, par exemple, de l'empreinte carbone. Nos travaux futurs traiteront également des problématiques liées au partage et à la mutualisation des ressources aussi bien en production qu'en maintenance.

Les travaux scientifiques présentés dans ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches sont les résultats d'un travail collectif avec mes étudiants de master et de doctorat, et d'une collaboration locale avec des collègues du laboratoire LGIPM. Ces travaux sont également le fruit d'autres collaborations avec des collègues d'universités de l'étranger avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Sans leurs conseils, leurs aides et leurs implications, le spectre de ce travail n'aurait jamais été aussi large. À toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail de recherche, j'adresse mes sincères remerciements.

Présenter une habilitation à diriger des recherches n'est pas une fin en soi, mais plutôt une étape ; **une responsabilité**. Elle est le moyen qui permet, à titre personnel, de prendre des engagements avec différents acteurs académiques et industriels. Elle permet, comme son titre l'indique, d'engager et de prendre la responsabilité des encadrements et de directions de travaux de thèse de doctorat. Elle permet également d'engager et de prendre la responsabilité de projets de recherche à l'échelle nationale comme à l'échelle internationale. Ces engagements requièrent davantage de capacités de prise de recul, de discernement et de rigueur. Elle nécessite également une ouverture d'esprit et des capacités d'adaptation à des environnements collaboratifs et parfois complexes.

Bibliographie

- [1] S. Agrawal, R. K. Singh, Q. Murtaza, A literature review and perspectives in reverse logistics, *Resources, Conservation and Recycling* 97 (2015) 76 – 92.
- [2] C. Diallo, U. Venkatadri, A. Khatab, S. Bhakthavatchalam, State of the art review of quality, reliability and maintenance issues in closed-loop supply chains with remanufacturing, *International Journal of Production Research* 55 (5) (2017) 1277–1296.
- [3] H. Min, C. Ko, H. Ko, The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network, *Computers & Industrial Engineering* 51 (2) (2006) 309 – 320.
- [4] L. V. Wassenhove, V. J. Guide, *Business aspects of closed-loop supply chains : exploring the issues*, in : l.n. van wassenhove & v.d.r. jr. guide Edition, The Carnegie Bosch Institute, 2003.
- [5] S. Srivastava, Green supply-chain management : a state-of-the-art literature review, *International journal of management reviews* 9 (1) (2007) 53–80.
- [6] U. R. de Oliveira, L. S. Espindola, I. R. da Silva, I. N. da Silva, H. M. Rocha, A systematic literature review on green supply chain management : Research implications and future perspectives, *Journal of Cleaner Production* 187 (2018) 537 – 561.
- [7] M. Fleischmann, M. Galbreth, G. Tagaras, Product acquisition, grading and disposition decisions, in : C. P. Boca Raton (Ed.), *Closed-loop supply chains : new developments to improve the sustainability of business practices*, Ferguson, M., 2010, Ch. 53, pp. 99–118.
- [8] N. Chari, C. Diallo, U. Venkatadri, A. Khatab, Modeling and analysis of a warranty policy using new and reconditioned parts, *Applied Stochastic Models in Business and Industry* (2016) In press –doi :10.1002/asmb.2178.
URL <http://dx.doi.org/10.1002/asmb.2178>
- [9] R. Barlow, L. Hunter, Optimum preventive maintenance policies, *Operations Research* 8 (1) (1960) 90–100.
- [10] R. Barlow, F. Proschan, *Mathematical theory of reliability*, John Wiley & Sons, 1965.
- [11] R. Dekker, Applications of maintenance optimization models : a review and analysis, *Reliability Engineering & Systems Safety* 51 (3) (1996) 229–240.
- [12] T. Nakagawa, S. Mizutani, A summary of maintenance policies for a finite interval, *Reliability Engineering & System Safety* 94 (1) (2009) 89–96.
- [13] T. Nakagawa, *Advanced reliability models and maintenance policies*, Springer series in reliability engineering, Springer, 2008.
- [14] A. Sharma, G. Yadava, S. Deshmukh, A literature review and future perspectives on maintenance optimization, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 17 (1) (2011) 5–25.
- [15] H. Wang, H. Pham, *Reliability and optimal maintenance*, London Springer, 2006.
- [16] H. Wang, A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research* 139 (2002) 469–489.
- [17] T. Nowakowski, S. Werbińska, On problems of multicomponent system maintenance modelling, *International Journal of Automation and Computing* 6 (4) (2009) 364.
- [18] R. Dekker, R. Wildeman, F. van der Duyn Schouten, A review of multi-component maintenance models with economic dependence, *Mathematical Methods of Operations Research* 45 (3) (1997) 411–435.

- [19] S. Alaswad, Y. Xiang, A review on condition-based maintenance optimization models stochastically deteriorating system, *Reliability Engineering & System Safety* 157 (2017) 53–63.
- [20] P. A. Scarf, A framework for condition monitoring and condition based maintenance, *Quality Technology & Quantitative Management* 4 (2) (2007) 301–312.
- [21] D. B. A. K. S. Jardine, D. Lin, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (7) (2006) 1483–1510.
- [22] A. Sarkara, S. K. D.K. Beherab, Maintenance policies of single and multi-unit systems in the past and present, *International Journal of Current Engineering and Technology* 2 (1) (2012) 196–205.
- [23] A. Rosmaini, K. Shahrul, An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application, *Computers & Industrial Engineering* 63 (1) (2012) 135 – 149.
- [24] D. I. Cho, M. Parlar, A survey of maintenance models for multi-unit systems, *European Journal of Operational Research* 51 (1991) 1–23.
- [25] H. Vu, P. Do, A. Barros, C. BÃlrenguer, Maintenance grouping strategy for multi-component systems with dynamic contexts, *Reliability Engineering & System Safety* 132 (2014) 233 – 249.
- [26] C. D. Dao, M. J. Zuo, Selective maintenance of multi-state systems with structural dependence, *Reliability Engineering and System Safety* 159 (2017) 184–195.
- [27] A. Khatab, C. Diallo, E. Aghezzaf, U. Venkatadri, Condition-based selective maintenance for stochastically degrading multi-component systems under periodic inspection and imperfect maintenance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*. DOI 10.1177/1748006X18765521.
- [28] N. Nahas, A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath, Extended great deluge algorithm for the imperfect preventive maintenance optimization of multi-state systems, *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008) 1658–1672.
- [29] K. Verbert, B. D. Schutter, R. Babuska, Timely condition-based maintenance planning for multi-component systems, *Reliability Engineering & System Safety* 159 (2017) 310 – 321.
- [30] T. Nakagawa, *Random Maintenance Policies*, Springer : London, 2014.
- [31] L. Yang, X. Ma, Y. Zhao, A condition-based maintenance model for a three-state system subject to degradation and environmental shocks, *Computers & Industrial Engineering* 105 (2017) 210 – 222.
- [32] W. Zhu, M. Fouladirad, C. BÉrenguer, A multi-level maintenance policy for a multi-component and multifailure mode system with two independent failure modes, *Reliability Engineering & System Safety* 153 (2016) 50 – 63.
- [33] Q. Qiu, L. Cui, H. Gao, Availability and maintenance modelling for systems subject to multiple failure modes, *Computers & Industrial Engineering* 108 (2017) 192 – 198.
- [34] V. Babishin, S. Taghipour, Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements, *Applied Mathematical Modelling* 40 (23) (2016) 10480 – 10505.
- [35] W. Rice, Optimal selective maintenance decisions for series systems, Master’s thesis, Industrial Engineering departement, Mississippi State University, 1999.
- [36] W. F. Rice, C. R. Cassady, J. Nachlas, Optimal maintenance plans under limited maintenance time, in : *Proceedings of Industrial Engineering Conference*, Banff, BC, Canada, 1998.
- [37] A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath, Heuristic-based methods for solving the selective maintenance problem for series-prallel systems, in : *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Beijing, China, 2007.
- [38] M. Pandey, M. J. Zuo, R. Moghaddass, M. K. Tiwari, Selective maintenance for binary systems under imperfect repair, *Reliability Engineering and System Safety* 113 (2013) 42–51.
- [39] H. Zhu, F. Liu, X. Shao, Q. Liu, Y. Deng, A cost-based selective maintenance decision-making method for machining line, *Quality and Reliability Engineering International* 27 (2011) 191–201.
- [40] A. Khatab, E.-H. Aghezzaf, Selective maintenance optimization when quality effects of maintenance actions are stochastic, *Reliability Engineering and System Safety* 150 (2016) 182–189.
- [41] M. Pinedo, *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer Science+Business Media, LLC, 2009.

- [42] J. Shapiro, Chapter 8 mathematical programming models and methods for production planning and scheduling, in : *Logistics of Production and Inventory*, Vol. 4 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Elsevier, 1993, pp. 371 – 443.
- [43] M. Pinedo, *Scheduling : Theory Algorithms and Systems*, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [44] D. Sipper, R. Bulfin, *Production : Planning, Control and Integration*, New York : McGraw-Hill, 1997.
- [45] I. B. Sidibé, *Analyse non-paramétrique des politiques de maintenance basée sur des données des durées de vie hétérogènes*, Ph.D. thesis, Doctorat de l'Université de Lorraine, Université de Lorraine (5 2014).
- [46] I. Sidibé, A. Khatab, C. Diallo, K. Adjallah, Kernel estimator of maintenance optimization model for a stochastically degrading system under different operating environments, *Reliability Engineering & System Safety* 147 (2016) 109–116.
- [47] I. Sidibé, A. Khatab, C. Diallo, Preventive maintenance optimization for a stochastically degrading system with a random initial age, *Reliability Engineering & System Safety* 159 (2017) 255–263.
- [48] I. B. Sidibe, A. Khatab, K. H. Adjallah, Kernel estimation based method for the optimization of the system age preventive replacement policy, in : *5th international conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Rabat, Morocco, 2013.
- [49] I. B. Sidibe, A. Khatab, K. H. Adjallah, Reliability and preventive maintenance analysis of weibull distributed lifetime systems, in : *11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IFAC IMS)*, Sao Paulo, Brazil, 2013.
- [50] I. Sidibé, A. Khatab, C. Diallo, Maintenance optimization model for stochastically degrading systems under different operating environments, in : *44th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE44) and 9th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS'14)*, Istanbul, Turkey, 2014.
- [51] I. Sidibe, A. Khatab, C. Diallo, D. Ait-Kadi, A maintenance optimization model for a second hand stochastically deteriorating system under different operating environments, in : *IEEE 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, Tlemcen, Algeria, 2015.
- [52] A. Khatab, C. Diallo, D. Ait-Kadi, Joint optimal upgrade level and imperfect preventive maintenance strategy for refreshed end-of-life systems, in : *In Proc. of Proceedings for 8th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)*, Oxford, UK, 2014, pp. 161–166.
- [53] A. Khatab, C. Diallo, I. Sidibe, Optimizing upgrade and imperfect preventive maintenance in failure-prone second-hand systems, *Journal of Manufacturing Systems* 43, Part 1 (2017) 58 – 78.
- [54] S. Bhakthavatchalam, C. Diallo, U. Venkatadri, A. Khatab, Quality, reliability, maintenance issues in closed-loop supply chains : A review, *IFAC-PapersOnLine* 48 (3) (2015) 460 – 465, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015.
- [55] C. Diallo, U. Venkatadri, A. Khatab, S. Bhakthavatchalam, State of the art review of quality, reliability and maintenance issues in closed-loop supply chains with remanufacturing, *International Journal of Production Research* 55 (5) (2017) 1277–1296.
- [56] C. Diallo, U. Venkatadri, A. Khatab, S. Bhakthavatchala, Optimal combination rebat warranty policy with second-hand products, in : G. Parlier, F. Liberatore, M. Demange (Eds.), *Operations Research and Enterprise Systems*, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 224–239.
- [57] A. Khatab, E. H. Aghezzaf, Selective maintenance optimization for series-parallel systems with continuously monitored stochastic degrading components subject to imperfect maintenance, in : *3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology AMEST 2016*, 2016.
- [58] E.-H. Aghezzaf, A. Khatab, P. L. Tam, Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems, *Reliability Engineering & System Safety* 145 (2016) 190 – 198.

- [59] P. L. Tam, E. Aghezzaf, A. Khatab, C. Le, Integrated production and imperfect preventive maintenance planning - an effective milp-based relax-and-fix/fix-and-optimize method, in : Proceedings of the 6th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems - Volume 1 : ICORES,, 2017, pp. 483–490. doi :10.5220/0006285504830490.
- [60] P. L. Tam, E. Aghezzaf, A. Khatab, Solving the integrated production and imperfect preventive maintenance planning problem, Communications in Computer and Information Science (CCIS), Springer (To appear), 2018.
- [61] P. Coolen-Schrijner, F. Coolen, Non-parametric predictive inference for age replacement with a renewal argument, Quality and Reliability Engineering International 20 (3) (2004) 203–215.
- [62] F. Coolen, P. Coolen-Schrijner, K. Yan, Non-parametric predictive inference in reliability, Reliability Engineering & System Safety 78 (2) (2002) 185–193.
- [63] B. Hill, Posterior distribution of percentiles : Bayes' theorem for sampling from a population, Journal of the American Statistical Association 63 (1968) 677–691.
- [64] T. Dohi, N. Matsushima, N. Kaio, S. Osaki, Nonparametric repair-limit replacement policies with imperfect repair, European journal of operational research 96 (2) (1987) 260–273.
- [65] T. Dohi, N. Kaio, S. Osaki, A new graphical method to estimate the optimal repair-time limit with incomplete repair and discounting, Computers & Mathematics with Applications 46 (7) (2003) 999–1007.
- [66] T. Dohi, A. Ashioka, N. Kaio, S. Osaki, Statistical estimation algorithms for repairs-time limit replacement scheduling under earning rate criteria, Computers & Mathematics with Applications 51 (2) (2006) 345–356.
- [67] R. Barlow, R. Campo, Total Time on Test Processes and Applications to Failure Data Analysis, Defense Technical Information Center, 1975.
- [68] B. Bergman, B. Klefsjo, A graphical method applicable to age-replacement problems, IEEE Transactions on Reliability R-31 (5) (1982) 478–481.
- [69] B. Bergman, B. Klefsjo, The TTT-concept and replacements to extend system life, European journal of operational research 28 (3) (1987) 302–307.
- [70] K. Rinsaka, T. Dohi, Optimizing software rejuvenation schedule based on the kernel density estimation, Quality Technology & Quantitative Management 6 (1) (2009) 55–65.
- [71] E. Parzen, On estimation of a probability density function and mode, Ann. Math. Statist. 33 (3) (1962) 1065–1076.
- [72] M. Finkelstein, On statistical and information-based virtual age of degrading system, Reliability Engineering & Systems Safety 92 (2009) 676–681.
- [73] M. Finkelstein, Virtual age of non-repairable objects, Reliability Engineering & Systems Safety 94 (2009) 666–669.
- [74] S. Ross, Introduction to probability models, 9th Edition, Amsterdam Academic Press, 2007.
- [75] U. N. Bhat, Elements of applied stochastic process, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1972.
- [76] J. Medhi, Stochastic process, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, 1982.
- [77] B. Silverman, Density Estimation for Statistics and Data Analysis, 1st Edition, Chapman and Hall/CRC, 1986.
- [78] D. Bosq, J. Lecoutre, Théorie de l'estimation fonctionnelle, Economica, 1987.
- [79] S. Sheather, Density estimation, Statistical Science 19 (4) (2004) 588–597.
- [80] C. Loader, Bandwidth selection : Classical or plug-in?, The Annals of Statistics 27 (2) (1999) 415–438.
- [81] S. Chiu, Comparative review of bandwidth selection for kernel density estimation, Statistica Sinica 6 (1996) 129–145.
- [82] C. Altman, N & Léger, Bandwidth selection for kernel distribution function estimation, Statistical Planning and Inference 46 (1995) 195–214.
- [83] B. Park, J. Marron, Comparison of data-driven bandwidth selectors, Journal of the American Statistical Association 85 (409) (1990) 66–72.

- [84] M. Jones, S. Sheather, Using non-stochastic terms to advantage in kernel-based estimation of integrated squared density derivatives, *Statistics & Probability Letters* 11 (6) (1991) 511–514.
- [85] S. Saoudi, F. Ghorbel, A. Hillion, Some statistical properties of the kernel diffeomorphism estimator, *Applied Stochastic Models and Data Analysis* 13 (1) (1997) 39–58.
- [86] G. Chattopadhyay, D. Murthy, Warranty cost analysis for second-hand products, *Mathematical and Computer Modelling* 31 (2000) 81–88.
- [87] H. Lo, R.-Y. Yu, A study of quality management strategy for reused products, *Reliability Engineering & System Safety* 119 (2013) 172–177.
- [88] G. Chattopadhyay, D. Murthy, Optimal reliability improvement for used items sold with warranty, *International Journal of Reliability and Applications* 5 (2) (2004) 47–57.
- [89] S. Naini, M. Shafiee, Joint determination of price and upgrade level for a warranted second-hand product, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 (9-12) (2011) 1187–1198.
- [90] N. Chari, C. Diallo, U. Venkatadri, Optimal Unlimited Free-Replacement Warranty Strategy using Reconditioned Products, *International Journal of Performability Engineering* 9 (2) (2013) 191.
- [91] M. Shafiee, S. Chukova, Maintenance models in warranty : A literature review, *European Journal of Operational Research* 229 (3) (2013) 561–572.
- [92] J. Pongpech, D. Murthy, R. Boondiskulchock, Maintenance strategies for used equipment under lease, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12 (1) (2006) 52–67.
- [93] R.H.Yeh, H. Lo, R.-Y. Yu, A study of maintenance policies for second-hand products, *Computers & Industrial Engineering* 60 (3) (2011) 438–444.
- [94] D.-K. Kim, J.-H. Lim, D. H. Park, Optimal maintenance level for second-hand product with periodic inspection schedule, *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 31 (3) (2015) 349–359.
- [95] M. Shafiee, M. Finkelstein, S. Chukova, On optimal upgrade level for used products under given cost structure, *Reliability Engineering and System Safety* 96 (2011) 286–291.
- [96] D. Lin, M. Zuo, R. Yam, General sequential imperfect preventive maintenance models, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 07 (03) (2000) 253–266.
- [97] Z.-L. Lin, Y.-S. Huang, C.-C. Fang, Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems, *Reliability Engineering & System Safety* 136 (2015) 145–156.
- [98] A. Khatab, Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration, *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI 10.1007/s10845-013-0819-x. 26 (3) (2015) 601–608.
- [99] A. Khatab, Maintenance optimization in failure-prone systems under imperfect preventive maintenance, *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI 10.1007/s10845-013-0819-x. 29 (2018) 707–717.
- [100] M. Malik, Reliable preventive maintenance scheduling, *A I I E Transactions* 11 (3) (1979) 221–228.
- [101] M. Panday, M. J. Zuo, R. Moghaddass, M. K. Tiwari, Selective maintenance for binary systems under imperfect repair, *Reliability Engineering and System Safety* 113 (2013) 42–51.
- [102] S. El-Ferik, M. Ben-Daya, Age-based hybrid model for imperfect preventive maintenance, *IIE Transactions* 38 (2006) 365–375.
- [103] T. Nakagawa, *Maintenance theory of reliability*, Springer, 2005.
- [104] A. Jardine, A. Tsang, *Maintenance, replacement, and reliability : theory and applications*, CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, 2006.
- [105] A. Khatab, C. Diallo, I. Sidibé, Optimizing upgrade and imperfect preventive maintenance in failure-prone second-hand systems, *Journal of Manufacturing Systems* 43 (2017) 58–78.
- [106] A. Khatab, E.-H. Aghezaf, Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic, *Reliability Engineering & Systems Safety*, doi :10.1016/j.res.2016.01.026.
- [107] G. H. Brundtland, *World Commission on environment and development : our common future*, Oxford University Press, Oxford, UK, 1987.

- [108] J. Fiksel, Designing resilient, sustainable systems, *Environmental Science & Technology* 37 (23) (2003) 5330–5339.
- [109] U.S. EPA, Electronics Waste Management in the United States, Approach 1, July, 2008, Nova Science, New York, USA, 2010, pp. 1–40.
- [110] M. E. Ferguson, Strategic Issues in Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing, CRC Press, Boca Raton, USA, 2010, pp. 9–21.
- [111] S. J. Duelos, J. P. Otto, D. G. Konitzer, Design in an era of constrained resources, *Mechanical Engineering* (September) (2010) 36–40.
- [112] M. C. Thierry, M. Salomon, J. A. E. E. van Nunen, L. N. Van Wassenhove, Strategic issues in product recovery management, *California Management Review* 37 (2) (1995) 114–135.
- [113] N. Chari, C. Diallo, U. Venkatadri, State of the art on performability across the sustainable value chain, *International Journal of Performability Engineering* 10 (6) (2014) 543–556.
- [114] M. Shafiee, S. Chukova, M. Saidi-Mehrabad, S. T. A. Niaki, Two-dimensional warranty cost analysis for second-hand products, *Communications in Statistics - Theory and Methods* 40 (4) (2011) 684–701.
- [115] D. N. P. Murthy, I. Djameludin, New product warranty : A literature review, *International Journal of Production Economics* 79 (3) (2002) 231–260.
- [116] W. R. Blischke, D. N. P. Murthy, *Warranty Cost Analysis*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1993.
- [117] S. Chukova, M. Shafiee, One-dimensional warranty cost analysis for second-hand items : an overview, *International Journal of Quality & Reliability Management* 30 (3) (2013) 239–255.
- [118] G. N. Chattopadhyay, D. N. P. Murthy, Cost sharing warranty policies for second-hand products, *International Transactions in Operational Research* 8 (1) (2001) 47–60.
- [119] G. N. Chattopadhyay, D. N. P. Murthy, Optimal reliability improvement for used items sold with warranty, *International Journal of Reliability and Applications* 5 (2) (2004) 47–58.
- [120] G. Chattopadhyay, W. Y. Yun, Modeling and analysis of warranty cost for 2D-policies associated with sale of second-hand products, *International Journal of Reliability and Applications* 7 (1) (2006) 71–77.
- [121] M. Saidi-Mehrabad, R. Noorossana, M. Shafiee, Modeling and analysis of effective ways for improving the reliability of second-hand products sold with warranty, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46 (1-4) (2010) 253–265.
- [122] M. Shafiee, S. Chukova, Optimal upgrade strategy, warranty policy and sale price for second-hand products, *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 29 (2) (2013) 157–169.
- [123] H.-C. Lo, R.-Y. Yu, A study of quality management strategy for reused products, *Reliability Engineering & System Safety* 119 (2013) 172–177.
- [124] S. G. J. Naini, M. Shafiee, Joint determination of price and upgrade level for a warranted second-hand product, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 (9-12) (2011) 1187–1198.
- [125] M. Shafiee, S. Chukova, Maintenance models in warranty : A literature review, *European Journal of Operational Research* 229 (3) (2013) 561–572.
- [126] N. Chari, C. Diallo, U. Venkatadri, Optimal unlimited free-replacement warranty strategy using reconditioned products, *International Journal of Performability Engineering* 9 (2) (2013) 191–200.
- [127] N. Chari, Thematic development of recovery, remanufacturing, and support models for sustainable supply chains, Ph.D. thesis, Dalhousie University, Halifax, Canada (2015).
- [128] Apple, Repair terms and conditions, <http://www.apple.com/legal/sales-support/terms/repair/generalservice/servicetermsen/>, retrieved Feb. 5, 2016 (2016).
- [129] Dell, Dell limited hardware warranty [retrieved feb. 5, 2016], <http://www.dell.com/learn/us/en/vn/solutions/limited-hardware-warranties> (2015).
- [130] W. R. Blischke, D. N. P. Murthy, *Product warranty handbook*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1995.

- [131] C. Diallo, D. Aït-Kadi, Optimal mixture strategy of two identical subpopulations with different ages, in : International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Metz, France, 2011.
- [132] T. S. Glickman, P. D. Berger, Optimal price and protection period decisions for a product under warranty, *Management Science* 22 (12) (1976) 1381–1390.
- [133] M. Anityasari, H. Kaebernick, S. Kara, The role of warranty in the reuse strategy, in : 14th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, Japan, 2007, pp. 335–340.
- [134] T. I. Matis, R. Jayaraman, A. Rangan, Optimal price and pro rata decisions for combined warranty policies with different repair options, *IIE Transactions* 40 (10) (2008) 984–991.
- [135] D. B. Montgomery, G. L. Urban, *Management Science in Marketing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1969.
- [136] D. C. Montgomery, E. A. Peck, G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, Wiley, Hoboken, USA, 2012.
- [137] H. Pham, *Handbook of Reliability Engineering*, Springer, London, UK, 2003.
- [138] C. R. Cassady, E. A. Pohl, W. P. Murdock, Selective maintenance modeling for industrial systems, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 7 (2) (2001) 104–117.
- [139] C. R. Cassady, W. P. Murdock, E. A. Pohl, Selective maintenance for support equipment involving multiple maintenance actions, *European Journal of Operational Research* 129 (2001) 252–258.
- [140] R. Rajagopalan, C. R. Cassady, An improved selective maintenance solution approach, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12 (2) (2006) 172–185.
- [141] T. Lust, O. Roux, F. Riane, Exact and heuristic methods for the selective maintenance problem, *European Journal of Operational Research* 197 (2009) 1166–1177.
- [142] I. Iyoub, C. R. Cassady, E. A. Pohl, Establishing maintenance resource levels using selective maintenance, *Engineering Economist* 51 (2) (2006) 99–114.
- [143] L. M. Maillart, C. R. Cassady, C. Rainwater, K. Schneide, Selective maintenance decision-making over extended planing horizons, *IEEE Transactions on Reliability* 58 (3) (2009) 462–469.
- [144] A. Khatab, E. H. Aghezzaf, C. Diallo, Maintenance optimization of series-parallel systems operating missions with scheduled breaks, in : 27th IEEE International Conference on Microelectronics (ICM), Casablanca, Morocco, 2015.
- [145] M. Malik, Reliable preventive maintenance scheduling, *AIIE transactions* 11 (3) (1979) 221–228.
- [146] D. Lin, M. J. Zuo, R. C. M. Yam, General sequential imperfect preventive maintenance models, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 7 (3) (2000) 253–266.
- [147] A. Khatab, E. H. Aghezzaf, I. Djelloul, Z. Sari, Selective maintenance optimization for series-parallel systems alternating missions and scheduled breaks with stochastic durations, *International Journal of Production Research* 55 (10).
- [148] A. Khatab, E.-H. Aghezzaf, I. Djelloul, Z. Sari, Selective maintenance optimization for systems operating missions and scheduled breaks with stochastic durations, *Journal of manufacturing systems* 43.
- [149] C. Chen, M. Q.-H. Mend, M. J. Zuo, Selective maintenance optimization for multi-state systems, in : Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Canada, 1999.
- [150] Y. Liu, H.-Z. Huang, Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance, *IEEE transactions on reliability* 59 (2) (2010) 356–367.
- [151] M. Pandey, M. J. Zuo, R. Moghaddass, Selective maintenance modeling for multistate system with multistate components under imperfect maintenance, *IIE Transactions* 45 (2013) 1221–1234.
- [152] C. D. Dao, M. J. Zuo, M. Pandey, Selective maintenance for multi-state series-parallel systems under economic dependence, *Reliability Engineering and System Safety* 121 (2014) 240–249.
- [153] Y. Zhou, T. R. Lin, Y. Sun, Y. Bian, L. Ma, An effective approach to reducing strategy space for maintenance optimization of multistate series-parallel systems, *Reliability Engineering and System Safety* 138 (2015) 40–53.

- [154] N. D. Singpurwalla, Survival in dynamic environments, *Statistical Science* 10 (1) (1995) 86–103.
- [155] J. M. van Noortwijk, A survey of the application of gamma processes in maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 2–21.
- [156] M. Marseguerra, E. Zio, L. Podofillini, Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and monte carlo simulation, *Reliability Engineering and System Safety* 77 (2002) 151–166.
- [157] B. Castanier, A. Grall, C. Bèrengruer, A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system, *Reliability Engineering and System Safety* 87 (2005) 109–120.
- [158] Z. Tian, H. Liao, Condition-based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model, *Reliability Engineering and System Safety* 96 (2011) 581–589.
- [159] N. Rasmekomen, A. K. Parlikad, Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions, *Reliability Quality Engineering International* 148 (2016) 1–10.
- [160] Y. Wang, H. Pham, A multi-objective optimization of imperfect preventive maintenance policy for dependent competing risk systems with hidden failure, *IEEE Transactions on Reliability* 60 (4) (2011) 770–781.
- [161] P. D. Van, C. Bèrengruer, Condition-based maintenance with imperfect preventive repairs for a deteriorating production system, *Quality and Reliability Engineering International* 28 (6) (2012) 624–633.
- [162] S. Mercier, I. T. Castro, On the modeling of imperfect repairs for a continuously monitored gamma wear process through age reduction, *Journal of Applied Probability* 50 (4) (2013) 1057–1076.
- [163] M. Zhang, O. Gaudoin, M. Xie, Degradation-based maintenance decision using stochastic filtering for systems under imperfect maintenance, *European Journal of Operational Research* 245 (2015) 531–541.
- [164] T. Cheng, M. D. Pandey, J. A. M. van der Weide, The probability distribution of maintenance cost of a system affected by the gamma process of degradation : Finite time solution, *Reliability Engineering and System Safety* 108 (2012) 65–76.
- [165] B. Liu, Z. Xu, M. Xie, W. Kuo, A value-based preventive maintenance policy for multi-component system with continuously degrading components, *Reliability Engineering and System Safety* 132 (2014) 83–89.
- [166] Z. Ye, M. Xie, Stochastic modelling and analysis of degradation for highly reliable products, *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 31 (1) (2015) 16–32.
- [167] M. Abdel-Hameed, A gamma wear process, *IEEE Transactions on Reliability* 24 (2) (1975) 152–153.
- [168] A. Grall, L. Dieulle, C. Bèrengruer, M. Roussignol, Continuous time predictive maintenance scheduling for a deteriorating system, *IEEE Transactions on Reliability* 51 (2) (2002) 141–150.
- [169] J. M. van Noortwijk, J. A. M. van der Weide, M. J. Kallen, M. D. Pandey, Optimal maintenance decisions under imperfect inspection, *Reliability Engineering and System Safety* 90 (2005) 177–185.
- [170] J. M. van Noortwijk, J. A. M. van der Weide, M. J. Kallen, M. D. Pandey, Gamma processes and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability, *Reliability Engineering and System Safety* 92 (2007) 1651–1658.
- [171] T. Cheng, M. D. Pandey, J. A. M. van der Weide, The probability distribution of maintenance cost of a system affected by the gamma process of degradation : Finite time solution, *Reliability Engineering and System Safety* 108 (2012) 65–76.
- [172] P. Do, A. Voisin, E. Levrat, B. Iung, A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions, *Reliability Engineering and System Safety* 133 (2015) 22–32.
- [173] N. D. Singpurwalla, Gamma processes and their generalizations : An overview, in : R. Cooke, M. Mendel, H. Vrijling (Eds.), *Engineering Probabilistic Design and Maintenance for Flood Protection*, Springer US, 1997, Ch. 5, pp. 67–75.
- [174] H. van der Weide, Gamma processes, in : R. Cooke, M. Mendel, H. Vrijling (Eds.), *Engineering Probabilistic Design and Maintenance for Flood Protection*, Springer US, 1997, Ch. 6, pp. 77–83.

- [175] K. Rafee, Q. Feng, D. W. Coit, Condition-based maintenance for repairable deteriorating systems subject to a generalized mixed shock model, *IEEE Transactions on Reliability* 64 (4) (2015) 1164–1174.
- [176] X. Liu, J. Li, K. Al-Khalifa, A. S. Hamouda, D. W. Coit, E. A. Elsayed, Condition-based maintenance for continuously monitored degrading systems with multiple failure modes, *IIE Transactions* 45 (2013) 422–435.
- [177] H. Chouikhi, A. Khatab, N. Rezg, A condition-based maintenance policy for a production system under excessive environmental degradation, *Journal of Intelligent Manufacturing* 25 (4) (2014) 727–737.
- [178] L. Jiang, Q. Feng, D. W. Coit, Reliability and maintenance modeling for dependent competing failure processes with shifting failure thresholds, *IEEE Transactions on Reliability* 61 (4) (2012) 932–948.
- [179] Y. C. Lee, Machine scheduling with an availability constraint, *Journal of Global Optimization* 9 (1996) 395–416.
- [180] Y. C. Lee, Minimizing the makespan in the two machines flowshop scheduling problem with an availability constraint, *Operations Research Letters* 20 (1997) 129–139.
- [181] Y. C. Lee, Mmachine scheduling with an availability constraint, In Leung, J. Y. -T. (Ed), *Handbook of Scheduling Algorithms, Models and Performance Analysis*. CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [182] W. Kubiak, J. Blazewicz, P. Formanowicz, J. Breit, G. Schmidt, Two-machines flow shops scheduling problem with limited machine availability, *European Journal of Operational Research* 136 (2002) 528–540.
- [183] Y. C. Lee, Z. L. Chen, Scheduling jobs and preventive maintenance activities on parallel machines, *Naval Research Logistics* 47 (2000) 145–165.
- [184] C. R. Cassady, E. Kunatoglu, Intergrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine, *IEEE Transactions on Reliability* 54 (2) (2005) 304–309.
- [185] F. Harris, How many parts to make at once ?, *Factory Magazine Management* 10 (2) (1913) 135–136.
- [186] M. Rosenblatt, H. L. Lee, Economic production cycles with imperfect process, *IIE Transactions* 18 (1986) 48–55.
- [187] M. Hariga, M. Ben-Daya, Note : the economic manufacturing lot-sizing problem with imperfect production process : bounds and optimal solutions, *Naval Research Logistics* 45 (1998) 423–432.
- [188] E. Porteus, Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction, *Operations Researches* 34 (1986) 137–144.
- [189] H. L. Lee, M. Rosenblatt, A production and maintenance planning model with restoration cost dependent on detection delay, *IIE Transactions* 21 (1989) 368–375.
- [190] T. Lin, S. T. Tseng, M. J. Liou, Optimal inspection schedule in the imperfect production system under general shift distribution, *Journal of Chinese Institute of Industrial Engineers* 8 (1991) 73–81.
- [191] M. Ben-Daya, The economic production lot-sizing problem with imperfect production process and imperfect maintenance, *International Journal of Production Economics* 76 (2002) 257–264.
- [192] M. Ben-Daya, A. Rahim, Integrated production, quality & maintenance models : An overview, in : M.A. Rahim, M. Ben-Daya (Eds.), *Integrated Modeling in Production Planning, Inventory, Quality and Maintenance*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [193] W.-Y. Wang, Optimum production and inspection modeling with minimal repair and rework considerations, *Applied Mathematical Modelling* 37 (2013) 1618–1626.
- [194] Y.-C. Chen, An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework, *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013) 99–106.
- [195] C.-K. Chen, C.-C. Lo, Optimal production run length for products sold with warranty in an imperfect production system with allowable shortages, *Mathematical and Computer Modelling* 44 (3-4) (2006) 319–331.
- [196] C.-H. Wang, The impact of a free-repair warranty policy on emq model for imperfect production systems, *Computers & Operations Research* 31 (12) (2004) 2021–2035.

- [197] G. L. Liao, Production and maintenance policies for an epq model with perfect repair, rework, free-repair warranty, and preventive maintenance, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems* 46 (8) (2016) 1129–1139.
- [198] A. Chelbi, N. Rezg, M. Radhoui, Simultaneous determination of production lot size and preventive maintenance schedule for unreliable production system, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 14 (2) (2008) 161–176.
- [199] K. Dhoubi, A. Gharbi, M. B. Aziza, Joint optimal production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell, *International Journal of Production Economics* 137 (1) (2012) 126 – 136.
- [200] A. Gouiaa-Mtibaa, S. Dellagi, Z. Achour, W. Erray, Integrated maintenance-quality policy with rework process under improved imperfect preventive maintenance, *Reliability Engineering & System Safety* 173 (2018) 1 – 11.
- [201] L. Jafari, V. Makis, Joint optimal lot sizing and preventive maintenance policy for a production facility subject to condition monitoring, *International Journal of Production economics* 169 (2015) 156–168.
- [202] L. Jafari, V. Makis, Optimal lot-sizing and maintenance policy for a partially observable production system, *Computers & Industrial Engineering* 93 (2016) 88–98.
- [203] L. Jafari, V. Makis, Joint optimization of lot-sizing and maintenance policy for a partially observable two-unit system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87 (5) (2016) 1621–1639.
- [204] G. Q. Cheng, B. H. Zhou, L. Li, Joint optimization of lot sizing and condition-based maintenance for multi-component production systems, *Computers & Industrial Engineering* 110 (2017) 538–549.
- [205] H. Peng, G.-J. van Houtum, Joint optimization of condition-based maintenance and production lot-sizing, *European Journal of Operational Research* 253 (2016) 94–107.
- [206] L. Wienstein, C. H. Chung, Integrated maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment, *Computer and Operations Research* 26 (1999) 1059–1074.
- [207] A. Gunasekaran, Z. Irani, K.-L. Choy, L. Filippi, T. Papadopoulos, Performance measures and metrics in outsourcing decisions : A review for research and applications, *International Journal of Production Economics* 161 (2015) 153–166.
- [208] D. Mishra, A. Gunasekaran, T. Papadopoulos, R. Dubey, Supply chain performance measures and metrics : a bibliometric study, *Benchmarking : An International Journal* 25 (3) (2018) 932–967.
- [209] A. Gunasekaran, N. Subramanian, S. Rahman, Green supply chain collaboration and incentives : Current trends and future directions, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 74 (2015) 1–10.
- [210] L. Ameknassi, D. Aït-Kadi, N. Rezg, Integration of logistics outsourcing decisions in a green supply chain design : A stochastic multi-objective multi-period multi-product programming model, *International Journal of Production Economics* 182 (2016) 165 – 184.
- [211] L. Ameknassi, D. Ait-Kadi, N. Rezg, Corrigendum to “Integration of logistics outsourcing decisions in a green supply chain design : A stochastic multi-objective multi-period multi-product programming model” [int. j. prod. econ. 182c (2016) 165–184], *International Journal of Production Economics* 186 (2017) 132.
- [212] H. Lector Rivera-Gómez, A. Gharbi, J. Kenné, O. Montaño-Arango, E. S. Hernández-Gress, Subcontracting strategies with production and maintenance policies for a manufacturing system subject to progressive deterioration, *International Journal of Production Economics* :<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.03.004>.
- [213] H. Rivera-Gómez, A. Gharbi, J. Kenné, O. M. no Arango, E. Hernandez-Gress, Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system, *International Journal of Production Economics* 171 (2016) 134 – 150.
- [214] M. Haoues, M. Dahane, N. Kenza-Mouse, Outsourcing optimization in two-echelon supply chain network under integrated production-maintenance constraints, *Journal of Intelligent Manufacturing* :<https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1007/s10845-016-1273-3>.

- [215] S. Dellagi, N. Rezg, A. Gharbi, Optimal maintenance/production policy for a manufacturing system subjected to random failure and calling upon several subcontractors, *International Journal of Management Science and Engineering Management* 5 (4) (2010) 261–267.
- [216] Z. Hajej, N. Rezg, A. Gharbi, Forecasting and maintenance problem under subcontracting constraint with transportation delay, *International Journal of Production Research* 52 (22) (2014) 6695–6716.
- [217] E. H. Aghezzaf, M. A. Jamali, D. Ait-Kadi, An integrated production and preventive maintenance planning model, *European Journal of Operational Research* 181 (2) (2007) 679–685.
- [218] E. H. Aghezzaf, N. Najid, Integrated production and preventive maintenance in deteriorating production systems, *Information Sciences* 178 (2008) 3382–3392.
- [219] N. M. Najid, M. Alaoui-Selsouli, A. Mohafid, An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost, *International Journal of Production Research* 49 (8) (2011) 2265–2283.
- [220] M. Nourelfath, E. Châtelet, Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components, *Reliability Engineering & System Safety* 101 (2012) 59 – 66.
- [221] M.-C. Fitouhi, M. Nourelfath, Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems, *Reliability Engineering & System Safety* 121 (2014) 175 – 186.
- [222] A. Yaalaoui, K. Chaabi, F. Yaalaoui, Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems, *Information Sciences* 278 (2014) 841–861.
- [223] M. Nourelfath, N. Nahas, M. Ben-Daya, Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes, *Reliability Engineering & System Safety* 148 (2016) 21 – 31.
- [224] H. B. Fakher, M. Nourelfath, M. Gendreau, A cost minimisation model for joint production and maintenance planning under quality constraints, *International Journal of Production Research*, DOI :10.1080/00207543.2016.1201605.
- [225] D.P.Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Athena Scientific, 2008.
- [226] S. El-Ferik, M. Ben-Daya, Age-based hybrid model for imperfect preventive maintenance, *IIE Transactions* 38 (4) (2006) 365–375.
- [227] W. W. Trigeiro, A simple heuristic for lot sizing with setup times, *Decision Sciences* 20 (2) (1989) 294–303.
- [228] J. Thizy, L. V. Wassenhove, Lagrangean relaxation for the multi-item capacitated lot-sizing problem : A heuristic implementation, *IIE Transactions* 17 (4) (1985) 308–313.