HAL
open science

Optimisation de la politique de remanufacturing des pièces de rechange dans le cadre d'une maintenance intégrée à une chaîne logistique en boucle fermée

Hamza Boudhar

▶ **To cite this version:**

Hamza Boudhar. Optimisation de la politique de remanufacturing des pièces de rechange dans le cadre d'une maintenance intégrée à une chaîne logistique en boucle fermée. Gestion et management. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0024 . tel-01751444

HAL Id: tel-01751444

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751444

Submitted on 29 Mar 2018

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

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

École doctorale IAEM
(Informatique, Automatique, Électronique – Électrotechnique et Mathématiques)

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

PRÉSENTÉE LE 28 Janvier 2015

À L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE METZ

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

En « Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique »

PAR

BOUDHAR Hamza

Acceptée sur proposition du jury :

DOLGUI Alexandre, rapporteur - Professeur à l'école des Mines de Saint-Etienne
GRALL Antoine, rapporteur - Professeur à l'Université de Technologie de Troyes

ARTIBA Abdelhakim, examinateur - Professeur à l'Université de Valenciennes
DIALLO Claver, examinateur - Associate Professor à Dalhousie University
IUNG Benoit, examinateur - Professeur à l'Université de Lorraine
KHATAB Abdelhakim, examinateur - Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz

REZG Nidhal, Directeur de thèse - Professeur à l'Université de Lorraine
DAHANE Mohammed, Co-Directeur de thèse - Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz

Remerciement

Cette partie de la thèse est à la fois facile et difficile à rédiger. Facile, parce qu'exprimer des sentiments et des remerciements est quelque chose de naturel et que cela fait du bien. Difficile, car tant de gens m'ont aidé que je pourrais oublier d'en citer certains. Cela fut une expérience très enrichissante de venir étudier dans un pays étranger. J'y ai rencontré des professionnels de haut niveau qui ont partagé leur expertise avec moi. D'autres personnes m'ont accompagné différemment, en m'apportant amitié et conseils... Tant de choses.

Je remercie donc infiniment mon directeur de thèse Nidhal REZG pour son professionnalisme, ses précieux conseils, sa sagesse et ses grandes qualités humaines.

Je remercie également mon co-directeur de thèse Mohammed DAHANE qui a su m'accueillir, répondre à mes questions, et m'aider à me sentir à l'aise, afin que ces trois années se déroulent dans des conditions idéales.

Mes remerciements vont ensuite aux membres du jury pour leurs remarques constructives sur ce travail :
Aux Messieurs :

- M. Alexandre DOLGUI, Professeur à l'école des Mines de Saint-Etienne.
- M. Antoine GRALL, Professeur à l'université de Technologie de Troyes.

En leur qualité de rapporteurs de thèse
Et aux Messieurs :

- Abdelhakim ARTIBA professeur à l'université de Valenciennes.
- Claver DIALLO, Associate Professor à Dalhousie University.
- Benoit IUNG, Professeur à l'Université de Lorraine.
- Abdelhakim KHATAB, Maître de Conférences à l'ENIM.

En qualité d'examinateurs

Un grand merci à tous les membres du laboratoire LGIPM. Je pense particulièrement à Ibrahima, Ishak, pour leurs encouragements et leur amitié, sans oublier Abderrahmane, Maen, Akram qui ont quitté le laboratoire et avec qui j'ai passé de bons moments.

Tout ceci ne serait rien sans ma famille et mes amis. Un énorme merci à mes parents et ma femme pour m'avoir encouragé dans mes choix.

Metz, le 28 Janvier 2015

A mes parents, mes frères et ma sœur. A ma femme.

Abstract

Motivated by the change of regulations in the matter of sustainability, but also by pure economic constraints, several industries have found themselves obligated to develop new methods and models for the management of products that are at the end of their life cycle. In this context, the remanufacturing aims at managing the recovery of the product's value before its end of life. This type of action will extend the product life cycle and save the use of the raw material. These remanufactured products will be re-injected in a market that serves another class of customers, different from the one using new products. In other cases, the remanufactured products are reused as spare parts for the maintenance, but this reuse may vary according to the maintenance strategy adopted.

This thesis focuses on the integration of a hybrid flow supply of spare parts in a service model based on stochastic degradation of a production system. Two types of spare parts supply flows are studied: a direct flow and reverse flow. The direct flow is represented by the use of new spare parts and the reverse flow is represented by the reuse of the recovered parts during the replacements, with the ability to perform remanufacturing action to improve the degradation level of these spare parts.

Several issues were treated to better understand the impact of remanufacturing policies over the performance of a production system. At the beginning we started our study with production systems composed of a single machine. In this context, we proposed sequential studies then integrated one to optimize the maintenance policy as well as the Hybrid provisioning in regard to spare parts destined to replacement actions. Similarly, we've studied the production management subjected to quality constraint based on the machine's degradation process. Furthermore, we've presented generalizations of studied models within the context of a production system composed of several machines. Finally, we've developed an aid-to-decision-design tool for production systems within the remanufacturing process. This problematic aims at –from a strategic point- selecting the best group of machines to build a new system of production that is able to satisfy the constraints of a production defined by the decision maker.

Keywords

Remanufacturing, used spare parts, condition-based maintenance, closed loop supply chain, genetic algorithms, simulation.

Résumé

Motivés par l'évolution des réglementations en matière d'écologie mais aussi par des contraintes purement économiques, plusieurs secteurs industriels se sont retrouvés dans l'obligation de développer de nouvelles méthodes et modèles pour la gestion des produits en fin de vie. Dans ce contexte, la remanufacturation vise à gérer la récupération de la valeur d'un produit avant sa fin de vie. Elle permet de prolonger le cycle de vie du produit et d'économiser une partie des besoins industriels en matière première. Ces produits remanufacturés seront remis dans le marché et destinés à une autre catégorie de clients, différente de celle des produits neufs. Dans d'autres cas, les produits remanufacturés sont réutilisés sous la forme de pièces de rechange dans les actions de maintenance, mais cette réutilisation peut varier selon la stratégie de maintenance adoptée.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse à l'intégration d'un flux d'approvisionnement hybride en pièces de rechange dans un modèle de maintenance basé sur la dégradation stochastique d'un système de production. Deux types de flux d'approvisionnement en pièces de rechange sont étudiés : un flux direct et un flux inverse. Le flux direct est représenté par l'utilisation de pièces de rechange neuves et le flux inverse est représenté par la réutilisation des pièces récupérées lors des remplacements ultérieurs, avec la possibilité de réaliser une action de remanufacturation pour améliorer l'état de dégradation de ces pièces de rechange.
Plusieurs problématiques ont été traitées pour permettre de comprendre l'impact et l'influence d'une politique de remanufacturation sur les performances d'un système de production. En effet, dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à des systèmes de production composés d'une seule machine. Dans ce cadre, nous avons proposé des études séquentielles puis intégrées pour optimiser la politique de maintenance et celle de l'approvisionnement hybrides en pièces de rechange destinées aux actions de remplacements. Nous avons étudié également la gestion de production soumise à une contrainte de qualité basée sur l'évolution de la dégradation de la machine. Ensuite, et dans un second temps, nous avons présenté des généralisations des modèles étudiés dans le cadre de systèmes de production composés de plusieurs machines. Enfin, nous avons développé un outil d'aide à la décision pour conception de systèmes de production dans le cadre d'une politique de remanufacturation. Cette problématique - du niveau stratégique - vise à sélectionner le meilleur ensemble de machines pour construire un nouveau système de production capable de satisfaire les contraintes de production définies par décideur.

Mots-clés

Remanufacturation, pièces de rechanges réutilisées, maintenance conditionnelle, chaîne logistiques à boucle fermée, algorithmes génétiques, simulation.

Table de matières

Remerciement i

Abstract iii

Keywords iii

Résumé iv

Mots-clés iv

Liste des Figures 8

Liste des Tableaux 11

Introduction générale 15

Chapitre 1 Etat de l'art et contexte général des travaux 19

1.1 Introduction 20

1.2 Maintenance conditionnelle pour un système de production à dégradation stochastique 20

1.2.1 La maintenance 20

1.2.2 La défaillance 21

1.2.3 Défaillance par dégradation graduelle et maintenance conditionnelle 24

1.3 Chaîne logistique en boucle fermée 26

1.3.1 Chaîne logistique classique 27

1.3.2 Chaîne logistique inverse 29

1.4 La maintenance et la chaîne logistique 36

1.4.1 La maintenance des systèmes de production 36

1.4.2 Chaîne logistique en boucle fermée intégrée à la maintenance 37

1.4.3 Objectif de la thèse 38

1.5 Outils Utilisés 38

1.5.1 Heuristique 38

1.5.2 Algorithme glouton 38

1.5.3 Algorithmes Génétiques 39

1.5.4 Modélisation mathématique 40

1.5.5 Simulation 40

1.6 Systèmes étudiés et problématiques liées 40

1.6.1 Système de production à une seule machine 40
1.6.2 Système de production multi-machines 42
1.6.3 Mode de défaillance du système 43
1.6.4 Qualité de pièces de rechange 43
1.6.5 Remanufacturation des pièces récupérées 43
1.6.6 La politique de maintenance conditionnelle adoptée 44
1.7 Conclusion 48
Partie 1 Système de production à une seule machine 50
Chapitre 2 Optimisation de la politique maintenance conditionnelle 52
2.1 Introduction 53
2.2 Optimisation de la politique de maintenance conditionnelle avec un plan d'inspection périodique 54
2.2.1 Description du problème 54
2.2.2 Modèle mathématique 55
2.2.3 Approche proposée 57
2.2.4 Expériences numériques et analyse 58
2.3 Optimisation de la politique de maintenance conditionnelle avec un plan d'inspection séquentiel 60
2.3.1 Description du problème 60
2.3.2 Modèle mathématique 62
2.3.3 Approche proposée 64
2.3.4 Expériences numériques et analyse 67
2.4 Conclusion 71
Chapitre 3 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange 73
3.1 Introduction 74
3.2 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange, sans la prise en compte de la gestion de stock 75
3.2.1 Description du problème 75
3.2.2 Modèle mathématique 76
3.2.3 Approche proposée 79
3.2.4 Expériences numériques et analyse 80
3.3 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange avec la prise en compte de la gestion de stock 83
3.3.1 Description du problème 83
3.3.2 Modèle mathématique 84
3.3.3 Approche proposée 87
3.3.4 Expériences numériques et analyse 88
3.4 Conclusion 92
Chapitre 4 Optimisation intégrée et en temps réel de la politique de maintenance et la politique d'acquisition des pièces de rechange 93

4.1 Introduction **94**

4.2 Description du problème **95**

4.3 Modèle mathématique **96**

4.4 Approche proposée **99**

4.5 Expériences numériques et analyse **103**

4.6 Conclusion **109**

Chapitre 5 Optimisation intégrée de la politique de maintenance et la politique d'acquisition des pièces de rechange avec une dépendance entre la cadence de production et la dégradation, sous contrainte de demande **111**

5.1 Introduction **112**

5.2 Description du problème **112**

5.3 Modèle mathématique **115**

5.4 Approche proposée **118**

5.5 Expériences numériques et analyse **120**

5.6 Conclusion **129**

Partie 2 Système de production multi-machines **131**

Chapitre 6 Sélection des machines sous critères de maintenance et satisfaction de demande **133**

6.1 Introduction **134**

6.2 Description du problème **134**

6.3 Modèle mathématique **137**

6.4 Approche proposée **141**

6.5 Expériences numériques et analyse **142**

6.6 Conclusion **145**

Chapitre 7 Optimisation de la maintenance pour *m* machines **147**

7.1 Introduction **148**

7.2 Description du problème **149**

7.3 Modèle mathématique **150**

7.4 Approche proposée **153**

7.5 Expériences numériques et analyse **157**

7.6 Conclusion **163**

Conclusion générale et perspectives **165**

Contributions scientifiques **167**

Références bibliographiques **169**

Liste des Figures

Figure 0:1 Synoptique du manuscrit de thèse 13

Figure 1:1 Les différentes stratégies de maintenance 21

Figure 1:2 Classification de la défaillance 23

Figure 1:3 Modèle de dégradation discrète 24

Figure 1:4 Modèle de dégradation continue 25

Figure 1:5 Le schéma type d'une chaine logistique en boucle fermée 27

Figure 1:6 Classification d'une chaîne logistique par sa complexité 28

Figure 1:7 Définition de la logistique inverse proposée avec ses interrelations des définitions précédentes 30

Figure 1:8 Classification des opérations verte (Chaîne logistique verte) selon le contexte du problème 31

Figure 1:9 Classification des activités de chaîne logistique inverse selon Lebreton 32

Figure 1:10 Classification des activités de chaîne logistique inverse selon Thierry et al 32

Figure 1:11 Procédure générale des algorithmes génétiques 40

Figure 1:12 Système de production à une seule machine 41

Figure 1:13 Système de production à *m* machine 42

Figure 1:14 Les niveau de remanufacturation possibles 44

Figure 1:15 Graphe état/transition simulant l'état de la machine 47

Figure 2:1 Système étudié 54

Figure 2:2 Politique périodique d'inspection adoptée 55

Figure 2:3 Arbre de probabilité associé. 56

Figure 2:4 Structure d'un chromosome. 58

Figure 2:5 Variation du coût total par rapport à la longueur d'intervalle d'inspection (Cas 1). 59

Figure 2:6 Variation du coût total par rapport à la longueur d'intervalle d'inspection (Cas 2). 60

Figure 2:7 Système étudié 61

Figure 2:8 Politique séquentielle d'inspection adoptée 62

Figure 2:9 Arbre de probabilité associé. 63

Figure 2:10 L'organigramme de l'heuristique de calcul des dates d'inspection. 66

Figure 2:11 Le comportement de dégradation. 67

Figure 3:1 Système étudié 75

Figure 3:2 Politique périodique d'inspection adoptée 76

Figure 3:3 Arbre de probabilité associé. 77

Figure 3:4 Structure d'un chromosome. 79

Figure 3:5 Exemple illustratif du croisement et des procédures de correction 80

Figure 3:6 Niveau de dégradation observé (exemple 1)..... 81
Figure 3:7 Niveau de dégradation observé (exemple 2)..... 82
Figure 3:8 Système étudié..... 83
Figure 3:9 Politique périodique d'inspection adoptée..... 84
Figure 3:10 Arbre de probabilité associé..... 85
Figure 3:11 Exemple de création de matrice *M*2..... 88
Figure 3:12 Structure d'un chromosome..... 88
Figure 3:13 Niveau de dégradation observé (Meilleur dégradation)..... 90
Figure 3:14 Niveau de dégradation observé (Pire dégradation)..... 90
Figure 4:1 Système étudié..... 95
Figure 4:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée..... 96
Figure 4:3 Arbre de probabilité associé..... 97
Figure 4:4 L'approche proposée..... 100
Figure 4:5 Exemple illustratif de l'application de l'heuristique constructive..... 103
Figure 4:6 Le changement du coût total pour le cas 1 et une limite acceptable égale à 0..... 106
Figure 4:7 Le changement du coût total pour le cas 1 et une limite acceptable égale à 10..... 106
Figure 4:8 Le changement du coût total pour le cas 2 et une limite acceptable égale à 0..... 107
Figure 4:9 Le changement du coût total pour le cas 2 et une limite acceptable égale à 10..... 107
Figure 4:10 Le changement du coût total pour le cas 3 et une limite acceptable égale à 0..... 108
Figure 4:11 Le changement du coût total pour le cas 3 et une limite acceptable égale à 10..... 108
Figure 4:12 Le changement du coût total pour le cas 4 et une limite acceptable égale à 0..... 108
Figure 4:13 Le changement du coût total pour le cas 4 et une limite acceptable égale à 10..... 108
Figure 4:14 Le changement du coût total pour le cas 5 et une limite acceptable égale à 0..... 109
Figure 4:15 Le changement du coût total pour le cas 5 et une limite acceptable égale à 10..... 109
Figure 5:1 Le système étudié..... 113
Figure 5:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée..... 115
Figure 5:3 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))..... 121
Figure 5:4 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))..... 121
Figure 5:5 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))..... 122
Figure 5:6 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))..... 122
Figure 5:7 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))..... 123
Figure 5:8 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))..... 123
Figure 5:9 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))..... 124
Figure 5:10 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))..... 124
Figure 5:11 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))..... 125
Figure 5:12 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))..... 125
Figure 5:13 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))..... 126

Figure 5:14 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2)) 126

Figure 5:15 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)) 127

Figure 5:16 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)) 127

Figure 5:17 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)) 128

Figure 5:18 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)) 128

Figure 6:1 Système étudié 135

Figure 6:2 Politique périodique d'inspection adoptée 136

Figure 6:3 Arbre de probabilité associé. 138

Figure 6:4 L'organigramme de l'approche proposée. 142

Figure 7:1 Système étudié 149

Figure 7:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée 150

Figure 7:3 Arbre de probabilité associé. 151

Figure 7:4 Dates d'inspection et de remplacement 156

Figure 7:5 Coût total en fonction du scénario de dégradation
(Séquence de pièce de rechange de type (0,0)) 161

Figure 7:6 Coût total en fonction du scénario de dégradation
(Séquence de pièce de rechange de type (1,1)) 161

Figure 7:7 Coût total en fonction du scénario de dégradation
(Séquence de pièce de rechange de type (1,2)) 162

Figure 7:8 Coût total en fonction du scénario de dégradation
(Séquence de pièce de rechange de type (1,3)) 162

Figure 7:9 Coût total en fonction du scénario de dégradation
(Séquence de pièce de rechange de type (2,2)) 163

Liste des Tableaux

Tableau 1:1 Activités de logistique inverse 31

Tableau 2:1 Nombre de remplacements et seuils décisionnels d_r et d_s (Cas 1)..... 59

Tableau 2:2 Nombre de remplacements et seuils décisionnels d_r et d_s (Cas 2) 60

Tableau 2:3 Le cas des couples (0,y)..... 68

Tableau 2:4 Le cas des couples (1,y)..... 69

Tableau 2:5 Le cas des couples (2,y)..... 70

Tableau 2:6 Le cas des couples (3,y)..... 71

Tableau 3:1 Les qualités de pièces de rechange installées dans la machine. 81

Tableau 3:2 Les qualités de pièces de rechange installées dans la machine (exemple 2). 82

Tableau 3:3 Les temps et les coûts de remanufacturation. 89

Tableau 3:4 L'état initial du stock S2. 89

Tableau 3:5 Les temps et les coûts de remanufacturation. 91

Tableau 4:1 Les borne des variables a_i. 104

Tableau 4:2 L'état initial du stock $S2$. 104

Tableau 4:3 Les temps et les coûts de remanufacturation. 104

Tableau 4:4 Les coûts moyens en appliquant les méthodes sur cinquante scénarios de dégradation réelle. 105

Tableau 5:1 Les bornes des variables a_i. 120

Tableau 5:2 Les temps et les coûts de remanufacturation. 120

Tableau 5:3 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0)). 121

Tableau 5:4 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2)). 122

Tableau 5:5 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)). 123

Tableau 5:6 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)). 124

Tableau 5:7 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0)). 125

Tableau 5:8 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2)). 126

Tableau 5:9 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)). 127

Tableau 5:10 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)). 128

Tableau 5:11 L'état initial du stock $S2$. 129

Tableau 5:12 Quantité et coût total engendré pour le pire et meilleur scénarios de dégradation en fonction du paramètre δ_1. 129

Tableau 6:1 Les bornes des variables aléatoire a_{ri} de chaque machine. 143

Tableau 6:2 Les seuils décisionnels utilisés pour chaque machine..... 143

Tableau 6:3 Les temps et les coûts de remanufacturation..... 144

Tableau 6:4 Les temps et les coûts de remanufacturation..... 144

Tableau 6:5 L'état initial des stocks S3 et S4. 144

Tableau 6:6 Les configurations du système de productions proposées. 145

Tableau 7:1 Les étapes de Heuristique_Inspection_2. 153

Tableau 7:2 Les temps et les coûts de remanufacturation..... 157

Tableau 7:3 Les Seuils d_s..... 158

Tableau 7:4 Les Seuils d_r..... 158

Tableau 7:5 La variation du coût total en fonction de la probabilité $P_{regroup}$, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1). 159

Tableau 7:6 La variation du coût total en fonction de la probabilité $P_{regroup}$, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V2). 160

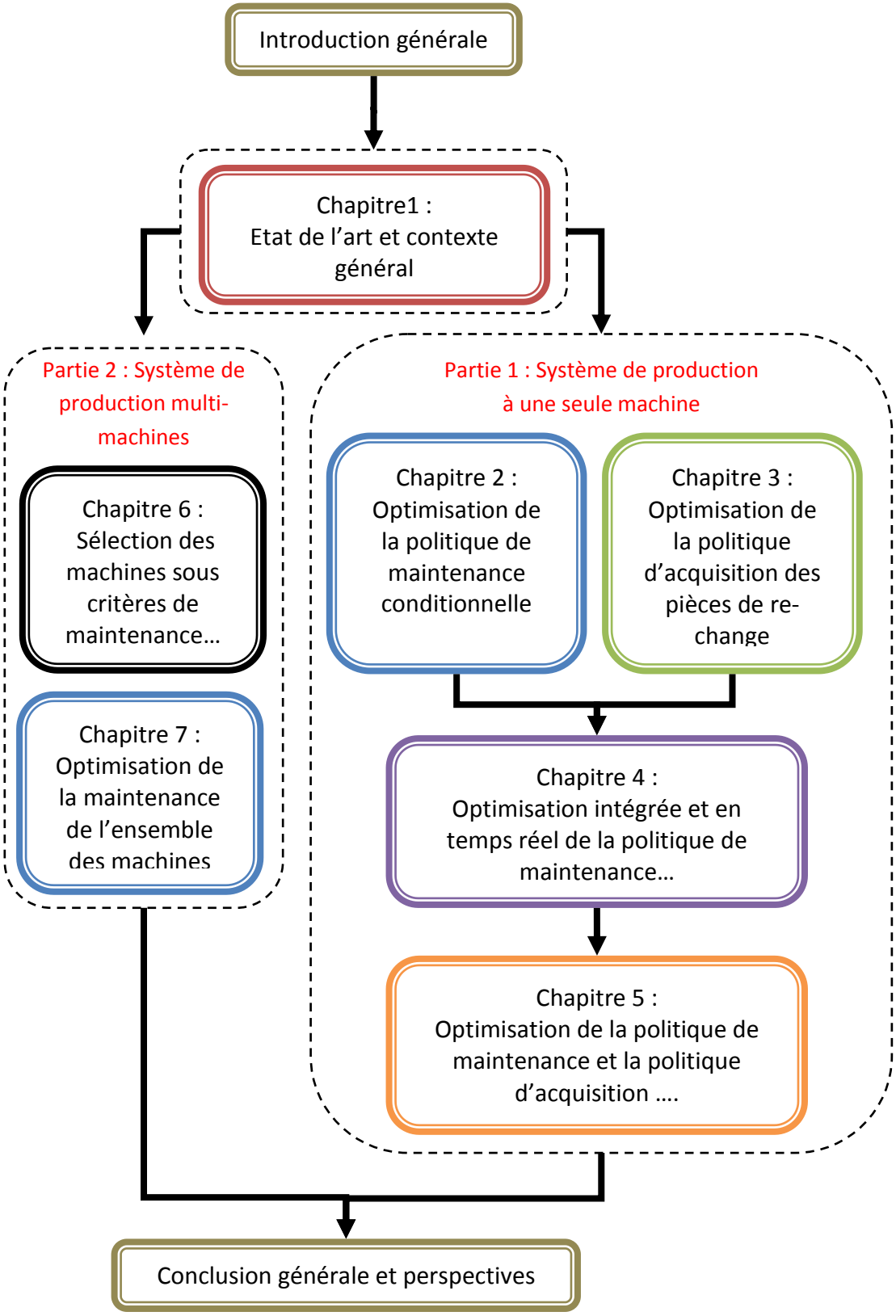


Figure 0:1 Synoptique du manuscrit de thèse

Introduction générale

La révolution industrielle reste une étape très importante dans l'histoire de l'industrie, durant laquelle elle a connu un basculement très fort, avec un passage d'une société agraire et artisanale vers une société commerciale et industrielle. L'étendu de ce basculement, a affecté non seulement la société mais aussi la politique et l'environnement. Le besoin de satisfaire les exigences d'une société en expansion a entraîné la négligence de l'aspect environnementale, en matière de consommation des matières premières, mais aussi par les déchets qui polluent l'environnement. Cette situation a duré plusieurs décennies avant que les acteurs concernés, et plus précisément les industriels et les états, ne s'intéressent aux effets néfastes de cette évolution industrielle en matière de environnement et l'impact sur la nature. Cet intérêt a donné naissance à des politiques variées sur tous les plans industriels, politiques, sociétal,...

Sur le plan logistique, nous avons constaté l'apparition d'une autre forme de chaîne logistique nommée, chaîne logistique inverse. Cette chaîne logistique est très similaire à sa "maternelle" la chaîne logistique classique d'un point de vu concept de base. Seulement que les opérations qui constituent les concepts de base sont différentes. Par exemple, l'acquisition de la matière première dans le cas d'une chaîne logistique classique est extraite de la nature, mais de l'autre côté, la matière première est extraite de produits finis dans le cas d'une chaîne logistique inverse. Dans ce cadre, la remanufacturation (en Anglais : le remanufacturing) est l'une des opérations les plus importantes et les plus intéressantes de la chaîne logistique inverse. Ce type d'opérations a connu son application sur une grande échelle que durant la deuxième guerre mondiale au États-Unis et au Royaume-Uni. A cette époque, il n'y avait pas de production de nouvelles voitures ou de pièces de rechange dans ces pays, puisque toutes les installations de production ont été consacrées à la production de matériel de guerre. Ainsi, la remanufacturation a été largement utilisée pour garder les vieilles voitures en état de fonctionnement [1]. Dans leur ouvrage, " *Remanufacturing Modeling and Analysis* "[1], Ilgin et Gupta rapportent que les nouvelles réglementations strictes mises en place par le gouvernement Américain pour le traitement des produits en fin de vie, a commencé par la sensibilisation de l'opinion public envers les questions environnementales, ce qui a forcé de nombreux fabricants d'établir des installations spécifiques pour les opérations de remanufacturation. En 2007, Il existait 70 000 entreprises de remanufacturation, ces entreprises ont créé 53 milliards de dollars de revenu par an, et près de un demi-million de postes d'emplois. Ils rapportent aussi que ces chiffres n'inclus pas les activités de remanufacturation du Ministère de la Défense Américain, qui remanufacture fréquemment les différents équipements militaires. Les exemples des profits réalisés par les entreprises sont nombreux, cependant, l'intérêt de la remanufacturation ne se limite pas seulement au profit de l'entreprise, mais s'étend vers le client aussi. Dans [1] les auteurs rapportent que les prix des produits remanufacturés est généralement entre 30% à 40% plus bas que celui des produits neufs. Ce qui est très attractif pour les consommateurs et permettant de créer une nouvelle catégorie de clients. Ainsi, la remanufacturation est bénéfique non seulement pour l'environnement par la réduction d'utilisation de la matière pre-

mière, la réduction de l'énergie épuisée pour produire les articles neufs, mais elle est aussi bénéfique pour l'économie en créant de l'emploi, en renforçant la compétitivité et en augmentant les marges de bénéfices de l'entreprise.

D'autre part, les systèmes de production sont soumis à des défaillances dues aux différentes contraintes (environnement, conception,…). Cette défaillance peut conduire à l'interruption du fonctionnement normal du système si aucune action de maintenance n'est réalisée. La maintenance du système peut avoir des conséquences économique et environnementale. En effet, les conséquences environnementales peuvent se concrétiser par l'émission de gaz, a la fuite d'huile ou toutes formes liquides ou gazeuses de produits dangereux, ou par la destruction des composants retirés. Ce genre de conséquences ne peut pas être résolu définitivement, mais, nous pouvons y remédier en adoptant des politiques de recyclage, de réutilisation et remanufacturation. Cependant, les conséquences économiques sont liées à la politique de maintenance adoptée, au phénomène de défaillance et au type d'actions réalisées. Pour cela des politiques de maintenance ont été mises en place pour maintenir le système en état de fonctionnement sans avoir besoin de dépenser énormément. Une excellente politique de maintenance est celle qui prend en compte tous les objectifs fixés par les différents composants du système de production. En commençant par les stocks, l'atelier de production, l'atelier de maintenance, le transport, le traitement des déchets, etc. Cependant, la complexité des systèmes de production rend la satisfaction de l'ensemble des objectifs une tâche très difficile. D'autant plus, que certains objectifs sont antagonistes, ce qui conduit parfois à la recherche d'un compromis pour une satisfaction admissible de chaque objectif.
Dans la gestion de la maintenance deux politiques de base peuvent être employées. La première consiste à attendre la panne avant d'exécuter la maintenance. Cette politique est intéressante d'un point de vu coût direct de maintenance, cependant elle est désavantageuse d'un point de vu maintien du système en état de marche. Cette politique est connue sous le nom de maintenance corrective. La deuxième politique consiste à observer le phénomène de panne du système, afin de définir des dates ou fréquences d'intervention pour réaliser la maintenance avant même que le système ne tombe en panne. Cette politique est intéressante d'un point de vu maintien du système en état de marche, cependant, elle est désavantageuse d'un point de vu coût direct de maintenance. Cette politique est connue sous le nom de maintenance préventive. A partir de ces deux politiques de base, les chercheurs ont développé d'autres politiques de maintenances qui visent à garantir un équilibre entre le coût de maintenance et la disponibilité du système. Dans ce cadre, la maintenance conditionnelle est l'une des politiques les plus efficientes. Elle permet d'anticiper les pannes en se basant sur des paramètres définis et précis du système.

Nous avons posé les grandes lignes de cette thèse dans la perspective d'étudier la maintenance de systèmes de production avec une prise en compte simultanée des aspects environnemental et économique. Nous commençons notre étude par une présentation de l'état de l'art des travaux réalisés dans le cadre de la chaîne logistique inverse et plus précisément la remanufacturation, ainsi que les travaux réalisés dans le cadre de la maintenance et plus particulièrement la maintenance conditionnelle. Ensuite, nous tentons de trouver les points de rapprochement entre ces deux domaines dans le but de dégager un apport scientifique lié à l'intégration de la chaîne logistique inverse et la maintenance d'un système de production par le biais d'une politique de maintenance conditionnelle. Ce travail s'est basé sur les résultats des travaux de Wang et al. (2008) [2]

concernant la maintenance conditionnelle pour un système à dégradation aléatoire et Wang et al. (2011) [3] sur l'optimisation d'une politique hybride de manufacturation/remanufacturation.

Ce travail se divise en deux parties introduit par un chapitre présentant le cadre général de notre étude. Dans ce chapitre introductif, nous présentons un état de l'art des travaux en relation avec les problématiques étudiées, à savoir la maintenance conditionnelle et les chaînes logistiques inverses, ainsi que les outils de résolution utilisés. Nous concluons ce volet avec la description des différents problèmes étudiés par la suite.

La première partie comporte quatre chapitres : Le premier, consiste à optimiser la maintenance sans prendre en compte la gestion des pièces de rechange utilisées lors les remplacements. Pour cela, nous proposons un algorithme génétique basé sur un modèle de simulation pour l'optimisation de la maintenance conditionnelle. Dans le deuxième chapitre, nous proposons une heuristique pour le calcul des dates d'inspection d'une manière séquentielle afin d'améliorer le plan de maintenance conditionnelle. Par la suite, nous nous intéressons à l'optimisation de la gestion des pièces de rechange selon une politique de maintenance prédéterminée. Ainsi, un algorithme génétique est proposé pour déterminer la séquence de pièces de rechange à utiliser lors de chaque remplacement de l'horizon de production. Le troisième chapitre de cette partie est l'optimisation intégrée et dynamique (en temps réel) de la gestion des pièces de rechange avec la maintenance du système de production. Le dernier chapitre de cette partie de notre travail consiste dans la prise en compte de la production et la qualité de la production dans l'optimisation intégrée de la gestion des pièces de rechange et la maintenance du système de production. Pour cela, nous proposons une approche hybride pour la détermination de la meilleure stratégie intégrant le plan de production, le plan de maintenance et le contrôle de qualité.

La deuxième partie de notre travail se positionne au niveau stratégique et s'intéresse à la problématique de conception des systèmes de production. Dans un premier chapitre de cette partie nous proposons un outil d'aide à la décision pour la sélection et le choix des machines à utiliser pour la conception du système de production parmi un ensemble de machines candidates. Ce choix est soumis à une contrainte de disponibilité du système final et vise à la minimisation du coût de total de maintenance. Ainsi, nous proposons un algorithme génétique hybride qui nous fournit la liste des configurations satisfaisant la contrainte initiale de disponibilité. Dans un deuxième chapitre nous proposons une heuristique de regroupement des dates d'intervention pour des inspections réalisées sur plusieurs machines.

Nous terminons cette thèse, par une conclusion générale portant des perspectives de travail pour le court et le long terme.

Chapitre 1 Etat de l'art et contexte général des travaux

1.1 Introduction

La maintenance et la chaîne logistique en boucle fermée ont été largement étudiées dans la littérature. Durant les dernières décennies ces études se sont étendues pour répondre aux nouveaux besoins industriels vers l'intégration de la production et la maintenance. Cependant, peu de travaux dans la littérature traitant l'intégration de la chaîne logistique en boucle fermée dans la maintenance des systèmes de production [4].

Dans ce chapitre, nous présentons une brève étude bibliographique de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation stochastique et les chaines logistiques à boucle fermée. Par la suite, nous définissons le contexte général de cette thèse en présentant les différents systèmes étudiés et les hypothèses générales qui cardent notre travail.

1.2 Maintenance conditionnelle pour un système de production à dégradation stochastique

1.2.1 La maintenance

Dans une entreprise, la maintenance représente l'une des fonctions les plus sensibles et les plus discrètes. Elle est en lien direct avec la fonction principale de l'entreprise, qui est la production, ce qui lui donne le rôle de contrôleur de performance, visant à améliorer la rentabilité du système de production. Dans ce contexte, la maintenance est définie selon la norme NF EN 13306 X 60-319 de 2010 par " l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise " [5]. Cependant, une forte amélioration de la performance d'un système de production nécessite d'importants moyens financiers, ce qui nous mène à chercher un équilibre entre performance et dépense. En conséquence, plusieurs stratégies de maintenance ont été développées pour atteindre cet équilibre. Les deux principales stratégies de maintenance sont :

La maintenance préventive " exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ", elle sert principalement à éviter les pannes.

La maintenance corrective " exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ".

Deloux [6] propose un schéma représentatif des différentes stratégies de maintenance suivant le type de maintenance étudié.

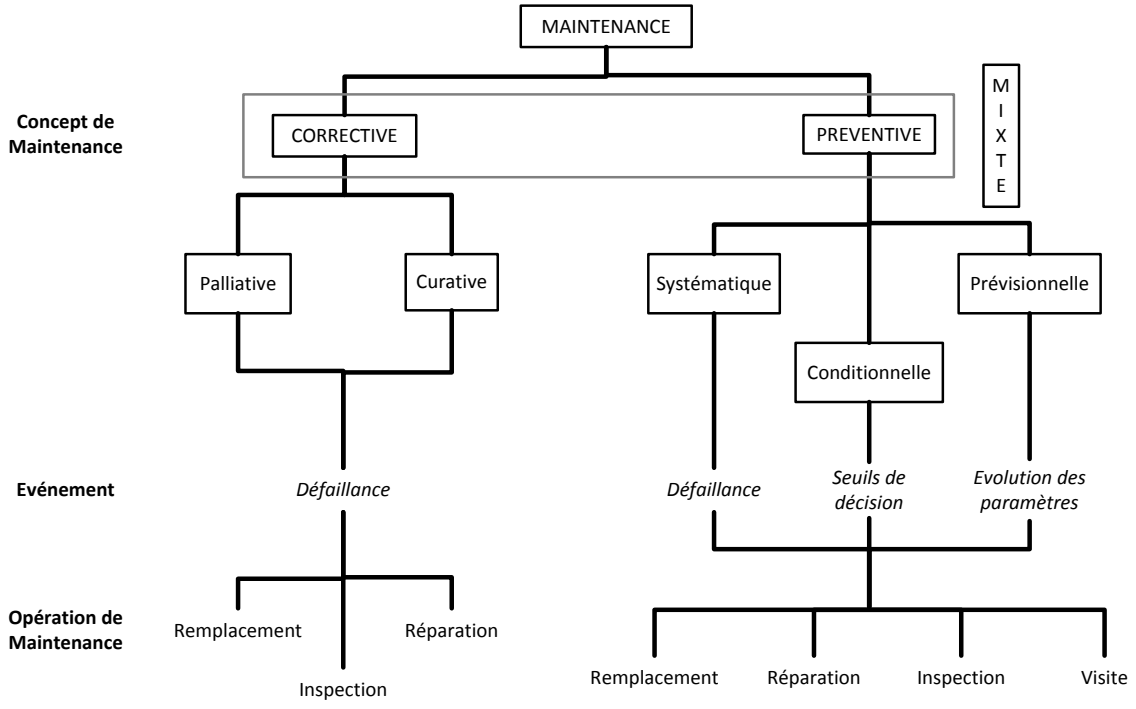


Figure 1:1 Les différentes stratégies de maintenance [6]

La maintenance corrective peut être réalisée sous deux formes :

- *Maintenance palliative* : il s'agit de réparations qui servent à remettre le système en état provisoire de marche.

- *Maintenance curative* : il s'agit de réparations complètes qui servent à remettre le système à son état initial.

La maintenance préventive peut être réalisée sous trois formes :

- Maintenance systématique : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

- Maintenance conditionnelle : Maintenance préventive basée sur une surveillance du comportement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

- Maintenance prévisionnelle : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien.

1.2.2 La défaillance

Par définition la défaillance est la " cessation de l'aptitude d'un bien à remplir une fonction requise " [5]. L'événement de défaillance est succédé par un état de panne, qui peut être complète ou partielle. La défaillance peut être causée durant la conception, la fabrication, l'utilisation ou même durant la maintenance. Parmi les raisons de défaillance causée durant l'utilisation, nous trouvons :

- *La défaillance due à l'usure*, dont la probabilité d'occurrence augmente avec la durée d'utilisation, le nombre d'unités d'usage du bien ou avec les sollicitations auxquelles il est soumis.

- *La défaillance due au vieillissement*, dont la probabilité d'occurrence augmente au cours du temps calendaire. Ce temps est indépendant du temps de fonctionnement du bien.

Dans la littérature, de nombreuses classifications des défaillances ont été proposées. Deloux a repris dans sa thèse [6], une des classifications présentée par Rausand et Hoyland dans leurs ouvrage " *System Reliability Theory : Models, Statistical Methods, and Applications* " [7]. La première classification est basée sur les causes des défaillances et la deuxième est basée sur les impacts des défaillances sur les performances du système.

1. Classification de la défaillance par cause

Cette classification est principalement composée par deux classes :

- *Défaillances aléatoires* : qui se manifestent par une dégradation physique du système, causant la diminution de sa performance. Cette classe est composée de deux sous-classes : des défaillances liées à la dégradation du système, dues à l'usage ou au vieillissement du système ; des défaillances liées au stress, qui peuvent être dues à une cause extérieure ou erreurs humaines commises durant la phase opératoire ou de maintenance.

- *Défaillances systématiques* : qui proviennent d'une erreur commise lors de la conception, la fabrication ou l'utilisation du système sans qu'il soit dégradé physiquement. Cette classe est composée de deux sous classes : des défaillances liées à la conception, dues à une erreur commise avant la phase opératoire du système (fabrication, installation…) ; des défaillances liées aux interactions humaines, en commettant des erreurs à la phase opératoire ou lors de la maintenance.

2. Classification de la défaillance par impact sur les performances du système

Cette classification est une adaptation d'une classification proposée par Blache et Shrivastava [8], dans laquelle les auteurs se basent sur une première décomposition des défaillances en deux sous classes. La première sous-classe regroupe les défaillances intermittentes et la deuxième regroupe les défaillances étendues. La figure 1:2 illustre la classification proposée par Blache et Shrivastava [8]:

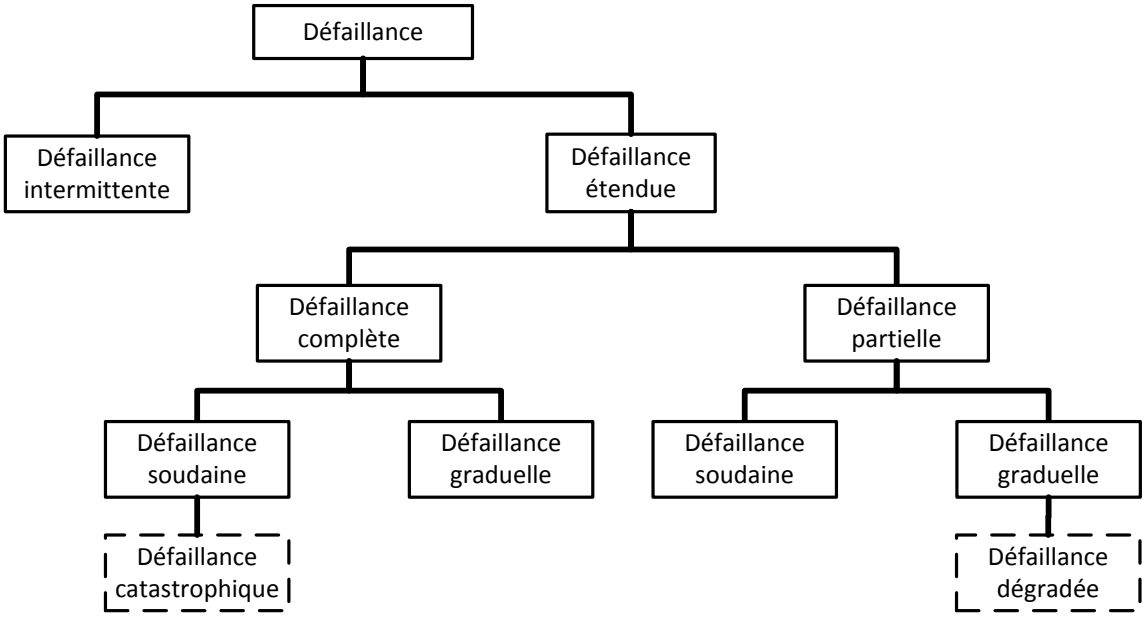


Figure 1:2 Classification de la défaillance [7]

Dans le livre " *System Reliability Theory : Models, Statistical Methods, and Applications* " [7], ces défaillances sont définies comme suit :

- *Défaillances intermittentes* : des défaillances qui surgissent d'une perte de certaines fonctions pour une très courte durée de temps. Le bloc fonctionnel retrouve ses performances immédiatement après la défaillance.

- *Défaillances étendues* : des défaillances qui surgissent d'une perte de certaines fonctions qui perdure dans le temps jusqu'à ce qu'une partie du bloc fonctionnel est remplacé ou réparé. Ce type de défaillances peut être divisé en :

- *Défaillances complètes* : des défaillances qui causent une perte complète de la fonction principale,
- *Défaillances partielles* : des défaillances qui conduisent à la perte d'une partie des fonctions sans causer la perte complète de la fonction principale.

Comme l'indique la figure 1:2, les défaillances complètes et les défaillances partielles se divisent en deux classes de défaillances :

- *Défaillances soudaines* : des défaillances qui ne peuvent pas être prédites par un test ou une inspection.
- *Défaillances graduelles* : des défaillances qui pourraient être prévues par des tests ou des inspections. Une défaillance progressive qui représente une perte graduelle de la performance du système.

Quand une défaillance est complète et soudaine, on parle alors d'une défaillance catastrophique, et quand une défaillance est partielle et graduelle, on parle alors d'une défaillance dégradé.

Dans cette thèse nous nous intéressons à la défaillance graduelle, sur laquelle on applique une maintenance conditionnelle.

1.2.3 Défaillance par dégradation graduelle et maintenance conditionnelle

La dégradation est par définition " un changement néfaste de l'état physique, avec le temps, l'utilisation ou en raison d'une cause externe " [5], ce qui peut conduire à la défaillance du système. Ainsi, cette dégradation est représentée par une perte graduelle de la performance du système avant d'atteindre l'état de panne (partielle ou complète). Ceci permet de modéliser la dégradation par un espace qui ne se réduit pas à deux états seulement : l'état de marche et l'état de panne, mais s'étend à des états de dégradation intermédiaires. Dans la littérature, on distingue deux familles de modèles de dégradation :

- *Modèle de dégradation discrète* : ce modèle est souvent utilisé dans le cas d'un système qui se dégrade par passage d'un état à un autre avec un saut, ainsi, l'incrément de dégradation s'ajoute au niveau de dégradation précédant jusqu'à la défaillance totale du système (cf. figure 1:3). Ce type de dégradation est modélisé de différentes manières : Processus semi-Markovien [9][10] ; Processus Markovien [11] ;…

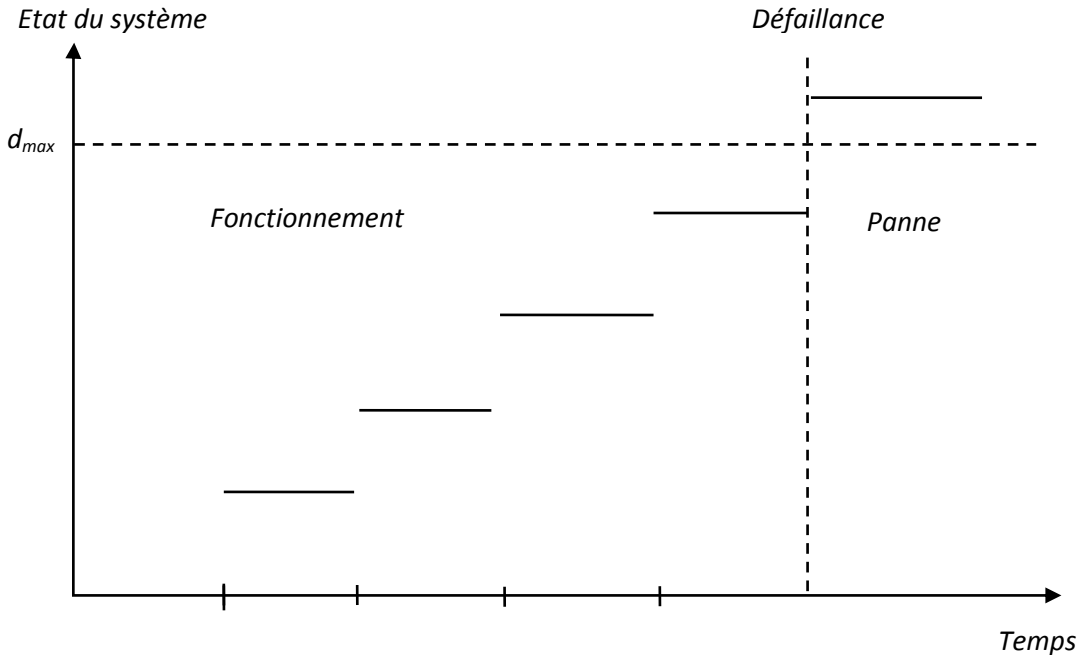


Figure 1:3 Modèle de dégradation discrète

- *Modèle de dégradation continue* : ce modèle est utilisé pour modéliser les systèmes dont on connait la loi de l'incrément de dégradation entre deux instants consécutives, ainsi, nous pouvons estimer le niveau de dégradation à tout instant [12] (cf. figure 1:4).

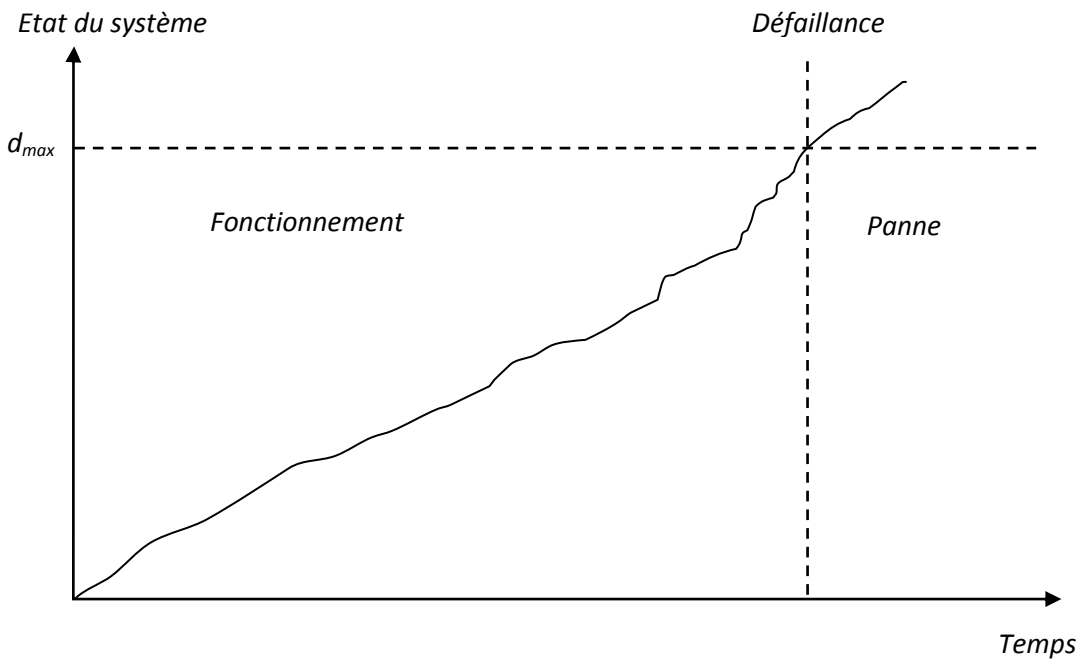


Figure 1:4 Modèle de dégradation continue

D'autre part, la maintenance conditionnelle qui est une maintenance préventive basée sur la surveillance de l'évolution du système, par observation visuelle, contact mécanique (vibration, qualité de l'huile, analyse non destructive…) ou par retour d'information électronique (alarmes, électronique, retour défaut sur régime de neutre, etc.) ce qui permet d'anticiper la défaillance et de planifier une intervention de maintenance et cela afin d'éviter la panne.

Dans la littérature, l'utilisation de politiques de maintenance basées sur une maintenance conditionnelle sont largement adoptées pour des systèmes de production à défaillance par dégradation graduelle continue. Nous proposons une décomposition des travaux de recherche intégrant la maintenance conditionnelle pour des systèmes à dégradation stochastique. Ainsi, nous pouvons les décomposer selon les trois critères suivants :

1. Type de dégradation, qui peut être de nature :

- Monotone : Il s'agit d'une dégradation monotone croissante, l'incrément de dégradation est représenté par une variable aléatoire ΔX_{t_2} donnée par la différence entre deux instants successifs t_1 et t_2 de l'état de système X_t [2][13][14][15][16] [17][18][19][20][21].

- Non-monotone : Il s'agit dans ce cas d'une dégradation non-monotone, généralement croissante avec réduction de la dégradation, et qui peut être définie comme une amélioration de l'état du système. Dans ce cas, l'incrément de dégradation est modélisée par une variable aléatoire $A_n = X_n^+ - X_n^-$ avec X_n^+ et X_n^- deux variables aléatoires indépendantes représentant respectivement la dégradation et l'amélioration de l'état du système entre les deux instants *n*-1 et *n*. L'état du système à l'instant *n*, est $D_n = \max(D_{n-1} + X_n^+ - X_n^-, 0)$ [22].

2. Les seuils décisionnels utilisés, il s'agit des seuils utilisés par la politique de maintenance adoptée. Dans le cas d'une dégradation aléatoire, on fait appel à une maintenance conditionnelle, avec laquelle des seuils de dégradations décisionnels sont définis. Dans la littérature on distingue les seuils décisionnels suivants :

- Un seuil de dégradation critique généralement noté L ou L_c (c pour correctif). Dans ce cas, le système est considéré en état de panne en dépassant le seuil L, ainsi, une maintenance (remplacement) corrective est planifiée.

- Un seuil pour la gestion de la maintenance préventive noté L_p (p pour préventive), ce qui fait de la maintenance conditionnelle, une action de maintenance préventive. Ainsi, si au moment de l'inspection le niveau de dégradation du système a atteint ou a dépassé le seuil L_p, alors le système est maintenu (remplacé) préventivement [22][14][15][16][19] [17][13][18][21][2][20].

- Un seuil pour la gestion des commandes des pièces de rechange noté L_s, dans le cas où la maintenance est faite par un remplacement [2][21].

Pour les systèmes à dégradation variable, où le taux de dégradation change durant le fonctionnement, une adaptation des seuils décisionnels peut être adoptée [22][14][15][17].

D'autre part, une approche multi-seuils peut être adoptée pour le calcul des dates d'inspection [23][13][24]. Dans [24] les auteurs attribuent un coût différent à chaque remplacement effectué, et ceci selon le niveau de dégradation trouvé au moment de l'inspection.

3. La politique d'inspection ou de surveillance adoptée, qui est la base de la maintenance conditionnelle, et qui permet d'examiner les caractéristiques du système. Dans la littérature, on retrouve trois politiques adoptées :

- Une surveillance continue : qui renvoie l'état des caractéristiques et les paramètres du système en temps réel [20].

- Inspection périodique : qui existe sous deux formes possibles, selon le plan choisi ; une inspection périodique constante [2][21], et une inspection périodique adaptative [17][14][15], où l'inspection s'adapte avec le changement du taux de dégradation.

- Inspection non périodique [13][16][23][18][22][25], généralement justifiée par le cout élevé de l'inspection ou la difficulté d'intervenir à tout moment pour certain systèmes complexes. Dans [13][22][18] les auteurs utilisent une fonction qui a comme attribut le niveau de dégradation au moment de l'inspection pour déterminer la date suivante. Dans [23][13] les auteurs utilisent les seuils décisionnels pour déterminer les dates d'inspection. Dans [25] les auteurs ont adapté l'algorithme A*, pour la construction d'un arbre donnant lieu au plan optimal d'inspection.

1.3 Chaîne logistique en boucle fermée

La chaîne logistique en boucle fermée est le résultat de la fusion des deux chaînes logistiques nommées : chaîne logistique classique et chaîne logistique inverse, par traduction des deux termes anglais " forward supply chain " et " reverse supply chain ". Cette composition de chaîne logistique est définie par Guide et Van Wassenhave (2009) [26] comme étant " la conception, le

contrôle et l'exploitation d'un système afin de maximiser la création de valeur durant le cycle de vie complet d'un produit avec récupération dynamique de la valeur des différents types et volumes de récupération dans le temps ". Ainsi, la chaîne logistique en boucle fermée est une chaine logistique classique avec la reprise des produits auprès des clients et la récupération de la valeur ajoutée par la réutilisation de la totalité du produit, ou certains de ses modules, composants et pièces. La figure 1:5 illustre le schéma type d'une chaine logistique en boucle fermée.

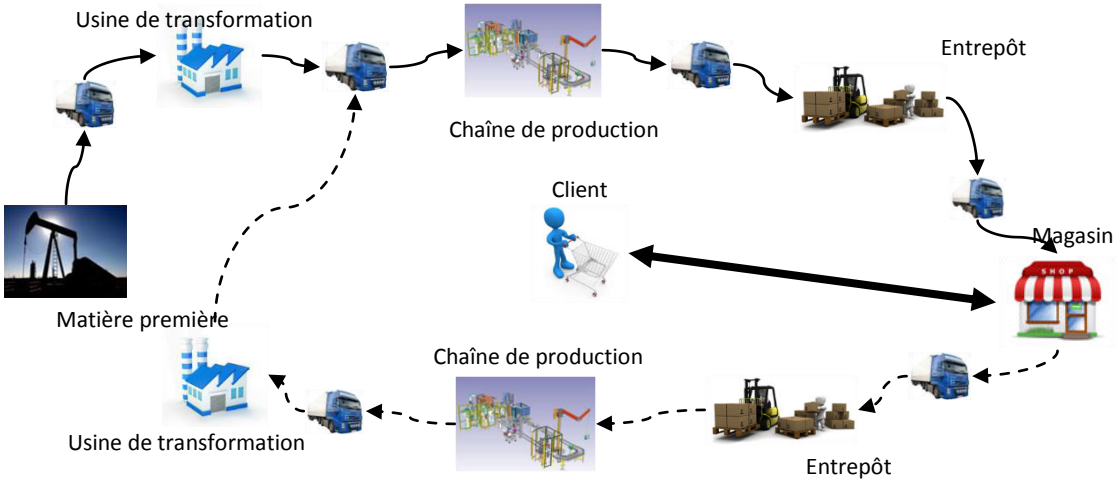


Figure 1:5 Le schéma type d'une chaine logistique en boucle fermée

1.3.1 Chaîne logistique classique

Dans la littérature, de nombreuses définitions ont été proposées pour définir une chaine logistique. La Londe et Masters (1994) [27] la définissent comme étant " un ensemble d'entreprises qui se transmettent des matières ". Pour Mentzer J. et al. (2001) [28] Une chaîne logistique est un " ensemble de trois ou plusieurs entités (organisations ou individus) directement impliqués dans les flux en amont et en aval de produits, matériaux et/ou d'information provenant d'une source à un client ". Chopra S. et Meindl P. (2007) [29] la définissent comme la " composition de toutes les étapes impliquées, directement ou indirectement, à répondre à une demande de la clientèle ". D'autres auteurs, définissent la chaîne logistique comme un réseau d'organisations. Ganeshan R. et Harrison T.P. (1993) [30] la définissent comme " le réseau des moyens de production et de distribution qui assurent les tâches d'approvisionnement en matières premières, la transformation de ces matières premières en produits semi finis et en produits finis, et la distribution de ces produits finis aux clients ". Pour Christopher M. (1992) [31] une chaîne logistique est " le réseau des organisations qui sont impliqués, grâce à des liens en amont et en aval, dans les différents processus et activités qui produisent la valeur sous forme de produits et services fournis au consommateur final ". Dans ces définitions, on peut remarquer que la chaîne logistique est une composition d'entités qui interagissent entre elles. Mentzer J. et al. (2001) [28] identifient trois degrés de complexité de la chaîne logistique :

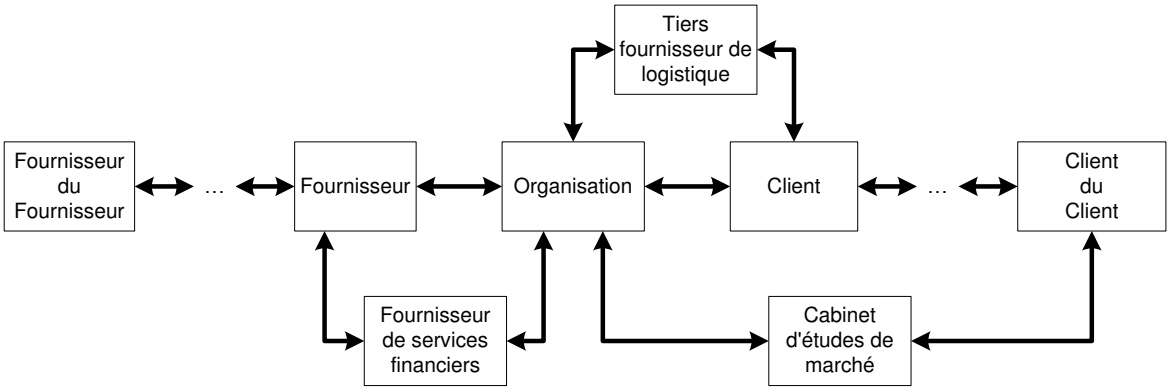
- *Chaîne logistique directe* : se compose d'une entreprise, un fournisseur, un client et qui sont impliqués dans les flux en amont et/ou en aval de produits, services, finances, et/ou d'informations.

- Chaîne logistique étendue : comprend les fournisseurs du fournisseur immédiat et les clients de la clientèle immédiate, tous impliqués en amont et/ou en aval dans le flux de produits, services, finances, et/ou d'information.

- *Chaîne logistique ultime* : comprend toutes les organisations impliquées dans l'ensemble des flux en amont et en aval de produits, de services, les finances et l'information depuis l'ultime fournisseur jusqu'à l'ultime client.

(a) Chaîne logistique directe

(b) Chaîne logistique directe



(c) Chaîne logistique directe

Figure 1:6 Classification d'une chaîne logistique par sa complexité [28]

Dans sa thèse [32] Mouloua déduit les principales cinq tâches réalisées dans une chaîne logistique, à partir de la définition proposée par Ganeshan R. and Harrison T.P. (1993) [30] pour la chaîne logistique :

- *L'approvisionnement* : c'est la tâche la plus en amont dans une chaîne logistique. Elle représente l'étape la plus primitive pour atteindre un produit fini.

- *La production* : elle représente le cœur de la chaîne logistique. Il s'agit des compétences en matière de conception et de transformation, de la matière première en produit fini.

- *Le stockage* : c'est une tâche qui peut se répéter plusieurs fois tout au long de la chaîne logistique. Elle peut concerner la matière première, les produits semi-finis et les produits finis, et ceci par les différentes entités qui composent la chaîne logistique.

- *La distribution et le transport* : comme pour le stockage, c'est une tâche qui peut se répéter tout au long de chaîne logistique et elle peut aussi concerner les différentes formes que prend le produit fini durant les phases de transformation.

- *La vente* : c'est la tâche la plus importante et la plus critique de la chaîne logistique, puisqu'il s'agit de l'aboutissement du processus.

1.3.2 Chaîne logistique inverse

Logistique inverse, chaîne logistique inverse ou chaîne logistique verte, différents termes qui représentent le même concept. Lambert et Riopel [33] remarquent que certaines définitions posées pour ces termes, se limitent en réalité qu'à une partie bien spécifique de la logistique inverse. Carter et Ellram (1998) [34] présentent la distribution inverse comme " le retour, mouvement à contre-courant d'un produit ou de matière découlant de la réutilisation, du recyclage ou de la destruction. Ce mouvement à contre-courant peut être associé aux problèmes environnementaux, tout comme à la qualité ou à l'usure (dégradation dans le temps) et qui sont souvent opérés par des nouveaux membres auxiliaires au système ". Rodrigue et al. (2001) [35] présentent la logistique verte, comme étant un " système de distribution et de transport efficient ami de l'environnement ". Wu et Dunn (1995) [36] mentionnent que " la logistique verte est plus que la logistique inverse car elle cherche à économiser les ressources, à éliminer des déchets et à améliorer la productivité ". Hart (1997) [37] va plus loin en ajoutant qu'elle doit avoir la plus petite empreinte sur l'environnement.

La logistique inverse est définie par Kroon et Vrijens (1995) [38] comme " faisant référence aux talents de la gestion de la logistique et les activités requises pour réduire, gérer et disposer les déchets dangereux et non dangereux provenant du matériel d'emballage et des produits. De plus, elle inclut la distribution inverse ". Fleischmann et al. (1997) [39] mentionnent que la logistique inverse " contient les activités logistiques, jusqu'au bout, pour les produits usagés qui ne sont plus requis par les usagers jusqu'aux produits qui peuvent être réutilisables dans le marché ". Cependant, la définition la plus populaire est celle donnée par Rogers et Tibben-Lembke (1998) [40] dans laquelle ils définissent la logistique inverse comme étant " le processus de planification, d'implantation, et de contrôle de l'efficience, de la rentabilité des matières premières, des en-cours de production, des produits finis, et l'information pertinente du point d'utilisation jusqu'au point d'origine dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la bonne façon ". Lambert et Riopel [33] définissent la logistique inverse comme " le processus de planification, d'implantation, et de contrôle de l'efficience, de la rentabilité des matières premières, des en-cours de production, des produits finis, et l'information pertinente du point d'utilisation jusqu'au point d'origine dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la bonne façon tout en assurant une utilisation efficace et environnementale des ressources mises en œuvre ". Cette dernière définition a été proposée pour englober toutes les définitions proposées pour la logistique inverse, la distribution inverse et la logistique verte. La figure 1:7 [33] illustre la relation entre ces trois termes utilisés pour la logistique inverse.

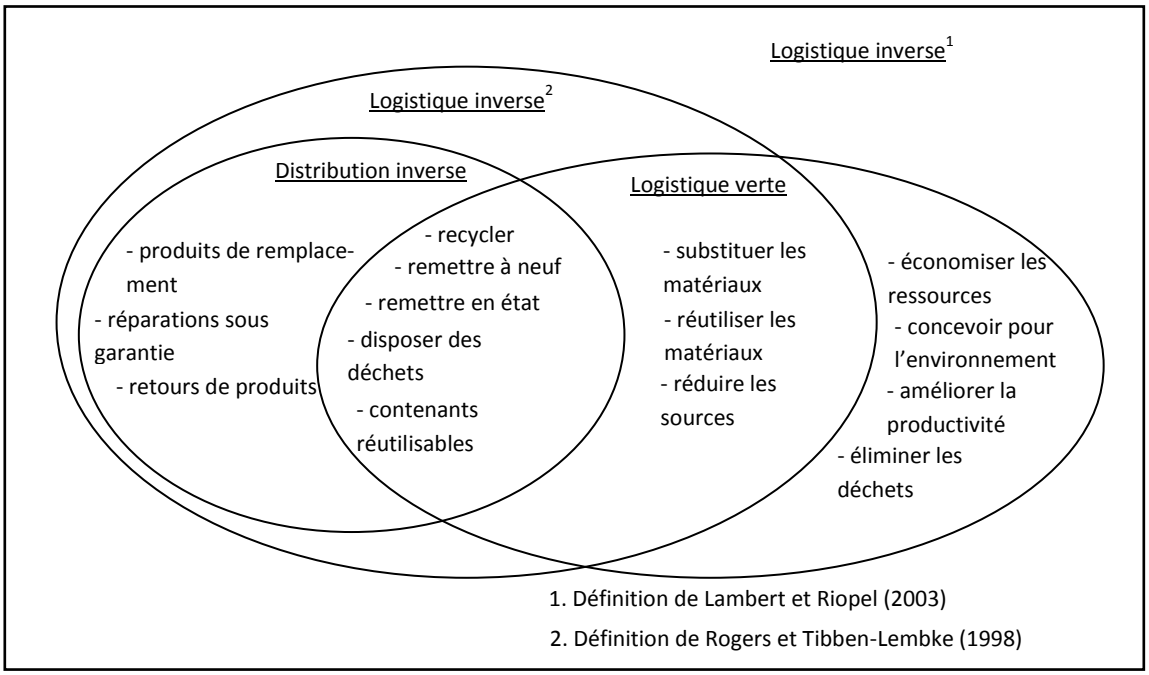


Figure 1:7 Définition de la logistique inverse proposée avec ses interrelations des définitions précédentes [33]

D'autre part, Srivastava [41] utilise le terme chaîne logistique verte par traduction du terme anglais " Green supply-chain " pour désigner le concept de la logistique inverse. Il définit la chaîne logistique verte comme " l'intégration de la dimension environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, y compris la conception des produits, la sélection et l'approvisionnement en matériaux, processus de fabrication, la livraison du produit final aux consommateurs ainsi que la gestion de fin de vie du produit après sa durée de vie utile ". Pour l'auteur de cette définition la logistique inverse n'est qu'une sous-catégorie de la chaîne logistique verte dite les opérations vertes. Nous n'allons pas plus loin dans ce débat de terminologie, mais nous allons nous intéresser plus en détail aux éléments qui composent la sous-catégorie "opérations vertes".

Si on compare les définitions proposées pour la chaîne logistique et celles proposées pour la chaîne logistique verte (logistique inverse), on retrouve les mêmes tâches réalisées dans les deux chaînes. Cependant, les activités qui en découlent sont différentes par leurs finalités.

Rogers et Tibben-Lembke [42] proposent une décomposition des activités de la logistique inverse en deux groupes, et ceci selon l'objet traité. Ainsi, les activités sont soit liées au produit lui-même, ou bien liées au matériel d'emballage. Le tableau 1:1 reprend la classification proposée par Rogers et Tibben-Lembke des activités de la logistique inverse.

Dans [41], l'auteur propose une classification basée sur le contexte du problème dans la chaîne logistique verte. Il propose une décomposition selon trois catégories : importance la de chaîne logistique verte, conception verte et opérations vertes. La figure 1:8 illustre les éléments de la sous-classe opérations vertes.

Objet	Activités
Produit	Retourner au fournisseur
	Revendre
	Vendre via magasin entrepôt (Outlet)
	Reconditionner
	Remettre en état
	Remettre à neuf
	Récupérer certains matériaux
	Récupérer tous les matériaux
	Recycler
	Donner
	Enfouir
Emballage	Réutiliser
	Remettre en état
	Récupérer certains matériaux
	Récupérer tous les matériaux
	Recycler
	Enfouir

Tableau 1:1 Activités de logistique inverse [42]

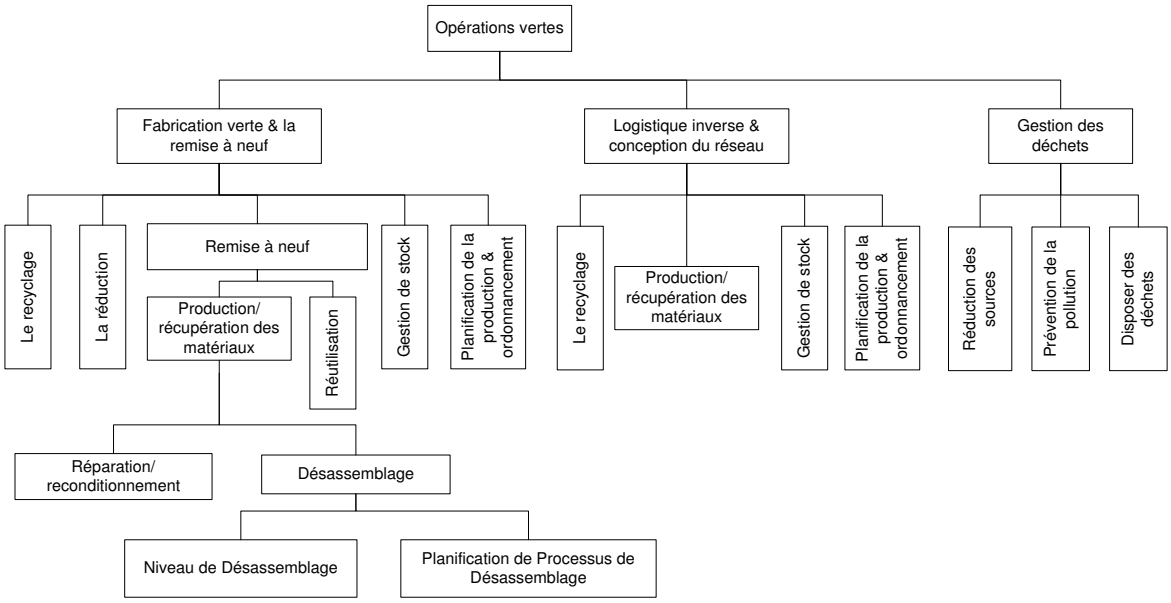


Figure 1:8 Classification des opérations verte (Chaîne logistique verte) selon le contexte du problème [41]

Dans le reste de ce mémoire, nous utiliserons le terme " chaîne logistique inverse " pour désigner les activités dites de la logistique inverse définies par Rogers et Tibben-Lembke [42] et Lambert et Riopel [33] et les activités qui composent la sous-catégorie opérations vertes définies par Srivastava [41].

D'autres classifications des activités de la logistique inverse ont été présentées dans la littérature. Parmi elles, nous pouvons citer la représentation de Thierry et al. (1995) [43], qui ordonnent les

activités selon le degré de désassemblage du produit dans un schéma fermé de la chaîne logistique (cf. figure 1:9). Une autre classification de Lebreton (2006) [44], qui ordonne les activités de la chaîne logistique inverse selon le niveau de réintégration du produit/composant du produit dans les étapes de fabrication (cf. figure 1:10).

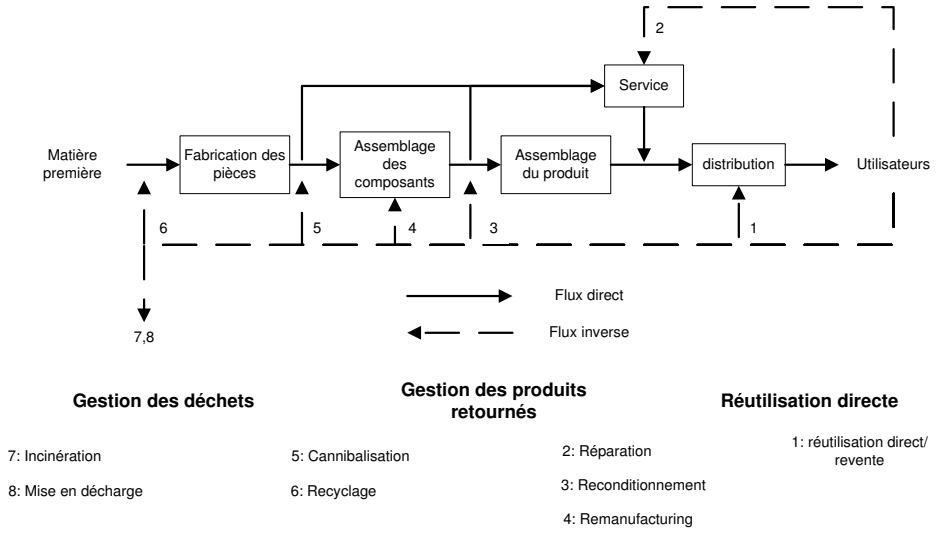


Figure 1:9 Classification des activités de chaîne logistique inverse selon Lebreton [44]

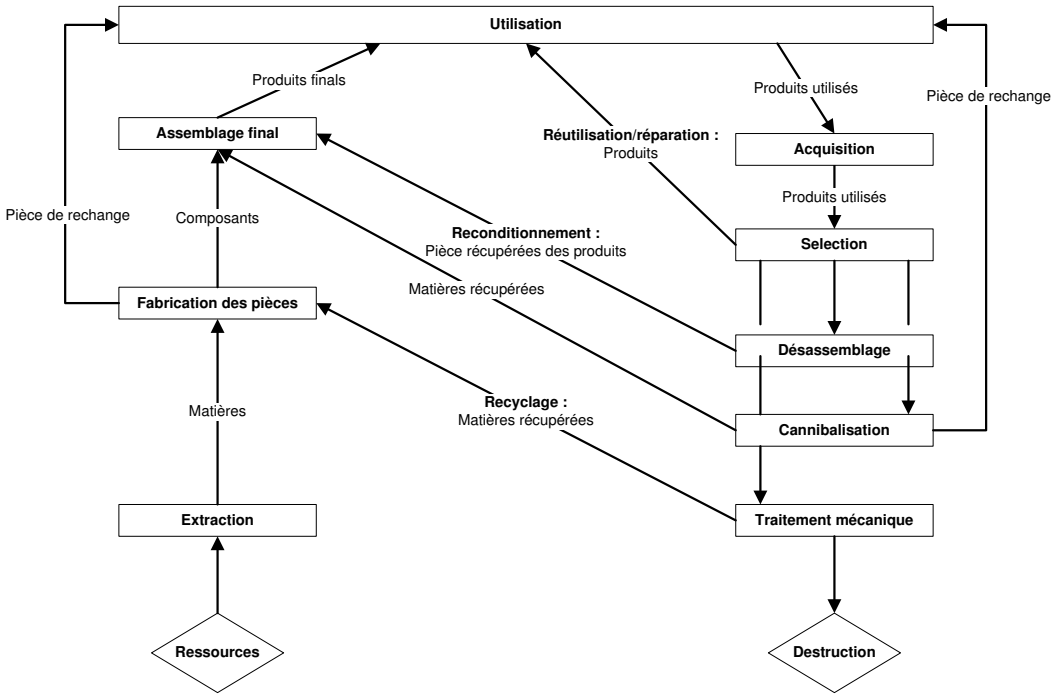


Figure 1:10 Classification des activités de chaîne logistique inverse selon Thierry et al. [43]

Les principales activités qui composent la chaîne logistique inverse sont : la collecte, l'inspection, le tri, le recyclage, la réutilisation, la réparation (remise en état) et la remanufacturation (remise à neuf).

- *Collecte* : La première étape de la récupération de la valeur, qui consiste à la localisation et la sélection des produits par type, afin de les transporter vers des points de tri [41].

- *Inspection* : Elle est définit dans la norme [5] comme un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, soumettant à essai ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. Afin de décider de l'action à réaliser sur le produit (le produit peut être remanufacturé, réutilisé dans l'état, recyclé…).

- *Tri* : C'est le processus de séparation des éléments selon des critères prédéfinis, en plusieurs catégories afin qu'ils soient conduits vers les autres activités de la chaîne logistique inverse.

- *Recyclage* : Il est définit dans [45] comme " une série d'actions que les produits jetés subissent après la collecte, désassemblage, le tri, et traitement pour extraire de la matière première utilisée de nouveau pour produire d'autres articles ". Selon Srivastava [41], " le recyclage est défini par la récupération de la matière contenue dans les produits utilisés et ceux qui n'ont pas fonctionnés ". L'ensemble des processus de récupération de produits que nous citerons, ont comme objectif de conserver l'identité et la fonctionnalité des produits aussi longtemps que possible. Cependant, dans le processus de recyclage, l'identité et la fonctionnalité du produit est perdu.

- *Réutilisation* : Dans [45] elle est définie comme un terme générique qui regroupe plusieurs formes d'opérations, que le produit pourra subir en fin de vie, pour être remis en service, sous la même forme, avec ou sans réparation. On distingue plusieurs formes de réutilisation, dont :

- *Réutilisation directe* : remettre les produits qui n'ont pas de défaut, à la chaîne de distribution.
- *Redéploiement* : l'utilisation d'un produit pour la même application, sans avoir d'hypothèses ni de garanties sur son aptitude à accomplir sa fonction requise.
- *Réaffectation* : il s'agit d'utiliser une partie ou la totalité du produit pour un nouvel usage.

- *Réparation* (*Remise en état*) : Elle est définie dans [45] comme une correction d'un défaut spécifique dans le produit. Ainsi, le but de la réparation est de remettre les produits en état de marche. Cependant, la qualité du produit réparé est généralement inférieure à celle de la qualité des produits neufs. C'est un processus qui implique la fixation et/ou le remplacement des parties défectueuses. Généralement, la réparation ne nécessite pas un désassemblage complet du produit. Ce qui permet de réaliser sa réparation sur place, ou dans des centres de réparation.

- *Remanufacturation* (*Remise à neuf*) : Dans [45] elle est définie comme le processus de récupération d'un produit en fin de vie, et la réalisation de la restauration nécessaire pour revenir aux conditions de performance d'origine avec une garantie de produit résultant au moins égale à celle d'un nouveau produit comparable. Selon Parker et Butler (2007) [46], elle est définie comme une série d'étapes de fabrication appliquées sur une partie, ou sur la totalité du produit en fin de vie, pour le rendre comme neuf ou avec de meilleures performance et garantie. Hoshino et al. (1995) [47] la définit simplement comme un recyclage qui intègre des opérations d'usinage. Dans notre travail, le remanufacturation est utilisée comme un terme générique qui désigne les différentes

opérations réalisées dans une chaîne logistique inverse, et ceci par des niveaux de remanufacturation. Ainsi, la réutilisation directe est le plus bas niveau de remanufacturation possible.

Les problématiques de recherches qui se focalisent sur l'aspect du remanufacturation dans une chaîne logistique en boucle fermée sont nombreuses et diverses. Parmi lesquelles nous pouvons citer les travaux qui traitent la conception du réseau de la chaîne logistique, la gestion des retours, ceux qui traitent l'aspect économique et environnemental, ou la conception des produits.

1. Conception de la chaîne logistique **:** La base de toute chaîne logistique est l'infrastructure sur laquelle se base les opérations réalisées tout au long de la chaîne. Cette infrastructure permet le stockage, la production, le transport et toutes les formes d'échange qui peuvent être nécessaires. Les composantes de l'infrastructure sont définies par les besoins et les d'activités à réaliser. Dans une chaîne logistique simple, une station de transformation est nécessaire pour transformer les matières premières en produits semi-finis. On a besoin d'un réseau de transport fiable, qui permet de transporter les matières premières, les produits semi-finis et des produits finis vers les centres de distribution. On a aussi besoin d'une chaîne de production pour fabriquer les produits finis. Par analogie, la chaîne logistique inverse nécessite aussi une infrastructure propre aux besoins demandés pour réaliser les opérations qui la constituent : un réseau de transport pour la collecte des déchets et des produits réutilisables, des ateliers de désassemblage/assemblage, etc. Dans cette perspective, Huang et al. (2014) [48] propose une méthodologie pour sélectionner les fournisseurs appropriés et souhaitables sur la base d'un problème de tournées de véhicules, pour les activités de collecte, désassemblage, remanufacturation, recyclage et élimination des déchets. Pour cette problématique, ils proposent une approche basée sur la théorie des ensembles approximatifs. Fleischmann et al., (2001) [49] proposent un modèle générique pour un problème de localisation des installations dans le cas d'une chaine logistique inverse. Ils réalisent une comparaison entre leur modèle et le modèle proposé pour une chaîne logistique inverse. Lu et Bostel (2007) [50] présentent un problème de localisation pour un réseau de remanufacturation à deux niveaux. Les auteurs proposent une programmation mixte pour modéliser deux flux de produit (flux direct et flux inverse) et leurs interactions. Su et al. (2012) [51] ont abordé le problème de conception d'un atelier de désassemblage/assemblage. Leur travail consiste à étudier l'effet de l'utilisation d'un composant commun sur les structures de fabrication parallèles et mixtes.

2. Conception du produit, effet économique et environnemental des retours **:** Le traitement des produits récupérés reste une procédure très difficile et très délicate. Le type d'activité réalisée sur ces produits dépend de leur nature. Par exemple, les produits électroniques sont généralement réutilisables d'une manière directe dans le cas où la récupération se fait durant sa durée de vie. Cependant, ils sont peu réutilisables s'ils arrivent en fin de vie, ainsi, les composants de ce type de produit sont généralement recyclés et utiliser comme source de matière première. Pour les produits mécaniques, la proportion de réutilisation durant et après la fin de vie reste plus élevée comparant aux produits électroniques. Ceci est expliqué par le phénomène de défaillance qui peut toucher les deux familles de produit et qu'on a déjà mentionné dans la section précédente. Dans ce contexte, des améliorations dévoient être apportées aux produits, d'un point de vu conception afin de faciliter les activités réalisées sur le produit après sa récupération. Dans cette perspective, Wu (2013) [52] traite le problème d'interchangeabilité du produit. Lors de la conception du produit, le fabriquant décide du niveau d'interchangeabilité choisi, ainsi, un niveau élevé

permet un assemblage rapide et moins coûteux, mais aussi un désassemblage plus facile et moins coûteux. Dans son travail, l'auteur de l'article parle de dilemme dans lequel peut tomber le fabriquant du produit original (produit neuf), s'il souhaite faire face à la compétitivité de celui qui réalise les opérations de remanufacturation. Zwolinski et al. (2006) [53] proposent une approche pour l'intégration des contraintes de la remanufacturation tout au long du processus de conception. L'approche est basée sur l'amélioration de la fiabilité de la stratégie de la remanufacturation et l'amélioration des propriétés du produit pour une meilleure adaptation a la remanufacturation.

Le mode de récupération de la valeur d'un produit demeure aussi une question importante à cause des coûts qu'impliquent le mode choisi, et aussi, à cause des effets ou des résultats qui en découlent. Par exemple, la réparation de certains produits implique le rejet de substances qui ont un effet néfaste sur l'environnement, mais aussi une réduction importante de la performance du produit. Ainsi, plusieurs chercheurs, comme Biswas et al. (2013) [54], ont comparé l'impact économique et environnemental de l'utilisation de trois types de compresseurs : réparés, remanufacturés et neufs. Les résultats de leur étude ont montré que la réparation est la meilleure option pour la gestion des produits en fin de vie. Elle est donc une option bénéfique, d'un point de vue environnemental, mais aussi économique. Cependant, cette observation reste valable uniquement dans cette étude de cas et ne peut pas de la généraliser à tout type de produit. Ferrer et Ayres (2000) [55] ont développé un modèle d'impact économique de la récupération des produits et des activités de remanufacturation. Leurs résultats montrent que la remanufacturation favorise la demande de main-d'œuvre et réduit le niveau de transactions interindustrielles (les acteurs qui représentent la chaîne logistique).

3. Gestion des retours **:** le but principal de la chaîne logistique inverse est de récupérer de la valeur des produits en fin de vie, ce qui permet de réduire l'exploitation des sources principales des matières premières. Cependant, la récupération des produits en fin de vie reste problématique due à plusieurs contraintes : d'une part, l'insensibilité des consommateurs vis-à-vis l'intérêt de la récupération, et d'autre part, un manque de politique robuste de la part des industriels pour attirer les consommateurs pour y participer. En conséquence, le retour des produits reste un phénomène non déterministe, qui dépend principalement de la quantité de produits distribués au préalable vers le consommateur. Wang et al. (2011) [3] ont étudié un système hybride, qui réalise la fabrication des produits neufs et la remanufacturation des produits revenant des consommateurs d'une manière stochastique. Le système vise à satisfaire une demande stochastique d'un seul type de produit, avec un stock pour les produits fabriqués et un autre pour les produits récupérés. Leur objectif est de minimiser le coût total du système hybride, liés à la fabrication/remanufacturation, le stockage (produits fabriqués/produits récupérés) et le coût de destruction des produits qui ne sont pas en état d'être remanufacturés. Van der Laan et Teunter (2006) [56] proposent une heuristique pour un système hybride (fabrication/remanufacturing), basée sur la gestion par point de commande (Q,s) pour la partie des produits fabriqués, et une politique de flux tiré/flux poussé pour les produits remanufacturés. Naeem et al. (2013) [57] traitent un problème de dimensionnement de lot pour la production et le remanufacturation d'un seul type de produit. Ils développent un modèle basé sur la programmation dynamique, qui a pour objectif de déterminer les quantités qui doivent être fabriquées ou remanufacturées à chaque période. Inderfurth et al. (2001) [58] abordent la partie retour des produits avec différentes options pour la remanufacturation, où chaque option est destinée à satisfaire une de-

mande spécifique. Comme dans le cas de Wang et al. (2011) [3], la demande et le retour de produits sont considérés comme étant stochastiques, avec des stocks intermédiaires, un pour les produits récupérés du consommateur et un pour chaque option de remanufacturation. Leurs objectif est de trouver une politique périodique optimale de remanufacturation pour chaque option.

1.4 La maintenance et la chaîne logistique

1.4.1 La maintenance des systèmes de production

L'optimisation intégrée du plan de production et du plan de maintenance d'un système de production est une problématique complexe qui a fait l'objet de nombreux travaux. Aghezzaf et al. [59] ont étudié un système de production avec une capacité fixe, produisant un ensemble d'articles sur un horizon de planification fini. L'horizon est divisé en plusieurs périodes d'une longueur fixe, durant lesquelles le système doit satisfaire une demande fixe pour chaque article. Leur objectif est de trouver le meilleur plan de production et de maintenance. Dans [60] Aghezzaf et Najid intègrent une nouvelle politique de maintenance pour le système présenté dans [59], avec la possibilité d'effectuer une réparation minimale lorsque la ligne de production tombe en panne. Ils proposent un modèle non linéaire à variable mixte, qu'ils résolvent en utilisant une heuristique basée sur la relaxation lagrangienne. Kenné et Nkeungoue [61] considèrent un système de fabrication flexible, modélisé par un processus de Markov à temps continu. Ils cherchent à augmenter la capacité du système en contrôlant son état marche. Dans [62] Yalaoui et al. fournissent une amélioration des résultats obtenus par Aghezzaf et Najid [60], avec un temps de calcul et un gap modérés, pour des problèmes de grandes tailles. Fitouhi et Nourelfath [63] ont abordé un problème d'intégration de la production et de la maintenance, à l'aide d'une politique de maintenance préventive non cyclique pour le même système considéré par Aghezzaf et Najid [60]. Par la suite, ils ont étendu leur étude sur un système multi-machines [64]. Kenné et al. (2012) [65] cherchent un plan de production et de maintenance optimal pour un système de fabrication hybride production/remanufacturation, sujet à des défaillances aléatoires.

Tout système de production a pour objectif de satisfaire une demande selon un plan déterminé et convenu entre le client et le fournisseur. Cependant, la satisfaction de cette demande dépend de la qualité des articles fabriqués. En conséquence, un taux de rejet très élevé, nécessite une planification de la production sur un horizon plus long, ce qui empêchera le fournisseur de satisfaire la demande dans les délais prévus. Dans la littérature, un grand intérêt a été montré à la dépendance entre la production et le contrôle de qualité. Yoo et al. [66] traitent le problème de dimensionnement de lot avec une production imparfaite, cette imperfection conduit au retour des articles défectueux. Ces derniers sont envoyés vers la destruction ou destinés à la remanufacturation, afin d'être réintégrés dans la chaîne de distribution. Colledani et Tolio ont réalisé plusieurs études sur la dépendance entre la production et contrôle de qualité. Dans [67] ils ont étudié l'impact de la qualité de la production sur la performance d'un système composé de K stations mises en série et séparées par K-1 buffers. Ils proposent une approche pour évaluer la performance générale du système étudié. Dans [68][69] Colledani et Tolio ont réalisé une extension du problème étudié dans [67]. Ils présentent une modélisation du problème d'intégration de la production et le contrôle de qualité, pour laquelle ils proposent une approche basée sur la méthode d'approximation analytique.

Toutefois, la performance du système est en lien direct avec l'état de détérioration de ce dernier. Ainsi, le taux de rejet des articles fabriqués augmente avec l'augmentation de la détérioration. Ce qui a conduit les chercheurs à intégrer la maintenance dans les problématiques liant la production et le contrôle de qualité. Colledani and Tolio [70] intègrent la maintenance du système de production étudié dans [68][69], où ils modélisent la dégradation du système par un processus Markovien. Ils adoptent une politique de maintenance conditionnelle, basée sur un état critique du system. Bouslah et al. [71] traitent un problème conjoint de contrôle production et de plan d'échantillonnage économique. Le système considéré, fabrique en lot un seul type de produit, et sa disponibilité est décrite par un processus stochastique qui prend les valeurs {0,1}. Les objectifs de cette étude consistent à déterminer la quantité économique de production, le niveau optimal de stock de sécurité et le plan d'échantillonnage économique, afin d'éviter la pénurie pendant la maintenance corrective. Rivera-Gomez et al. [72][73] étudient un système dont la cadence de production est en fonction du niveau du stock et le nombre de pannes à l'instant *t*. L'état du système est décrit par une variable aléatoire qui suit un processus stochastique en temps continu et à état discret. Leur objectif est de déterminer le plan de production et de maintenance optimal, afin de minimiser le coût total.

1.4.2 Chaîne logistique en boucle fermée intégrée à la maintenance

Pour qu'une action de maintenance soit réalisée, d'importantes ressources humaines et matérielles sont nécessaires. Ces ressources peuvent intervenir aux différents niveaux de la maintenance, lors de l'inspection, la surveillance, ou bien lors de l'intervention de maintenance. Les pièces de rechange sont une des ressources matérielles nécessaires pour réaliser l'action de maintenance et utilisées pour remplacer la composante défectueuse du système. Wang et al. (2008) [2] étudient un système composé d'une seule machine, sujette à une dégradation stochastique. Ils proposent une politique de maintenance conditionnelle avec deux types de remplacement : correctif et préventif, dépendamment du niveau de dégradation observé. Ils intègrent un seuil appelé seuil de commande, pour gérer les commandes des pièces de rechange utilisées pour le remplacement. Dans [21] Wang et al. (2009) élargissent leur étude à un système composé de deux machines. Wang (2011) [74] étudie un système composé de *N* composants sujets à une défaillance supposée être procédée en deux étapes (concept du '' temps de retard ''). L'objectif est de déterminer à la fois les paramètres de commande optimaux et les intervalles d'inspection. La politique de maintenance est basée sur deux types de remplacement : remplacement correctif de tout composant défaillant et remplacement préventif des composants considérés lors de l'inspection comme étant dans l'état défectueux. Panagiotidou (2014) [75] traite une problématique intégrant la gestion de pièce de rechange et la planification de la maintenance pour un système composé de *m* éléments identiques. Les éléments du système sont sujets à deux types de pannes causées par le vieillissement. Afin de gérer les commandes des pièces de rechanges utilisées pour le remplacement, l'auteur propose deux politiques : une politique basée sur un contrôle périodique et une politique basée sur un contrôle continu.

Toutefois, la tâche d'acquisition des pièces de rechange peut s'avérer difficile à accomplir. Ceci est lié à la limitation des sources de ces pièces de rechange, à un arrêt de la production de la gamme, ou le passage à une nouvelle technologie, ce qui implique une incompatibilité avec la nouvelle gamme. Dans ces cas, deux solutions sont possibles : soit l'immigration vers la nouvelle technolo-

gie, ce qui coûtera trop cher à l'industriel et implique plus de déchets, soit la nécessité d'adopter une politique basée sur la surproduction et/ou des actions de remanufacturation [76]. Dans la littérature, nous trouvons peu de travaux intégrants la chaîne logistique en boucle fermée comme une source d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour la maintenance.

Chari et al. (2013) [77] les auteurs traitent une problématique liée à une garantie unidimensionnelle basée sur le temps. Durant cette garantie, le fabricant s'engage à effectuer les réparations de toutes les défaillances. Afin de réaliser les réparations, le fabricant utilise des composantes reconditionnées, d'un âge *t*. Les auteurs proposent un modèle mathématique pour calculer les paramètres optimaux de production et de garantie, afin de maximiser le profit. Dans [78] les auteurs traitent le même problème de garantie avec la possibilité d'utilisation des composants neufs.

1.4.3 Objectif de la thèse

Nous avons abordé cette thèse dans la perspective d'intégration de la chaîne logistique en boucle fermée et la maintenance, avec la prise en compte du contrôle de qualité et la production. Notre objectif consiste à établir un rapprochement plus important de la chaîne logistique en boucle fermée, la maintenance et le contrôle de qualité. L'originalité de ce travail se situe principalement dans la problématique abordée et aussi dans les outils utilisés.

Le travail de recherche de cette thèse a donner lieu à une publication dans une revue internationale (*Journal of Intelligent Manufacturing*) et six papiers de conférences internationales (*IFAC MIM, IFAC IMS, IEEE ETFA, IEEE SMC, CIE, MOSIM*).

1.5 Outils Utilisés

1.5.1 Heuristique [79]

Une heuristique consiste en un ensemble de règles empiriques simples qui ne sont pas basées sur l'analyse scientifique. Elles sont basées sur l'expérience et les résultats déjà obtenus et sur l'analogie pour optimiser les recherches ultérieures. Il s'agit de méthodes permettant de trouver «une bonne» solution sur des instances de problèmes de grande taille, ainsi, elles permettent d'obtenir des performances acceptables (qualité de la solution) à des coûts acceptables (en temps et en ressources) dans une large gamme de problèmes.
En général, les heuristiques ne sont pas une garantie de rapprochement sur les solutions obtenues. Elles peuvent être classées en deux familles: les heuristiques spécifiques et méta-heuristiques. Les heuristiques spécifiques sont adaptées et conçues pour résoudre un problème et/ou une instance spécifique. Les méta-heuristiques sont des algorithmes polyvalents qui peuvent être appliqués pour résoudre presque tous les problèmes d'optimisation. Ils peuvent être considérés comme des méthodes générales de niveau supérieur pour résoudre des problèmes d'optimisation spécifiques.

1.5.2 Algorithme glouton [79]

Il s'agit d'une méthode constructive, qui cherche une solution admissible pas à pas, sans jamais revenir sur les décisions précédentes, en prenant à chaque étape la meilleure solution locale. En

commençant à partir de zéro (solution vide), on construit une solution en attribuant des valeurs à une variable de décision, jusqu'à ce qu'une solution complète soit générée.

Quand une solution d'un problème d'optimisation peut être définie par la présence /absence d'un ensemble fini d'éléments $E= \{e_1, e_2,..., e_n\}$, la fonction objectif peut être définie comme une fonction $f : 2^E \rightarrow \mathbb{R}$, et l'espace de solution est défini comme $F \subset 2^E$. Une solution partielle s peut être vue comme sous-ensemble $\{e_1, e_2,..., e_k\}$ de l'ensemble E. La solution initiale (ensemble initial) est un ensemble vide. A chaque étape, une heuristique locale est utilisée pour sélectionner un nouvel élément afin qu'il soit ajouté dans l'ensemble initial. Une fois un élément e_i est sélectionné pour faire partie de la solution, il ne sera jamais remplacé par un autre élément. Le schéma général d'un algorithme glouton est donné comme suit :

Algorithme glouton

s={}; /*solution initiale*/
Répéter
  e_i=Heuristique-locale ($E \backslash \{e/e \in s\}$); /*Le prochaine élément sélectionné moins les éléments déjà sélectionnés*/
  Si $s \cup e_i \in F$ **Alors**
    $s=s \cup e_i$; /*Le test de faisabilité de la solution*/
Jusqu'à ce que la solution soit complète

1.5.3 Algorithmes Génétiques

Les Algorithmes Génétiques (AG) ont été développé par J. Holland dans les années 1970s (Université de Michigan, USA) pour adapter le processus de reproduction naturelle. Ils ont été appliqués sur les problèmes d'optimisation qu'en 1980. Les Algorithmes Génétique sont la classe la plus populaire des Algorithmes Evolutionnaires. Traditionnellement, les AGs sont basés sur le principe de population, où les individus sont représentés sous une forme adéquate, appelé codage. Les individus de la population, évoluent en se reproduisant, durant les itérations de l'algorithme par le biais d'opérations, permettant ainsi de donner naissance à des populations « meilleures ». La première opération est le couplage, qui représente une phase d'exploration dans l'espace de solution. Son principe est de construire de nouveaux individus, en utilisant deux individus de la population courante. Différentes stratégies de couplages ont été présentées dans la littérature, la plus connue est celle des points de coupure. Le deuxième opérateur est la mutation, qui représente la phase d'exploitation de la solution, elle consiste à modifier des génomes d'un individu, en espérant le rendre meilleur. Les stratégies des mutations dépendent du codage choisi, la plus connue est la permutation. Enfin la sélection, qui permet de garder les meilleurs éléments de la population courante, en choisissant les meilleurs éléments créés par les deux opérations précédente, et ainsi, créer une nouvelle population. Comme c'est le cas pour toutes les méta-heuristiques, l'arrêt l'exécution de l'algorithme est programmé par un critère défini au préalable. On trouve dans la littérature, des critères d'arrêt basés sur le temps, sur le nombre d'itérations, ou sur la non-amélioration des solutions courantes pendant un certain nombre d'itérations.
La procédure générale des algorithmes génétique est donnée par le diagramme suivant :

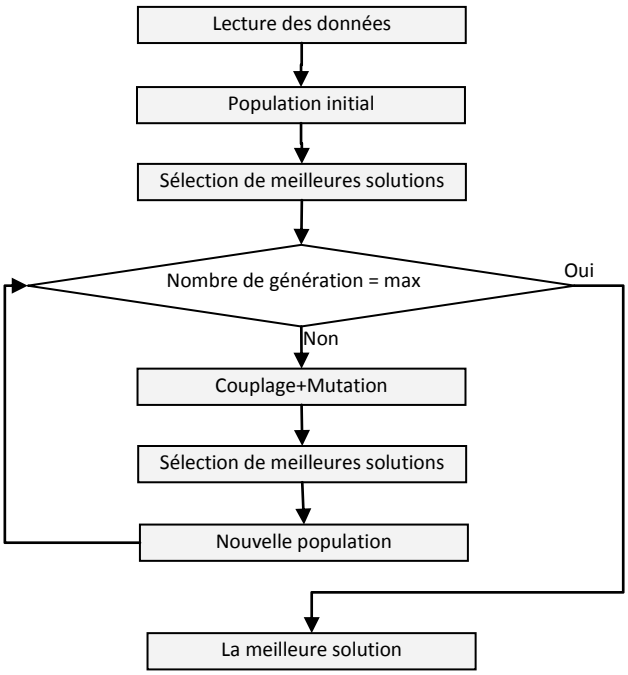


Figure 1:11 Procédure générale des algorithmes génétiques

1.5.4 Modélisation mathématique

La modélisation mathématique est une étape importante dans la résolution du problème, puisqu'elle permet de le mettre en évidence, sous forme de fonction objectif et de contraintes. L'idéal de toute modélisation est d'obtenir un modèle linéaire dont les variables sont réelles. Ce qui permet d'utiliser des solveurs efficaces pour résoudre ce problème. Cependant, cela n'est pas facile à atteindre pour tous les problèmes, donnant parfois des modèles comportant des variables entières ou aléatoires, ce qui rend le problème plus difficile à résoudre. Toutefois, il est possible de trouver des solutions aux modèles relaxés, permettant de trouver des bornes au problème considéré.

1.5.5 Simulation

Il s'agit d'une reconstitution fidèle du fonctionnement d'un modèle, en passant par l'exploitation de ce dernier dans sa globalité. De plus, elle permet la validation ou non des hypothèses, l'obtention des informations quantitatives, l'analyse de certaines approximations, l'étude de la sensibilité d'un modèle à certaines hypothèses ou à certains paramètres, ou tout simplement l'exploration du comportement d'un modèle lorsque celui-ci est mal enseigné (le cas stochastique par exemple).

1.6 Systèmes étudiés et problématiques liées

1.6.1 Système de production à une seule machine

Le premier système étudié dans cette thèse est un système de production, qui vise à satisfaire une demande *D*. Le système est constitué d'un atelier de production avec une machine, un atelier

de remanufacturation et un stock de pièces de rechange. La machine est composée de plusieurs composants, mais cette étude se concentre sur le composant (pièce de rechange) clé principale de ces travaux. Ainsi, l'état global de la machine est réduit à celui de ce composant principal. La machine est sujette à une défaillance due à une dégradation graduelle continue stochastique, causée par l'usage. La défaillance de la machine nécessite des actions de maintenance, avec le remplacement de son composant principal. Une politique de maintenance conditionnelle est adoptée pour maintenir le système en état de marche. Cette politique de maintenance basée sur trois seuils décisionnels et un plan d'inspection. Les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont puisées dans un stock de pièces de rechange S1. En plus de S1, on dispose d'un stock des pièces récupérées S2. Ce stock est situé dans l'atelier de remanufacturation, où les pièces sont examinées et répertoriées selon leur qualité, pour être réutilisées en passant par un procédé de remanufacturation, ou détruites (fin du cycle de vie). Ainsi, le Stock S1 est alimenté par deux sources possibles : un fournisseur externe pour des pièces de rechange neuves et l'atelier de remanufacturation pour des pièces de rechange remanufacturées.

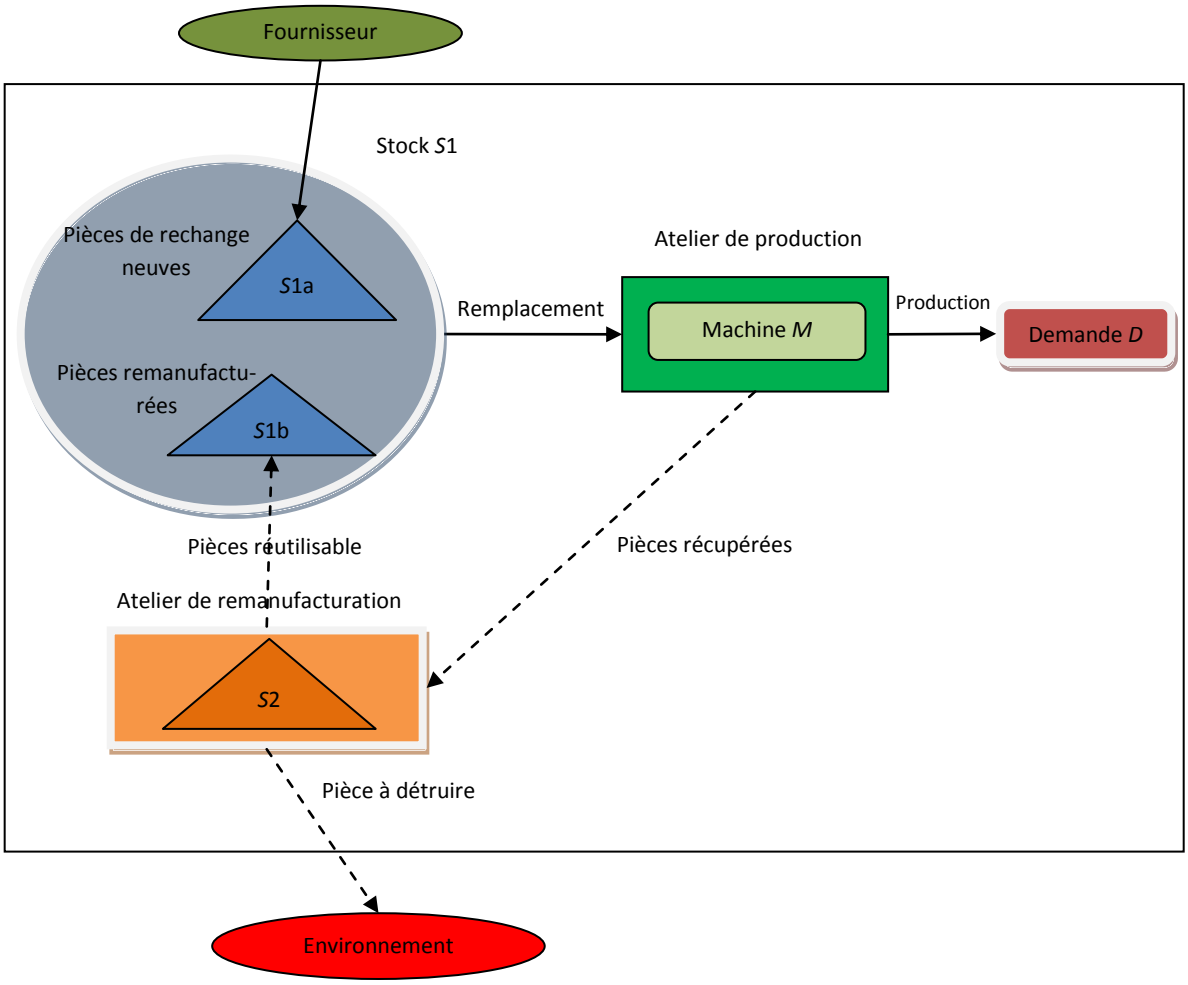


Figure 1:12 Système de production à une seule machine

En considérant ce système nous avons traité une problématique intégrant la gestion de maintenance, la gestion d'acquisition des pièces de rechange par un schéma à boucle fermée et la ges-

tion de la production, avec une interdépendance entre la maintenance et la qualité des articles fabriqués par l'atelier de production. Pour atteindre cet objectif, nous avons entamé notre étude par une optimisation séquentielle de la maintenance et la gestion des pièces de rechange. Ainsi, nous avons commencé par l'optimisation des paramètres de la maintenance conditionnelle, sans prendre en compte la gestion d'acquisition des pièces de rechange. Par la suite, nous avons procédé à l'optimisation de la gestion d'acquisition des pièces de rechange, tout en fixant les paramètres de maintenance. Par la suite, nous avons abordé l'optimisation intégrée de la maintenance et la gestion des pièces de rechange, pour un cas dynamique de dégradation de la machine (en temps réel). Enfin, nous avons traité l'optimisation intégrée de l'acquisition des pièces de rechange, de plan de maintenance et de contrôle de qualité.

1.6.2 Système de production multi-machines

Le deuxième système étudié dans cette thèse est un système de production, constitué d'un atelier de production, composé de *m* machines indépendantes et parallèles, un atelier de remanufacturation et un stock de pièces de rechange. Les machines sont identiques, et gérées d'une manière indépendante, tel que chaque machine constitue un système indépendant (Identique au système à une seule machine)

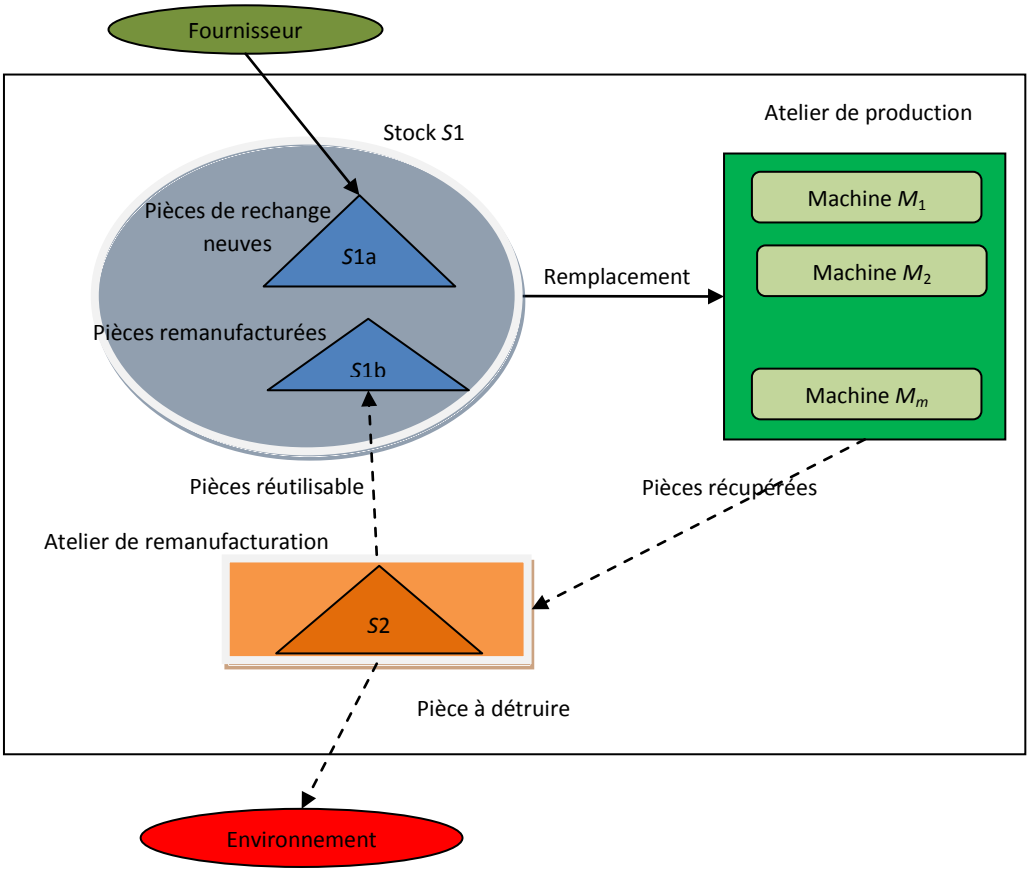


Figure 1:13 Système de production à *m* machine

Nous avons abordé ce système sous deux angles différents : Le premier, consiste à déterminer l'ensemble des machines utilisées pour la conception de l'atelier de production, en se basant sur les critères de maintenance et de satisfaction de la demande. Le deuxième, est l'optimisation du

plan de maintenance de l'ensemble du système, en minimisant les coûts engendrés par le plan adopté.

1.6.3 Mode de défaillance du système

Comme mentionné précédemment, la (les) machine(s) qui compose(nt) l'atelier de production est (sont) sujette(s) à une défaillance due à une dégradation graduelle continue stochastique, causée par l'usage. Ce qui nécessite le remplacement du composant principal de la machine en panne, par une autre pièce de rechange. De ce fait, l'état de la machine est réduit à l'état de la pièce principale installée suite à ce remplacement.
Nous notons par $d(t)$, le niveau de dégradation de la machine (la pièce installée) à l'instant t, dont l'incrément de dégradation est une variable aléatoire strictement positive, qui suit une loi uniforme. Cet incrément de dégradation dépend de la qualité de la pièce de rechange installée à l'instant t. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivant :

$$d(t)-d(t-1) = a_i \qquad (2:1)$$

Où : a_i est l'incrément de dégradation, si la pièce installée dans la machine est de qualité i à l'instant t ($i = 0...n$) ; $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

1.6.4 Qualité de pièces de rechange

Les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont considérées comme le composant principal de la machine. Elles sont classifiées selon leur niveau de dégradation en n qualités. Une qualité est définie par un intervalle noté $[L_i, L_{i+1}[$ sur la longueur de l'échelle de dégradation. Si le niveau de dégradation d'une pièce de rechange appartient à l'intervalle $[L_i, L_{i+1}[$, alors cette pièce est de qualité i. Ainsi, le niveau initial de dégradation de la qualité i est L_i. Donc, les qualités des pièces de rechange sont décrites comme suit :
Pour un niveau de dégradation donné $d(t)$, si $L_i \leq d(t) < L_{i+1}$, alors la qualité de la pièce de rechange installée dans la machine est de qualité i noté ∇_i, où $i = 0,...,n$; $L_0 = 0$, $L_n = d_{max}$, $L_{n+1} = \infty$, $L_i < L_{i+1}$. Avec d_{max}, le niveau de dégradation à partir duquel la pièce de rechange n'est plus réutilisable. Ainsi, une nouvelle pièce de rechange est considérée de qualité 0, les pièces de rechange réutilisables sont de qualité 1, 2,…, n-1, et la pièce de rechange de qualité n est la pièce qu'on ne peut plus réutilisée et sera destinée à destruction.

1.6.5 Remanufacturation des pièces récupérées

Comme on l'a mentionné précédemment, la remanufacturation dans notre travail est utilisée comme un terme générique pour désigner les différentes opérations de chaîne logistique inverse, à savoir la réutilisation, la réparation, la remise à neuf. Le type d'opération dépend du niveau de remanufacturation choisi. La remanufacturation est réalisée sur les pièces récupérées de la machine lors des remplacements antérieurs. Le niveau de remanufacturation choisi est déterminé lors de la commande et dépend de la qualité de la pièce sélectionnée. Suite à la remanufacturation d'une pièce, la qualité de cette dernière sera améliorée en réduisant son niveau de dégradation (figure 1:14).

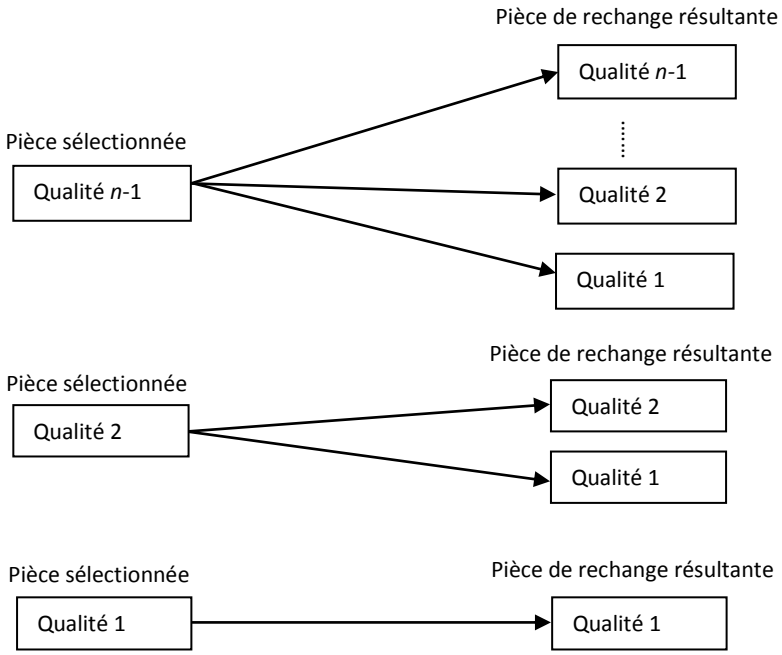


Figure 1:14 Les niveau de remanufacturation possibles

1.6.6 La politique de maintenance conditionnelle adoptée

Pour la maintenance du système de production étudié, nous adoptons une politique de maintenance conditionnelle. Cette politique de maintenance est basée sur deux seuils décisionnels : un seuil de gestion des remplacements préventifs d_r et un seuil de gestion de commandes des pièces de rechange. De plus, un seuil fixé d_{max} utilisé pour définir l'état de panne du système, où le composant principal de machine sera remplacé correctivement, avec $0 \leq d_s < d_r < d_{max}$. Les deux remplacements préventif et correctif nécessitent l'intervention directe sur la machine des techniciens spécialisés. En outre, cette maintenance conditionnelle est basée sur la connaissance du niveau de dégradation du système par le biais d'une inspection parfaite, qui se fait aussi par une intervention directe sur la machine. Par conséquence nous pouvons diviser les interventions réalisées sur une machine, en deux catégories, selon le niveau de dégradation observé : des interventions pour déterminer le niveau de dégradation (inspections) et des interventions pour réaliser les remplacements (correctifs et préventifs).

Les seuils décisionnels permettent de décomposer l'échelle de dégradation en deux zones principales selon l'état de fonctionnement du système : une zone active (ZA) délimitée par l'intervalle $[0, d_{max}[$, et une zone de panne (ZP) délimitée par l'intervalle $[d_{max}, +\infty[$. La zone active est subdivisée en deux zones : zone de remplacement préventif (ZPR) délimitée par l'intervalle $[d_r, d_{max}[$, et zone de non remplacement (ZNR) délimitée par intervalle $[0, d_r[$.
D'autre part, nous pouvons aussi décomposer l'échelle de dégradation en deux zones : zone de commande (ZC) définie par l'intervalle $[d_s, +\infty[$, et une zone de non commande (ZNC) délimitée par l'intervalle $[0, d_s[$. Notons qu'une commande inclue la fabrication d'une pièce de rechange et sa livraison (pour les pièces neuves), ou la remanufacturation d'une pièce sélectionnée du stock $S2$ (lorsqu'il s'agit de pièces réutilisables).

Le délai de livraison $t^{livraison}$ d'une commande pour alimenter le stock $S1$, dépend de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine. Ainsi, ce délai de livraison dépend du (i) choix de commander une nouvelle pièce de rechange ou (ii) de remanufacturer une pièce du stock $S2$ et (iii) et niveau de remanufacturation à réaliser. Soit t^c le délai de livraison d'une nouvelle pièce de rechange, et t^{re}_{ij} le temps de remanufacturation d'une pièce de qualité j, avec un niveau qui permet d'avoir une pièce de rechange de qualité i.

Afin de vérifier l'état des commandes, nous définissons la variable φ_k, afin de caractériser la durée du temps entre l'instant de passage de la commande k et l'instant présent t. Les possibles états d'une commande k sont :

- ϕ_0 : φ_k =0 : Aucune commande n'est passée;
- ϕ_1 : $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : Une commande est passée depuis φ_c unités de temps;
- ϕ_2 : $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$) : La pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock S1;
- ϕ_3 : $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : La pièce de rechange est dans le stock S1 depuis $\varphi_k - t^c$ ($\varphi_k - t^{re}_{ij}$) unités de temps.

En conséquence, les décisions concernant les commandes (pièces de rechange neuves ou remanufacturées), les remplacements préventifs et correctifs, sont liés à trois facteurs : les dates d'inspection ; le niveau de dégradation et l'état de la commande (les variables φ_c). Ainsi, les décisions possibles sont résumées comme suit :

1. Si $t = T_i$ (T_i : la i^{eme} date d'inspection)

   - Si $0 \leq d(t) < d_s$, le système est stable : aucune commande n'est passée et aucun remplacement n'est programmé.

   - Si $d_s \leq d(t) < d_r$

     - Si φ_k =0 (aucune commande n'est passée) : nous passons une commande pour une pièce rechange.
     - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.
     - Si $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$) : la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et la décision de remplacement sera prise selon le niveau de dégradation observé lors de la prochaine date d'inspection.
     - Si $\varphi_k \in]t^c, +\infty[$ ($\varphi_k \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans $S1$ depuis $\varphi_k - t^c$ ($\varphi_k - t^{re}_{ij}$) unités de temps, et la décision de remplacement sera prise selon le niveau de dégradation observé lors de la prochaine date d'inspection.

   - Si $d_r \leq$ d (t) $< d_{max}$

     - Si φ_k=0 (aucune commande n'est passée) : nous passons une commande pour une pièce rechange.
     - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.
     - Si $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$): la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et un remplacement préventif est réalisé.

- Si $\varphi_k \in]\, t^c, +\infty[$ ($\varphi_k \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans $S1$ depuis φ_k-t^c (φ_k-t^{re}_{ij}) unités de temps et un remplacement préventif est réalisé.

- Si $d(t) \geq d_{max}$
  - Si φ_k=0 (aucune commande n'est passée) : nous passons une commande pour une pièce rechange.
  - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.
  - Si $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$): la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et un remplacement correctif est réalisé.
  - Si $\varphi_k \in]\, t^c, +\infty[$ ($\varphi_k \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans S1 depuis φ_k-t^c (φ_k-t^{re}_{ij}) unités de temps et un remplacement correctif est réalisé.

2. Si $t \neq T_i$ (T_i : la i^{eme} date d'inspection)

- Si $0 \leq d(t) < d_s$, le système est stable : aucune commande est passée et aucun remplacement est programmé.

- Si $d_s \leq d(t) < d_r$
  - Si φ_k=0 (aucune commande n'est passée) : nous attendons la prochaine date d'inspection pour passer la commande.
  - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.
  - Si $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$) : la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et la décision de remplacement sera prise selon le niveau de dégradation observé lors de la prochaine date d'inspection.
  - Si $\varphi_k \in]\, t^c, +\infty[$ ($\varphi_c \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans $S1$ depuis φ_k-t^c (φ_k-t^{re}_{ij}) unités de temps et la décision de remplacement sera prise selon le niveau de dégradation observé lors de la prochaine date d'inspection.

- Si $d_r \leq$ d (t) $< d_{max}$
  - Si φ_k=0 (aucune commande n'est passée) : nous attendons la prochaine date d'inspection pour passer la commande.
  - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.
  - Si $\varphi_k = t^c$ ($\varphi_k = t^{re}_{ij}$): la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et un remplacement préventif sera réalisé à la prochaine date d'inspection.
  - Si $\varphi_k \in]\, t^c, +\infty[$ ($\varphi_k \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans $S1$ depuis φ_k-t^c (φ_k-t^{re}_{ij}) unités de temps et un remplacement préventif sera réalisé à la prochaine date d'inspection.

- Si $d(t) \geq d_{max}$
  - Si φ_k=0 (aucune commande n'est passée) : nous attendons la prochaine date d'inspection pour passer la commande.
  - Si $\varphi_k \in [1, t^c[$ ($\varphi_k \in [1, t^{re}_{ij}[$) : une commande est passée depuis φ_k unités de temps.

- Si $\varphi_k=t^c$ ($\varphi_k=t^{re}_{ij}$): la pièce de rechange commandée vient juste d'arriver dans le stock $S1$, et un remplacement correctif sera réalisé à la prochaine date d'inspection.
- Si $\varphi_k \in]\, t^c, +\infty[$ ($\varphi_k \in]t^{re}_{ij}, +\infty[$) : la pièce de rechange commandée est dans $S1$ depuis $\varphi_k - t^c$ ($\varphi_k - t^{re}_{ij}$) unités de temps, un remplacement correctif sera réalisé à la prochaine date d'inspection.

Vu la difficulté de modéliser l'état de la machine, nous avons eu recours à une simulation basée sur les événements discrets. La figure 1:15 illustre l'état de la machine par un graphe état/transition, où les états sont représentés par un couple (∇_i , ϕ_j) : la qualité de la pièce installée et l'état de la commande de la pièce de rechange, les transitions (e_μ) sont les événements qui peuvent survenir, à savoir, une dégradation, inspection, arrivée de la pièce de rechange commandée ou un remplacement.

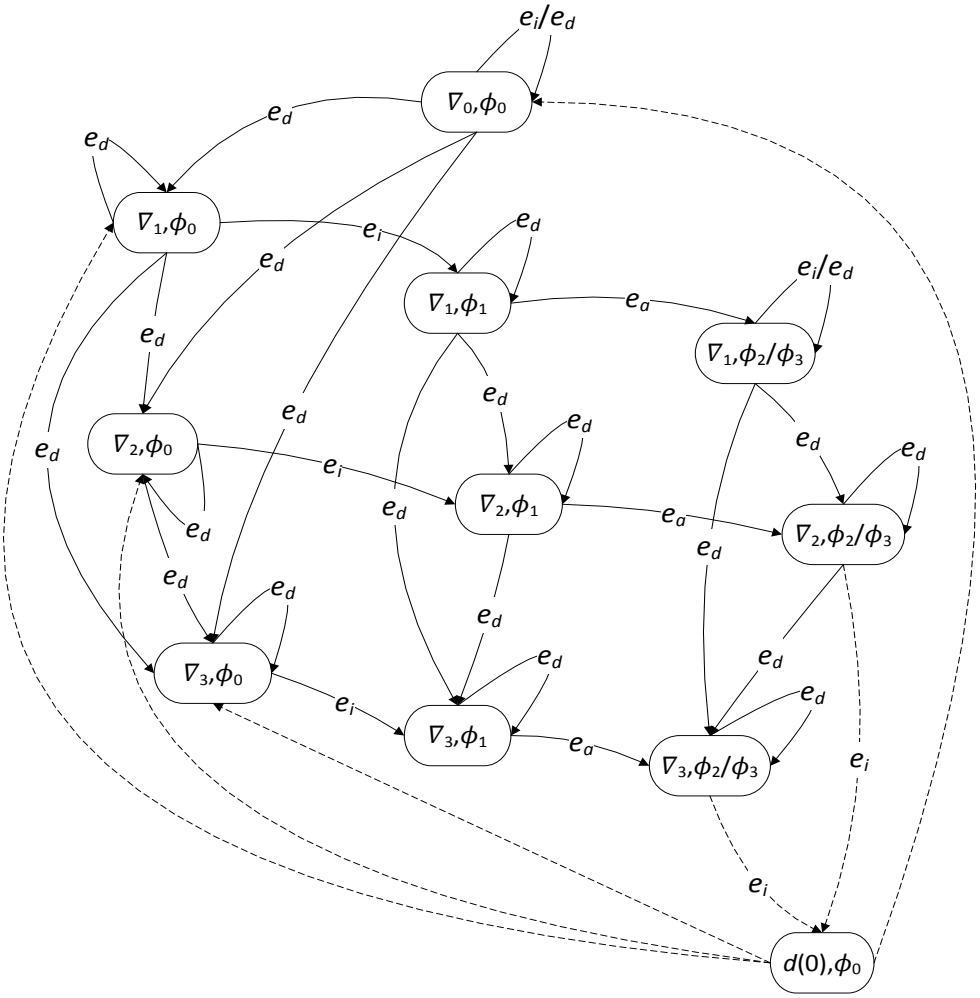


Figure 1:15 Graphe état/transition simulant l'état de la machine

Les hypothèses générales concernant l'ensemble des systèmes étudiés tout au long de cette thèse sont données comme suit :

1. La machine se dégrade avec l'usage.

2. La production ne vise pas à satisfaire une demande.

3. Les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont supposées disponibles, sans aucune contrainte.

4. Le coût de stockage des pièces récupérées est négligeable.

5. L'atelier de remanufacturation dispose des moyens et ressources nécessaires pour réaliser les différents niveaux de remanufacturation.

6. L'inspections est parfaite et révèle exactement le niveau de dégradation.

7. Le remplacement est parfait et remet l'état de dégradation de la machine exactement au niveau de dégradation de la pièce de rechange utilisée (installée).

8. Les durées des actions d'inspection et de remplacement sont négligeables, cela signifie que la durée qui sépare deux instants de remplacement successifs, représente la durée totale que la pièce de rechange passera dans la machine. Nous appelons cette durée un cycle.

Les coûts généraux impliqués dans la maintenance des systèmes étudiés sont :

C^i: Coût unitaire d'inspection.

CU^s: Coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans le stock S1.

$CU^{Arrêt}$: Coût unitaire (par unité de temps) dû à l'arrêt de la machine.

C^{pr}: Coût d'un remplacement préventif.

C^{cr}: Coût d'un remplacement correctif.

C^c: Coût de commande d'une pièce de rechange neuve.

1.7 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique définissant les concepts de base de nos travaux. Cela nous a permis de définir les contours de notre problématique. Par la suite, nous avons présenté les grandes lignes décrivant les problématiques étudiées et présentées tout au long de ce manuscrit, en posant les hypothèses communes entre ces différentes études.

Partie 1 Système de production à une seule machine

Chapitre 2 Optimisation de la politique maintenance conditionnelle

2.1 Introduction

La maintenance d'un système de production nécessite un ensemble de ressources qui peuvent être différentes selon la politique de maintenance adoptée et le système concerné. Dans le cas d'un système de production dont la défaillance est due à une dégradation aléatoire, des ressources supplémentaires sont indispensables pour déterminer le niveau de dégradation. Dans ce cas, nous pouvons deviser les ressources utilisées en deux catégories : des ressources pour la surveillance et des ressources pour l'inspection (cf. section 1.1.3). Dans ce contexte, la maintenance conditionnelle consiste à réaliser des actions de maintenance en fonction du niveau de dégradation observé.

Dans la littérature, la politique de maintenance conditionnelle a été largement adoptée pour les systèmes sujets à une dégradation aléatoire. Nous trouvons principalement les travaux de Grall et al. [13], Fouladirad et al. [15][14], Castanier et al. [23][19] ainsi que les travaux de Wang et al. [2][21]. Dans ces derniers, les auteurs intègrent la gestion des pièces de rechange dans une politique de maintenance conditionnelle.
Dans cette perspective nous abordons dans ce chapitre la problématique d'optimisation de la politique de maintenance conditionnelle appliquée pour un système de production à une seule machine. La complexité du système impose une intervention directe sur la machine par des inspections afin de déterminer le niveau de dégradation. Par conséquence, le but est de déterminer le plan d'inspection et les seuils décisionnels qui permettent de gérer les actions de maintenance. La maintenance du système est réalisée sous la forme d'un remplacement en utilisant des pièces de rechange neuves ou remanufacturées.

Le reste du chapitre est organisé comme suit :

La première partie (section 2.2), consiste à proposer une approche périodique pour déterminer le plan d'inspection. Dans la section 2.2.1, nous présentons les hypothèses liées au système étudié. Par la suite, nous présentons à la section 2.2.3, une formulation mathématique du problème via la fonction coût en se basant sur l'arbre de probabilité. La section 2.2.3 est dédiée à la présentation de l'approche proposée. Enfin, des résultats illustratifs sont présentés dans la section 2.2.4.

La deuxième partie (section 2.3), est consacrée à la présentation d'une autre approche pour le calcul des dates d'inspection d'une manière séquentielle. Dans la section 2.3.1, nous décrivons les hypothèses liées au système étudié. La section 2.3.2 décrit le modèle mathématique proposé pour formuler la problématique, l'arbre de probabilité et la fonction coût. L'approche proposée est présentée dans la section 2.3.3. Enfin, nous présentons la section 2.3.4 des résultats comparatifs entre l'approche proposée dans la section 2.2.3 et celle présentée dans la section 2.3.3.

2.2 Optimisation de la politique de maintenance conditionnelle avec un plan d'inspection périodique

2.2.1 Description du problème

Dans cette partie, nous considérons un système de production à une seule machine et nous abordons la problématique d'optimisation de la politique de maintenance (figure 2:1).

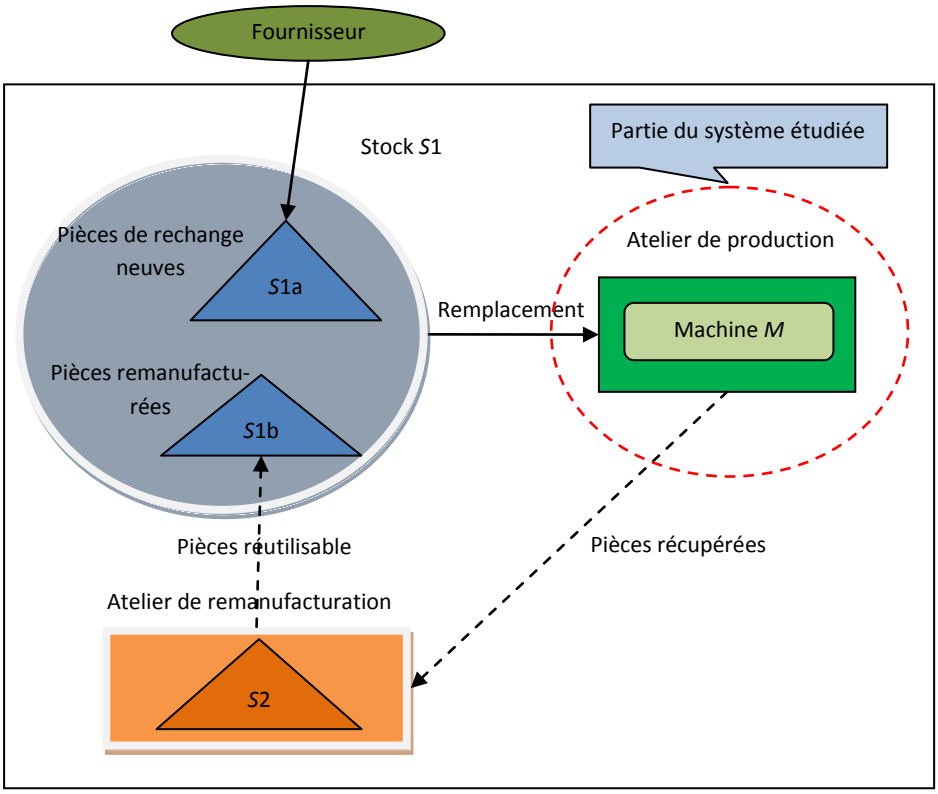


Figure 2:1 Système étudié

Rappelons que la machine est sujette à des défaillances dues à une dégradation graduelle continue. La maintenance conditionnelle est basée sur deux seuils décisionnels (d_s et d_r) et un seuil fixé (d_{max}). Un plan d'inspection est établi pour déterminer le niveau de dégradation de la machine. Ainsi, notre objectif est d'optimiser les seuils décisionnels (d_s et d_r) et le plan d'inspection, en minimisant le coût total engendré par les différentes actions liées à la maintenance sur un horizon fini T_{miss}. Notons que l'acquisition des pièces de rechange, c'est-à-dire le choix de commander une pièce neuve ou de remanufacturer une pièce du stock S2, ne représente qu'une donnée d'entrée pour le problème étudié.

Les hypothèses de cette partie sont donc résumées comme suit :

1. La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante. Elle a pour incrément $a_i=2.\xi$, $i=1\ldots n-1$. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivant :

$$d(t)=d(t-1)+(2.\xi) \qquad (2:1)$$

Où ξ est une variable aléatoire suivant une loi uniforme, $\xi\in]0,1]$.

Par conséquence, l'hypothèse que l'incrément de dégradation dépend de la qualité de la pièce de rechange, n'est pas prise en compte dans cette partie.

2. Les décisions relatives aux commandes des pièces de rechange (commander une pièce de rechange neuve ou remanufacturer une pièce du stock $S2$) sont prises comme étant des données d'entrée pour le problème.

3. La remanufacturation dépend seulement de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine.

4. L'inspection est réalisée selon un plan périodique, avec l'annulation des actions d'inspection comprises entre la date de passage de la commande et l'arrivée de la pièce en stock (figure 2:2).

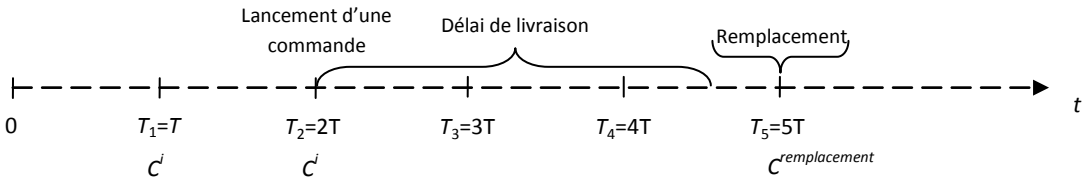


Figure 2:2 Politique périodique d'inspection adoptée

2.2.2 Modèle mathématique

Rappelons que l'objectif dans cette partie est d'optimiser le plan de maintenance, afin de minimiser le coût total engendré par les différentes actions impliquées. D'un point de vu mathématique, les variables à déterminer sont les seuils d_s et d_r, et la période d'inspection T.

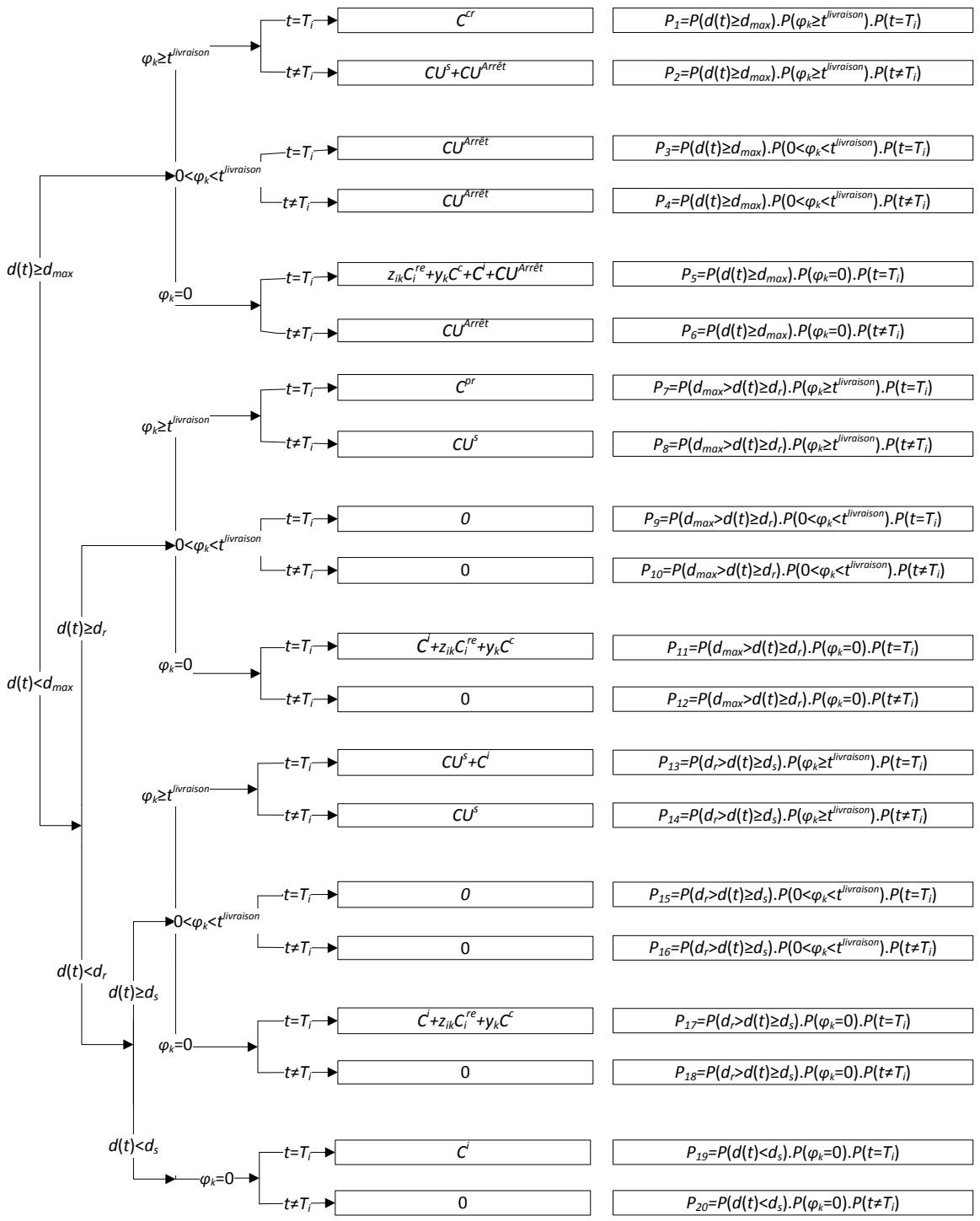


Figure 2:3 Arbre de probabilité associé.

Tels que :

C_i^{re}: Coût de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & si\ une\ pièce\ remanufacturée\ de\ qualité\ i\ est\ placée \\ & \quad dans\ la\ machine\ au\ début\ du\ cycle\ k \\ 0 & sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 & si\ une\ pièce\ neuve\ est\ commandée\ durant\ le\ cycle\ k-1 \\ & \quad pour\ être\ instalée\ dans\ \ la\ machine\ au\ début\ du\ cycle\ k \\ 0 & sinon \end{cases}$$

$i \in \{1,2,\dots,n-1\}, l \in \{1,2,\dots,n-1\}, k \in \{1,2,\dots,CN\}$

L'aspect aléatoire qui caractérise le processus de dégradation implique que l'occurrence de chaque événement est associée à une probabilité. Les probabilités que l'événement survienne à l'instant t et les coûts engendrés sont déterminés en utilisant l'arbre de probabilité (cf. Figure 2:3). Dans cet arbre, la probabilité que la série d'événements d'une branche surviennent est égale au produit de tous les nœuds (probabilités) de cette branche. Ainsi, la fonction de coût associée à l'instant t, s'écrit comme suit :

$$CT_t = \begin{pmatrix} P_1(C^{cr}) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) + P_3\left(CU^{Arrêt}\right) \\ +P_4\left(CU^{Arrêt}\right) + P_5\left(y_k C^c + z_{ik} C_i^{re} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7(C^{pr}) + P_8(CU^s) \\ +P_{11}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{13}\left(CU^s + C^i\right) \\ +P_{14}(CU^s) + P_{17}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{19}\left(C^i\right) \end{pmatrix}$$

Ainsi,

$$CT_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_5 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (y_k C^c + z_{ik} C_i^{re})(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

La fonction coût associée au cycle k est :

$$CT_k = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k} CT_t$$

La fonction objectif est exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{Min\ f = \sum_{k=1}^{CN} CT_k} \qquad \textbf{(2:2)}$$

tels que :

CN : le nombre de cycles durant la mission T_{miss}.
D_{ik}: la durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité i durant le cycle k, jusqu'à son remplacement.

2.2.3 Approche proposée

Afin d'optimiser le plan de maintenance, nous avons adopté un algorithme génétique basé sur la simulation. La partie simulation permet d'évaluer les chromosomes en calculant le coût généré par les différentes actions. Le choix de cette méthode est justifié par la complexité du problème et par la difficulté de résoudre un tel problème sans poser des hypothèses telle que l'indépendance des incréments de dégradation.

Le codage utilisé est en nombres réels, où chaque chromosome est représenté par deux génomes désignant les seuils décisionnels d_s et d_r (cf. Figure 2:4). Le premier génome donne le ratio entre d_r et d_{max} (exemple : $d_r = 0{,}7 \times d_{max}$). Le deuxième génome donne le ratio entre d_s et d_r (exemple : $d_s = 0{,}6 \times d_r$).

Ce type de codage est très avantageux, il permet d'obtenir toujours des chromosomes appartenant à l'espace des solutions réalisables, ce qui évite la correction des chromosomes résultants des différentes opérations de l'algorithme génétique.

d_r	d_s
0.7	0.6

Figure 2:4 Structure d'un chromosome.

L'étape "reproduction" est basée sur les opérateurs génétiques qui servent à maintenir la diversité génétique. Chaque nouvelle population est générée avec les opérateurs génétiques classiques: un point de coupure pour le croisement, une sélection des meilleurs chromosomes générés avec une probabilité de 80%, et une mutation aléatoire avec une probabilité de 20%.

En ce qui concerne la périodicité d'inspection, nous avons choisi une méthode énumérative, en parcourant toutes les longueurs possibles de la période d'inspection. Le nombre de valeurs possibles des périodes d'inspection sont égales au seuil de panne d_{max}.

2.2.4 Expériences numériques et analyse

Dans cette section, nous présentons deux exemples illustratifs de l'approche proposée.
Nous avons choisi deux séries de pièces de rechange de même qualité, sur lesquelles nous appliquons notre approche. La première série est constituée de pièces de qualité 0 (pièces neuves), et la deuxième série est constituée de pièce de qualité 3, sur lesquelles nous appliquons le plus bas niveau de remanufacturation, à savoir une réutilisation directe.

Les données utilisées sont résumées comme suit :

Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange, dont une qualité neuve, une qualité destinée à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. La durée de la mission T_{miss}=150 *ut*, le seuil de panne d_{max}=10. Les niveaux de dégradation initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5, le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=3 *ut* avec un coût de C^c=320 *um* et le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 3 est t^{re}_3=0 avec un coût de C^{re}_3=0. Le coût unitaire d'inspection C^i=8 *um*, le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*, le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=100 *um*, le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans *S*1 est CU^s=3 *um/pièce/ut*, le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=25 *um/ut*.

Dans le premier cas, les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont neuves. Par conséquent, les pièces de rechange utilisées ne sont pas récupérées (n'arrivent pas du stock *S*2) et aucune action de remanufacturation n'est réalisée. Dans ce cas, la période d'inspection optimale est T^*=4 *ut* (figure 2:5)

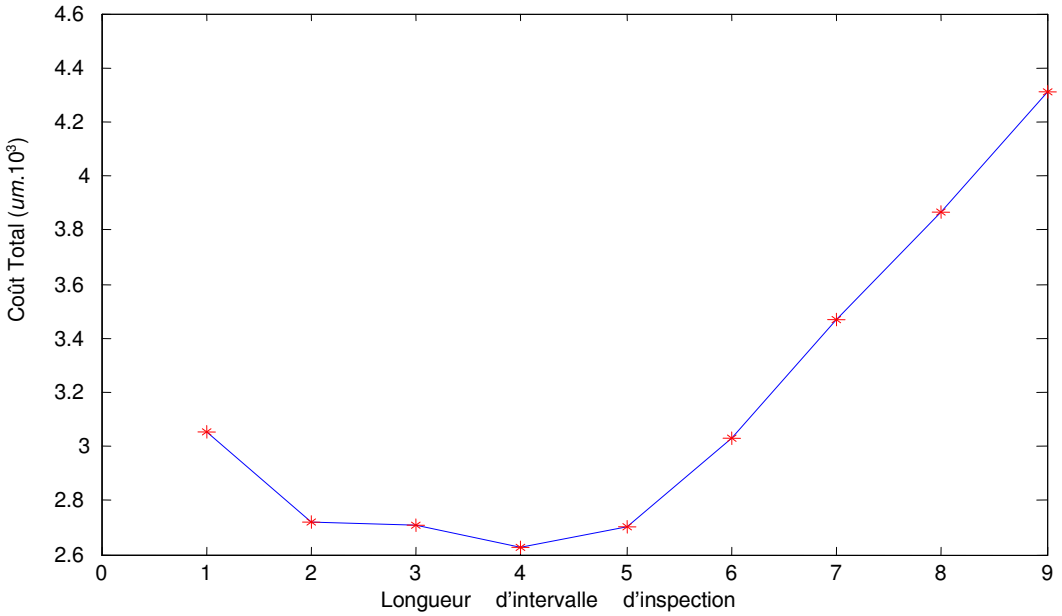


Figure 2:5 Variation du coût total par rapport à la longueur d'intervalle d'inspection (Cas 1).

Le tableau 2:1 détaille le nombre de remplacements et les seuils décisionnels d_r et d_s obtenus, avec le *CT* coût total, pour le cas des pièces de rechange neuves.

CT ($um.10^3$)	3.05	2.71	2.71	2.62	2.70	3.02	3.47	3.86	4.31
Nombre de remplacements	18	16	17	16	16	13	11	10	9
d_r ratio (%)	0.7	0.7	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6
d_s ratio (%)	0.7	0.7	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6

Tableau 2:1 Nombre de remplacements et seuils décisionnels d_r et d_s (Cas 1)

Dans le deuxième cas, les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont des pièces récupérées de la machine. Les pièces sont de qualité 3 et elles sont réutilisées d'une manière directe sans action de remanufacturation.

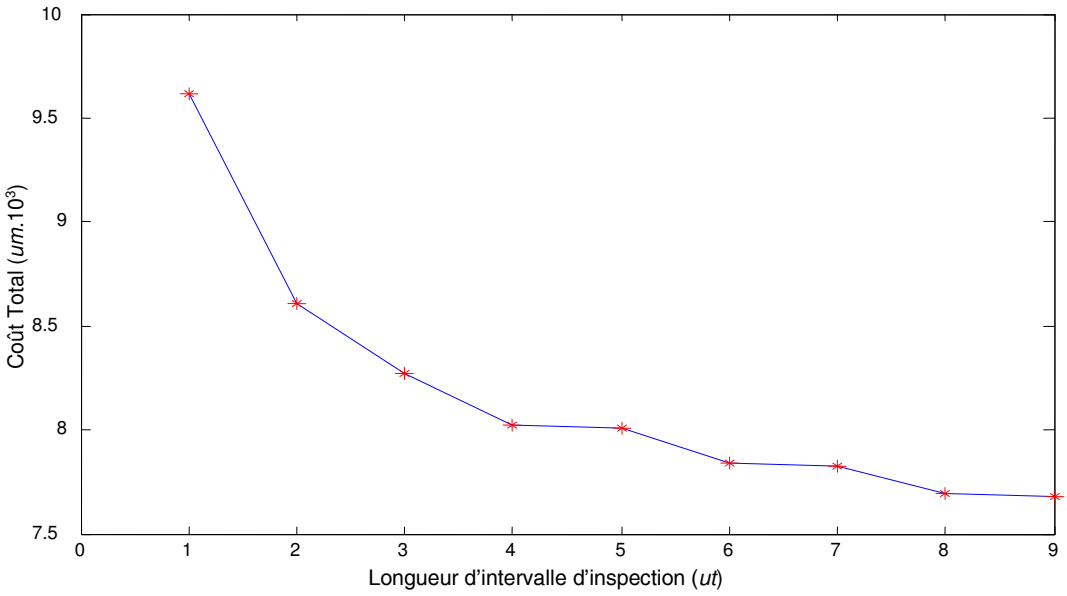


Figure 2:6 Variation du coût total par rapport à la longueur d'intervalle d'inspection (Cas 2).

La figure 2:6 illustre la variation du coût total par rapport à la longueur d'intervalle d'inspection. Dans ce cas, le coût total *CT* diminue avec la longueur d'intervalle d'inspection. Ceci peut s'expliquer par le nombre important de remplacements qui sont réalisés quand la période d'inspection est petite. Cependant, la minimisation du coût pourra affecter la disponibilité de la machine dans le cas d'une demande à satisfaire.

CT ($um.10^3$)	9.61	8.61	8.27	8.02	8.01	7.84	7.82	7.69	7.68
Nombre de remplacements	51	38	26	19	16	13	11	10	9
d_r ratio (%)	1	0.7	0.3	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7
d_s ratio (%)	1	0.4	0.3	0.6	0.7	0.8	0.4	0.7	0.7

Tableau 2:2 Nombre de remplacements et seuils décisionnels d_r et d_s (Cas 2)

Le tableau 2:2 détaille le nombre de remplacements et les seuils décisionnels d_r et d_s obtenus, avec le *CT* coût total, pour le cas des pièces de rechange de qualité 3.

2.3 Optimisation de la politique de maintenance conditionnelle avec un plan d'inspection séquentiel

2.3.1 Description du problème

Dans cette section, nous considérons un système de production à une seule machine. Nous abordons la même problématique que celle de la section précédente, à savoir d'optimisation de la politique de maintenance conditionnelle de la machine (figure 2:7).

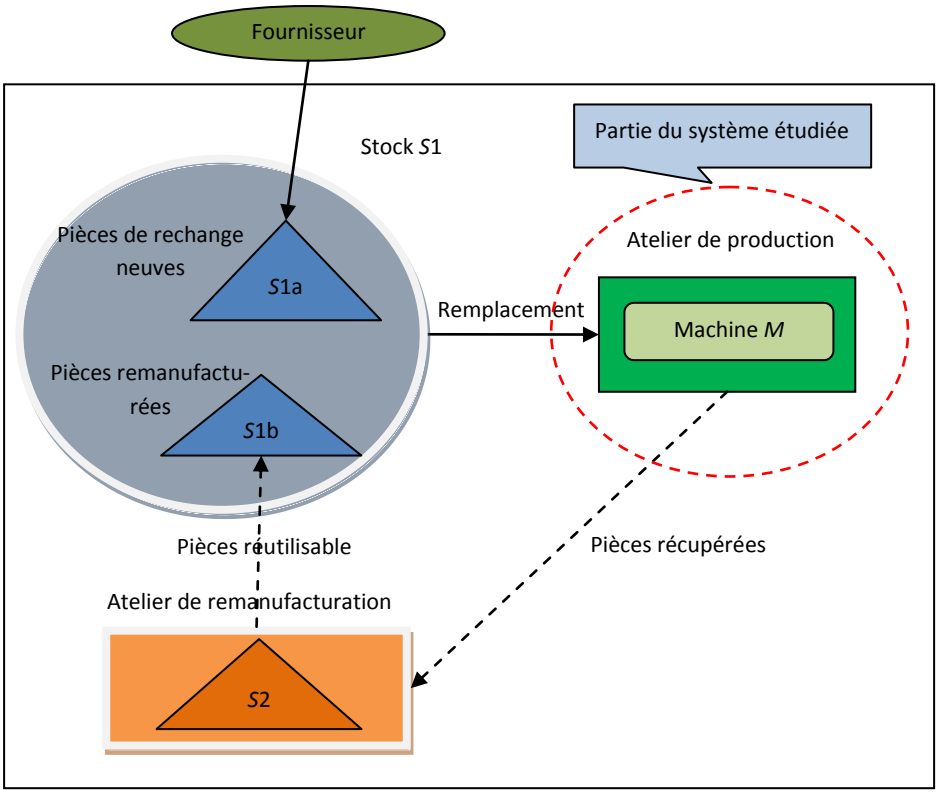


Figure 2:7 Système étudié

Rappelons que la machine est sujette à des défaillances dues à une dégradation graduelle continue. La maintenance conditionnelle est basée sur deux seuils décisionnels (d_s et d_r) et un seuil fixé (d_{max}). Un plan d'inspection est établi pour déterminer le niveau de dégradation. Ainsi, l'objectif principal est d'optimiser les seuils décisionnels (d_s et d_r) et le plan d'inspection en minimisant le coût total engendré par les différentes actions liées à la maintenance. L'objectif secondaire est d'améliorer les résultats obtenus par l'approche proposée précédemment. Comme pour la section précédente, l'acquisition des pièces de rechange, c'est-à-dire le choix de commander une pièce neuve ou de remanufacturer une pièce du stock S2, ne représente qu'une donnée d'entrée pour le problème étudié.

Les hypothèses de base sont donc résumées comme suit :

1. La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante. Elle a pour incrément a_i qui dépend de la qualité de pièce de rechange. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivant :

$$d(t)=d(t-1)+ a_i \qquad (2:3)$$

Où : a_i est une variable aléatoire uniforme qui dépend de la qualité i de la pièce de rechange installée ($i = 0...n$) ; $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

2. Les décisions relatives aux commandes des pièces de rechange (commander une pièce de rechange neuve ou remanufacturer une pièce du stock $S2$) sont prises comme étant des données d'entrée pour le problème.

3. La remanufacturation dépend seulement de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine.

4. L'inspection est réalisée selon un plan séquentiel, où les dates d'inspection sont calculées par une nouvelle heuristique. Cette heuristique expliquée en détails dans la partie 2.3.3.

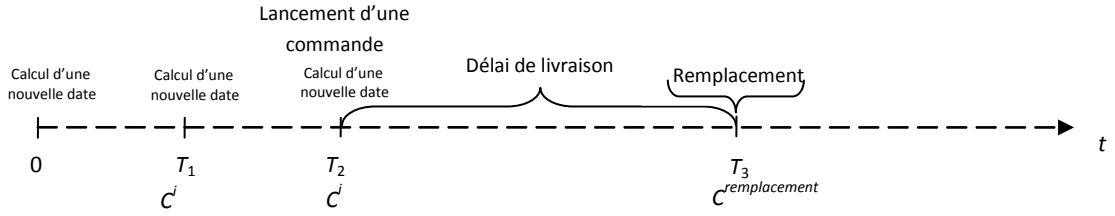


Figure 2:8 Politique séquentielle d'inspection adoptée

2.3.2 Modèle mathématique

Rappelons que l'objectif dans cette section est d'optimiser le plan de maintenance, afin de minimiser le coût total engendré par les différentes actions réalisées. D'un point de vu mathématique, les variables à déterminer sont les seuils d_s et d_r, et les dates d'inspection T_i.

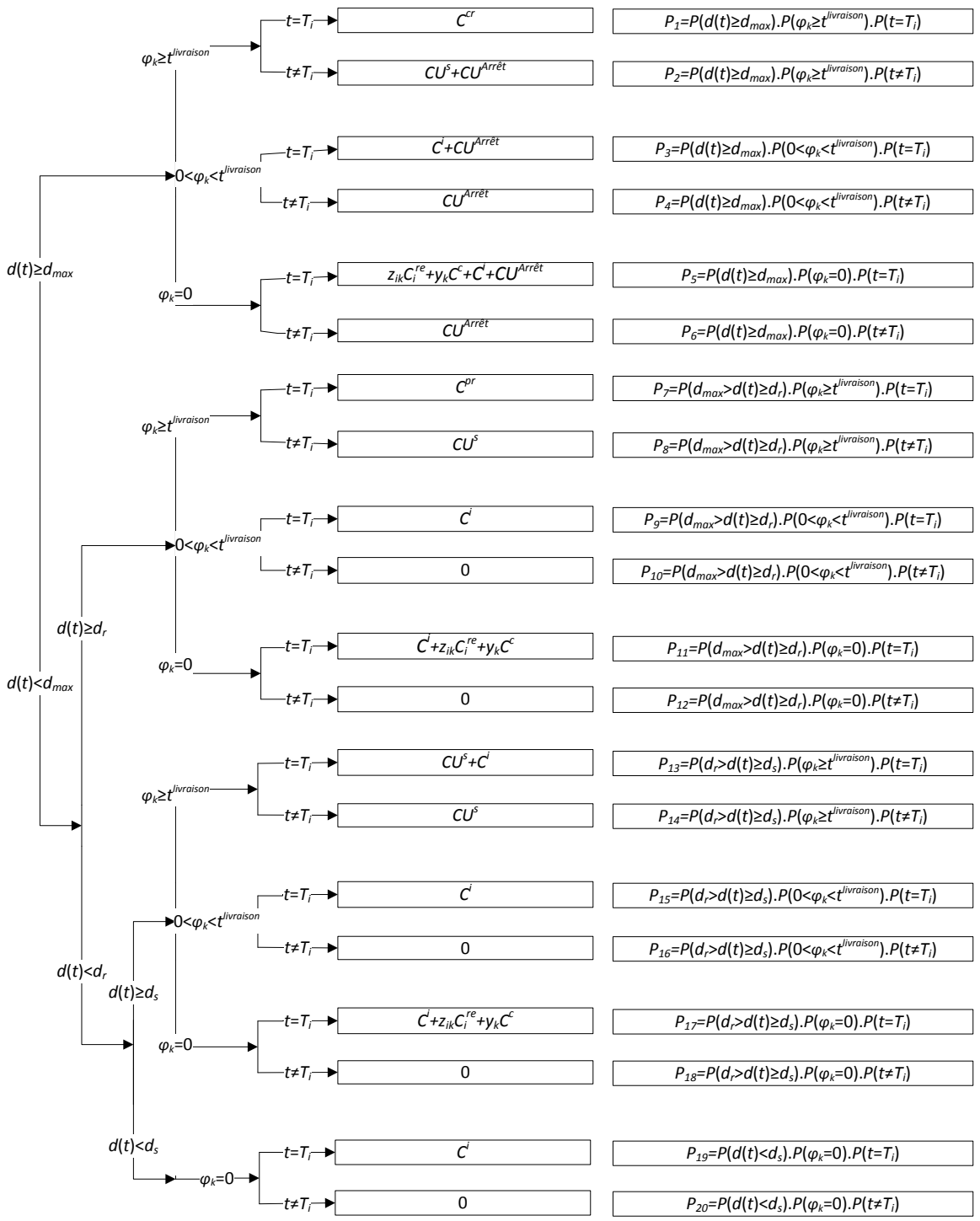


Figure 2:9 Arbre de probabilité associé.

avec :

C_i^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; remanufacturée \; de \; qualité \; i \; est \; placée \; dans \; la \; machine \\ \qquad au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; neuve \; est \; commandée \; durant \; le \; cycle \; k-1 \; pour \; etre \; palcée \; dans \\ \qquad la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$i \in \{1,2,\dots,n-1\}, l \in \{1,2,\dots,n-1\}, k \in \{1,2,\dots,CN\}$

L'aspect aléatoire qui caractérise le processus de dégradation implique que l'occurrence de chaque événement est associée à une probabilité. Les probabilités que l'événement survient à l'instant t et les coûts engendrés sont déterminés en utilisant l'arbre de probabilité (cf. Figure 3:3). Dans cet arbre, la probabilité que la série d'événements d'une branche surviennent est égale au produit de tous les nœuds (probabilités) de cette branche. Ainsi, la fonction de coût associée à l'instant t, s'écrit comme suit :

$$CT_t = \begin{pmatrix} P_1(C^{cr}) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) + P_3\left(C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_4\left(CU^{Arrêt}\right) + P_5\left(y_k C^c + z_{ik} C_i^{re} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7(C^{pr}) + P_8(CU^s) + P_9\left(C^i\right) \\ +P_{11}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{13}\left(CU^s + C^i\right) \\ +P_{14}(CU^s) + P_{15}\left(C^i\right) + P_{17}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{19}\left(C^i\right) \end{pmatrix}$$

$$CT_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_3 + P_5 + P_9 + P_{11} + P_{13} + P_{15} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (y_k C^c + z_{ik} C_i^{re})(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

La fonction coût associée au cycle k est :

$$CT_k = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif peut être exprimée par l'équation suivant :

$$\boldsymbol{Min\ f = \sum_{k=1}^{CN} CT_k} \qquad \textbf{(1:4)}$$

Avec :

CN: Nombre de cycles durant la mission T_{miss}.

D_{ik}: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité i durant le cycle k, jusqu'à son remplacement.

2.3.3 Approche proposée

Afin d'optimiser les seuils décisionnels, nous avons adopté la même approche proposé précédemment, qui s'agit d'un algorithme génétique basé sur la simulation.

En ce qui concerne l'inspection, nous avons proposé une heuristique (Heuristique_Inspection_1) pour le calcul des dates d'inspection d'une manière séquentielle. Le calcul de chaque date d'inspection est réalisé à partir de la date d'inspection qui la précède. L'heuristique est basée sur le comportement de dégradation, qui est bornée par deux « scénarios » de dégradation détermi-

niste (cf. Figure 2:10) : le meilleur scénario de dégradation MSD (cf. Equation 3:5) et le pire scénario de dégradation PSD (cf. Equation 3:6).

$$d^{min}(t)-d^{min}(t\text{-}1)= a^{min}_{i} \qquad (3:5)$$

$$d^{max}(t)-d^{max}(t\text{-}1)= a^{max}_{i} \qquad (3:6)$$

Avec $a^{min}_{i} \leq a_i \leq a^{max}_{i}$ et $0 < a^{max}_{i} \leq a^{min}_{i+1}$; $i = 0\ldots n$.

De ce fait, nous avons choisi une stratégie de prévention qui consiste à se baser sur le pire scénario de dégradation pour le calcul des dates d'inspection. L'organigramme de l'heuristique est présenté dans la figure 2:9 :

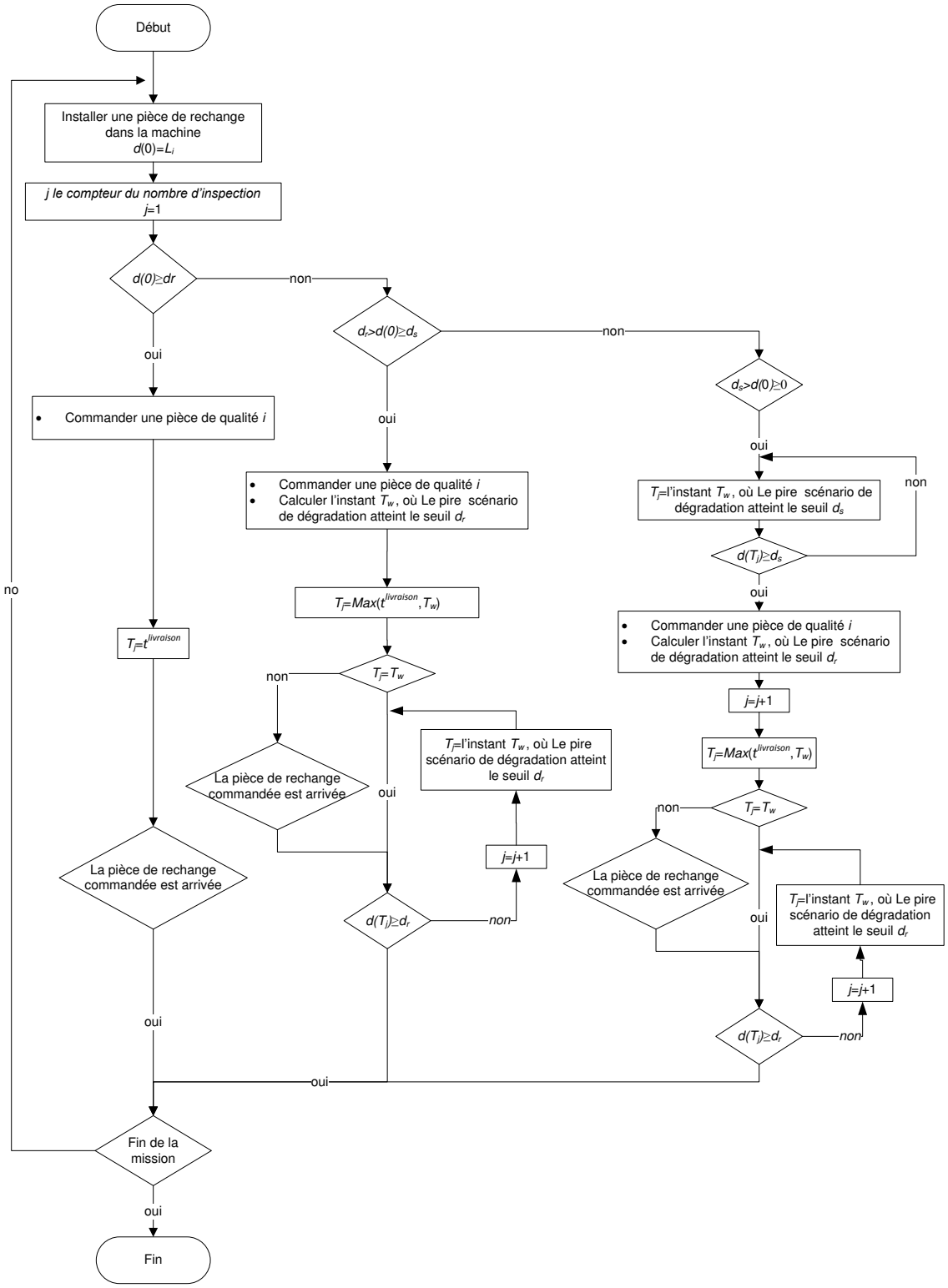


Figure 2:10 L'organigramme de l'heuristique de calcul des dates d'inspection.

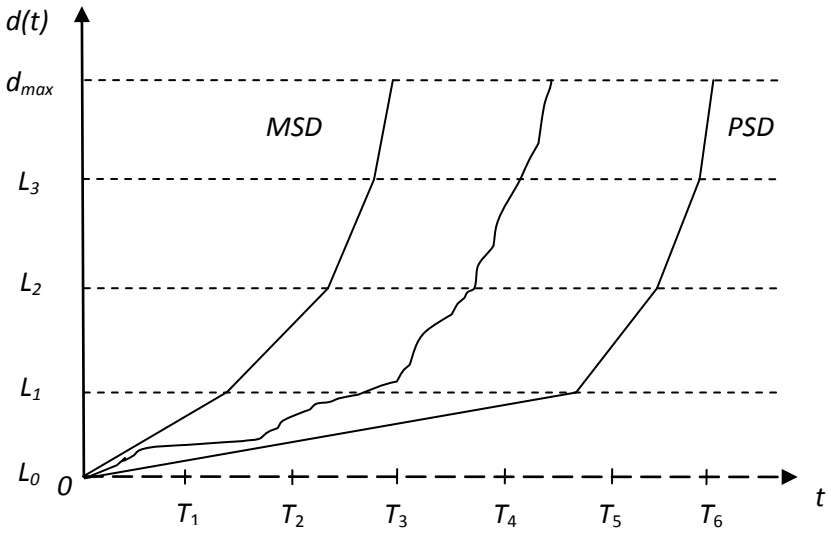


Figure 2:11 Le comportement de dégradation.

2.3.4 Expériences numériques et analyse

Dans cette partie, plusieurs résultats numériques sont présentés, illustrant l'application de l'heuristique sur différentes qualités de pièces de rechange. Nous déterminons les paramètres de maintenance optimaux en fonction de la qualité de la pièce de rechange installée dans la machine et de la qualité la pièce de rechange utilisée pour le remplacement. Ainsi, nous considérons tous les cas de succession de qualité possibles (qualité 0 suivie par la qualité 0, 0 qualité suivie par la qualité 1, ..., qualité n-1 suivie par la qualité n-1). Soit (x, y) le couple de qualité, telle que la pièce de rechange de qualité x est suivie par une pièce de rechange de qualité y.

Les résultats obtenus par l'heuristique proposée sont comparés aux résultats obtenus par la méthode périodique proposée dans la partie 2.1.

Les données utilisées sont résumées comme suit :
Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5), dont, une qualité neuve, une qualité destinée à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées; Les variables a_i sont bornées par les valeurs suivante : a^{min}_0 =0.5, a^{max}_0 =a^{min}_1=1, a^{max}_1 =a^{min}_2=1.5, a^{max}_2 =a^{min}_3=2, a^{max}_3 =2.5 ; Le seuil de panne d_{max}=15 ; les niveaux dégradations initiaux des pièce remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5 ; le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=3 *ut* avec un coût de C^c=320 *um* ; le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 1 est t^{re}_1=7 *ut* avec un coût de C^{re}_1=60 *um* ; le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 2 est t^{re}_2=3 *ut* avec un coût de C^{re}_2=30 *um* ; le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 3 est t^{re}_3=0 *ut* avec un coût de C^{re}_3=0 *um* ; le coût unitaire d'inspection C^i=40 *um* ; le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um* ; le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=500 *um* ; le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S1$ est CU^s=3 *um/pièce/ut* ; le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*.

Cas (0,0)										*CT*
Heuristique proposée	d_r					d_s				1060
	4.5					1.35				
	T_j	0		2		14				
	$d(T_j)$	0		1.5		15.68				
Inspection périodique	d_r				d_s					1146
	4.5				1.35					
	Tj	0	2	4	6	8	10	12	14	16
	$d(T_j)$	0	1.52	3.01	5.47	8.9	13.45	15.7	15.7	15.7

Cas (0,1)								*CT*
Heuristique proposée	d_r			d_s				390
	4.5			1.35				
	T_j	0		2		9		
	$d(T_j)$	0		1.49		11.19		
Inspection périodique	d_r			d_s				433
	4.5			1.35				
	T_j	0	2	4	6	8	10	
	$d(T_j)$	0	1.5	3.01	5.53	9.01	13.5	

Cas (0,2)					*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s		400
	7.35		3.52		
	T_j	0	4	5	8
	$d(T_j)$	0	3.03	4.31	9.09
Inspection périodique	d_r		d_s		403
	4.5		1.84		
	T_j	0	4	8	
	$d(T_j)$	0	3.01	9.03	

Cas (0,3)					*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s		370
	12.6		10.45		
	T_j	0	7	9	10
	$d(T_j)$	0	7.23	11.24	13.48
Inspection périodique	d_r		d_s		376
	4.8		1.72		
	T_j	0	3	6	
	$d(T_j)$	0	2.23	5.51	

Tableau 2:3 Le cas des couples (0,*y*)

Cas (1,0)															*CT*
Heuristique proposée	d_r						d_s								900
	5.55						1.77								
	T_j	0					12								
	$d(T_j)$	2.5					17.04								
Inspection périodique	d_r						d_s								963
	5.25						1.83								
	T_j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$d(T_j)$	2.5	3.5	4.8	6	7.7	10	12.5	14.9	17	17	17	17	17	17

Cas (1,1)							*CT*
Heuristique proposée	d_r			d_s			210
	4.8			1.53			
	T_j	0		7			
	$d(T_j)$	2.5		14.77			
Inspection périodique	d_r			d_s			723
	4.95			1.53			
	T_j	0	2	4	6	8	
	$d(T_j)$	2.5	4.77	8	12.65	16.99	

Cas (1,2)					*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s		180
	4.95		1.53		
	T_j	0	3		
	$d(T_j)$	2.5	6.76		
Inspection périodique	d_r		d_s		229
	4.95		1.53		
	T_j	0	3	6	
	$d(T_j)$	2.5	5.83	12.26	

Cas (1,3)				*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s	150
	6		1.8	
	T_j	0	3	
	$d(T_j)$	2.5	6.77	
Inspection périodique	d_r		d_s	193
	4.5		1.35	
	T_j	0	2	
	$d(T_j)$	2.5	5.29	

Tableau 2:4 Le cas des couples (1,*y*)

Cas (2,0)															*CT*
Heuristique proposée	d_r							d_s							930
	5.1							2.04							
	T_j	0						12							
	$d(T_j)$	5						15.26							
Inspection périodique	d_r						d_s								973
	7.5						3.15								
	T_j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$d(T_j)$	5	6.53	8.26	10.56	12.8	14.95	17	17	17	17	17	17	17	17

Cas (2,1)					*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s		690
	6		1.8		
	T_j	0	7		
	$d(T_j)$	5	15.21		
Inspection périodique	d_r		d_s		733
	6.75		3.51		
	T_j	0	4	8	
	$d(T_j)$	5	12.97	17.28	

Cas (2,2)				*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s	150
	7.65		4.28	
	T_j	0	3	
	$d(T_j)$	5	10.77	
Inspection périodique	d_r		d_s	193
	4.65		1.44	
	T_j	0	4	
	$d(T_j)$	5	12.9	

Cas (2,3)				*CT*
Heuristique proposée	*dr*		*ds*	120
	7.05		2.6	
	T_j	0	2	
	$d(T_j)$	5	8.49	
Inspection périodique	*dr*		*ds*	120
	4.5		1.39	
	T_j	0	1	
	$d(T_j)$	5	5	

Tableau 2:5 Le cas des couples (2,*y*)

Cas (3,0)															*CT*
Heuristique proposée	d_r							d_s							920
	8.55							4.61							
	T_j	0						12							
	$d(T_j)$	7.5						16.49							
Inspection périodique	d_r							d_s							983
	6							3.42							
	T_j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$d(T_j)$	7.5	9.6	11.87	14	13	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Cas (3,1)				*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s	680
	6		3.24	
	T_j	0	7	
	$d(T_j)$	7.5	16.45	
Inspection périodique	d_r		d_s	743
	8.1		4.13	
	T_j	0	4	8
	$d(T_j)$	7.5	16.28	16.28

Cas (3,2)					*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s		120
	5.85		2.57		
	T_j	0	3		
	$d(T_j)$	7.5	14.28		
Inspection périodique	d_r		d_s		633
	5.25		1.57		
	T_j	0	2	4	
	$d(T_j)$	7.5	11.91	16.2	

Cas (3,3)				*CT*
Heuristique proposée	d_r		d_s	90
	9		3.06	
	T_j	0	1	
	$d(T_j)$	7.5	9.77	
Inspection périodique	d_r		d_s	90
	5.7		2.16	
	T_j	0	1	
	$d(T_j)$	7.5	7.5	

Tableau 2:6 Le cas des couples (3,*y*)

Les tableaux montrent que l'heuristique proposée fournit des résultats intéressants. L'écart entre le coût total donné par l'approche d'inspection périodique et celle donnée par l'heuristique proposée est toujours positif. Dans les cas (1,1) et (3,2) (cf. Tableau 2:6 et Tableau 2:4) le gain est égal à 80%, tandis que le gain est compris entre 0,5% et 23% pour les autres cas. Cependant, on voit que le coût total déterminé pour les cas (2,3) et (3,3) est le même pour les deux approches. Dans ce cas, la pièce de rechange est immédiatement remplacée après son installation dans le cas d'une inspection périodique. De ce fait, ces successions ((2,3) et (3,3)) ne sont pas utiles d'un point de vu temps exploitation dans le cas d'une inspection périodique.

Ces résultats montrent aussi que les seuils d_s et d_r changent selon la succession des pièces de rechange. Ceci permet d'ouvrir la possibilité d'utiliser le concept " des seuils adaptatifs " [15]. Ce concept repose sur le principe du changement des seuils selon les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sur un horizon de fonctionnement donné.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système de production avec une seule machine dont la détérioration est aléatoire monotone croissante. Nous avons proposé une politique de maintenance conditionnelle basée sur trois seuils décisionnels pour la gestion des remplacements préventif, correctif, et pour la gestion des pièces de rechange (considérée comme la partie principale de la machine). Le remplacement nécessite une pièce de rechange commandée. Les pièces de rechange sont classées en quatre qualités en fonction du niveau de dégradation observé. Nous avons proposé deux heuristiques pour calculer les dates d'inspection sur un horizon fini. La première heuristique détermine la périodicité d'inspection. Elle consiste à énumérer les différentes longueurs de période d'inspection possibles. La deuxième heuristique consiste à déterminer les dates d'inspection d'une manière séquentielle en se basant sur la borne supérieure de la dégradation. Les deux heuristiques sont intégrées dans un algorithme génétique basé sur la simulation afin d'optimiser la valeur des seuils de décision d_r et d_s. Des exemples numériques ont été présentés pour la faisabilité et les performances des heuristiques proposées. Cette performance est basée sur une comparaison entre l'heuristique proposée et une approche d'inspection périodique.

Une extension de ce travail est présentée dans le chapitre 7 permettant la détermination des dates d'inspection pour un système multi-machines.

Chapitre 3 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange

3.1 Introduction

La gestion des retours des flux induits par les différentes formes de réutilisation ou de récupération des produits dans les processus de production industrielle a reçu une attention croissante au cours des deux dernières décennies parmi les industriels ainsi que les scientifiques. Cet intérêt est justifié par différentes contraintes économiques, environnementales et sociales. La remanufacturation est l'une des formes de récupération et réutilisation les plus intéressantes et les plus complexes. Sa complexité est due à l'aspect aléatoire qui touche la gestion de retour, la difficulté de concevoir des produits aptes pour ce type d'opération et au processus de remanufacturation réalisé sur les produits après leur récupération.

Dans la littérature, la chaîne logistique inverse dans sa globalité et la remanufacturation plus particulièrement ont été largement étudiées. Srivastava [41] présente une revue de la littérature avec une classification intéressante des opérations de la chaîne logistique inverse (cf. Section 1.2.2). En ce qui concerne la remanufacturation, Wang et al. [74] et Van der Laan et Teunter [56] ont étudié un système hybride de fabrication/remanufacturation des produits, avec une demande et un retour stochastique. Dans [76], les auteurs considèrent le problème de la récupération des produits avec de multiples options de remanufacturation, ce qui donnent naissance à une gamme variée de produits destinés à des demandes stochastiques.

Dans la continuité des travaux qui visent à étudier la gestion des retours des produits et leur remanufacturation, nous abordons dans ce chapitre la problématique d'acquisition des pièces de rechange utilisées dans un système de production à une seule machine soumis à une politique de maintenance conditionnelle basée sur un plan d'inspection périodique. Il s'agit d'optimiser le flux des pièces de rechange sous ses deux formes (flux direct et flux inverse) destinées à être utilisées lors des remplacements ultérieurs. Les pièces de rechange récupérées sont classées en plusieurs qualités en fonction du niveau de dégradation et sont susceptibles d'être remanufacturées afin d'améliorer leur qualités.

Le reste du chapitre est organisé comme suit :

La première partie (section 3.2), consiste à proposer une approche pour l'optimisation des qualités de pièces de rechange utilisées lors des remplacements et cela sans la prise en compte de la gestion de stock des pièces à remanufacturer. Dans la section 3.2.1, nous présentons les hypothèses liées au système étudié. La section 3.2.2 est consacrée à la présentation du modèle mathématique du problème étudié dont la résolution est abordée par une approche basée sur un algorithme génétique décrite à la section 3.2.3. Nous terminons cette section avec une application numérique de l'approche proposée.

Dans la deuxième partie (section 3.3) nous améliorons l'approche proposée dans la section 3.2 pour l'intégration de la gestion de stock des pièces de rechange. La section 3.3.1 est dédiée à la description du système étudié. Pa la suite, nous décrivons le modèle mathématique du problème étudié. L'approche proposée est présentée dans la section 3.3.3. Enfin, nous présentons les résultats obtenus par l'application de l'approche proposée sur un exemple numérique.

3.2 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange, sans la prise en compte de la gestion de stock

3.2.1 Description du problème

Dans cette section, le système de production étudié se compose toujours d'une seule machine et nous abordons la deuxième partie de l'optimisation séquentielle. En effet, nous cherchons à optimiser la politique d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour les différents remplacements. Les pièces de rechange proviennent principalement de deux sources : le fournisseur externe et l'atelier de remanufacturation (Figure 3:1).

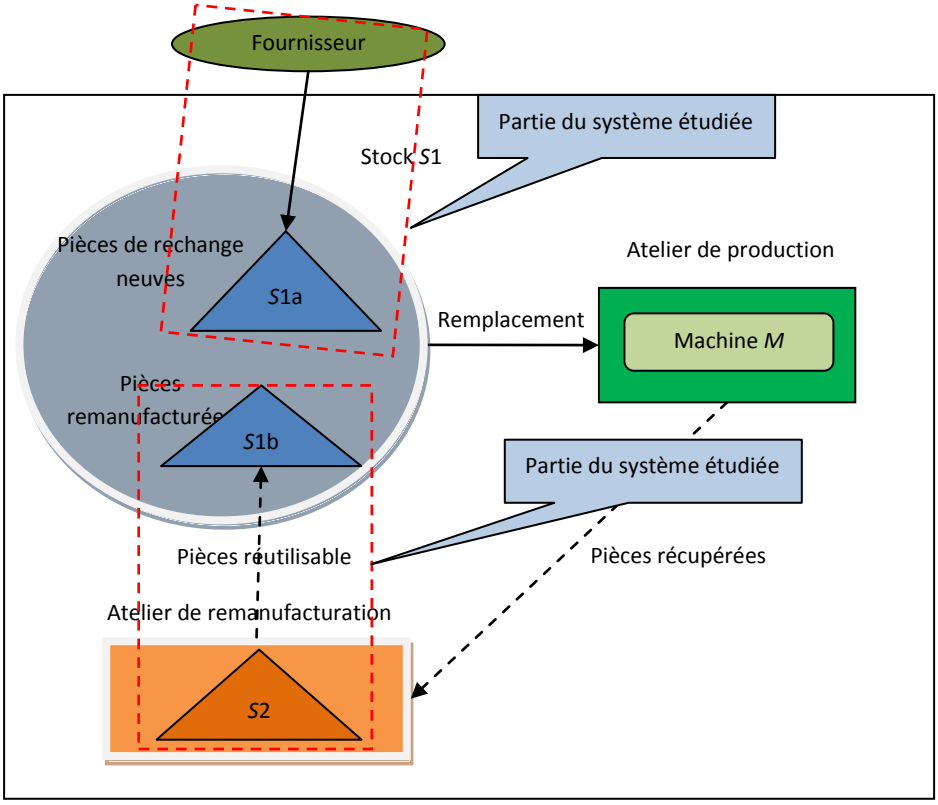


Figure 3:1 Système étudié

Rappelons que la machine est sujette à des défaillances dues à une dégradation graduelle continue. Une politique de maintenance conditionnelle est adoptée, dont les paramètres (les seuils (d_s et d_r) et le plan d'inspection) sont connus. L'objectif de cette partie est d'optimiser la séquence de qualité de pièces de rechange utilisées pour les différents remplacements à effectuer sur un horizon fini T_{miss}. A ce stade de notre étude, l'optimisation se limite aux qualités des pièces de rechange à placer dans la machine, et cela sans la prise en compte des qualités de départ pour le cas des pièces remanufacturées ni la disponibilité de ces pièces dans le stock S2.

Les hypothèses de base de cette section du manuscrit sont donc résumées comme suit :

1. La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante. Elle a pour incrément a_i qui dépend de la qualité de pièce de rechange. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d(t)=d(t-1)+a_i \qquad (3:1)$$

a_i est une variable aléatoire uniforme qui dépend de la qualité i de la pièce de rechange installée (i = 0…n) ; $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

2. Les décisions relatives à l'optimisation de la maintenance, à savoir les seuils de dégradation et le plan d'inspection sont prises comme des données d'entrée.

3. Les pièces de rechange destinées à remanufacturation sont disponibles à tout moment dans le stock $S2$, avec les qualités et le nombre souhaités.

4. La remanufacturation dépend seulement de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine.

5. L'inspection est réalisée selon un plan périodique, avec l'annulation des actions d'inspection comprises entre la date de lancement de la commande et l'arrivée de la pièce dans le stock.

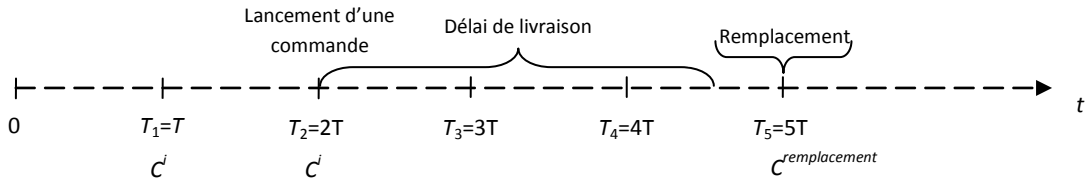


Figure 3:2 Politique périodique d'inspection adoptée

3.2.2 Modèle mathématique

L'objectif recherché, est d'optimiser le plan d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour le remplacement en se limitant qualités de pièce de rechange destinées pour les remplacements. Ce problème est étudié dans le contexte d'une politique de maintenance conditionnelle définie préalablement mais sans aborder la disponibilité des pièces dans le stock $S2$ et le niveau de l'action de remanufacturation réalisée. D'un point de vu mathématique, nous visons à déterminer l'ensemble de qualités de pièces de rechange $\{(i)_k/k=1…CN,\ i\in\{0,…,3\}\}$ à installer dans la machine lors des remplacements. Le critère d'optimisation sera la minimisation du coût total engendré par les différentes actions impliquées.

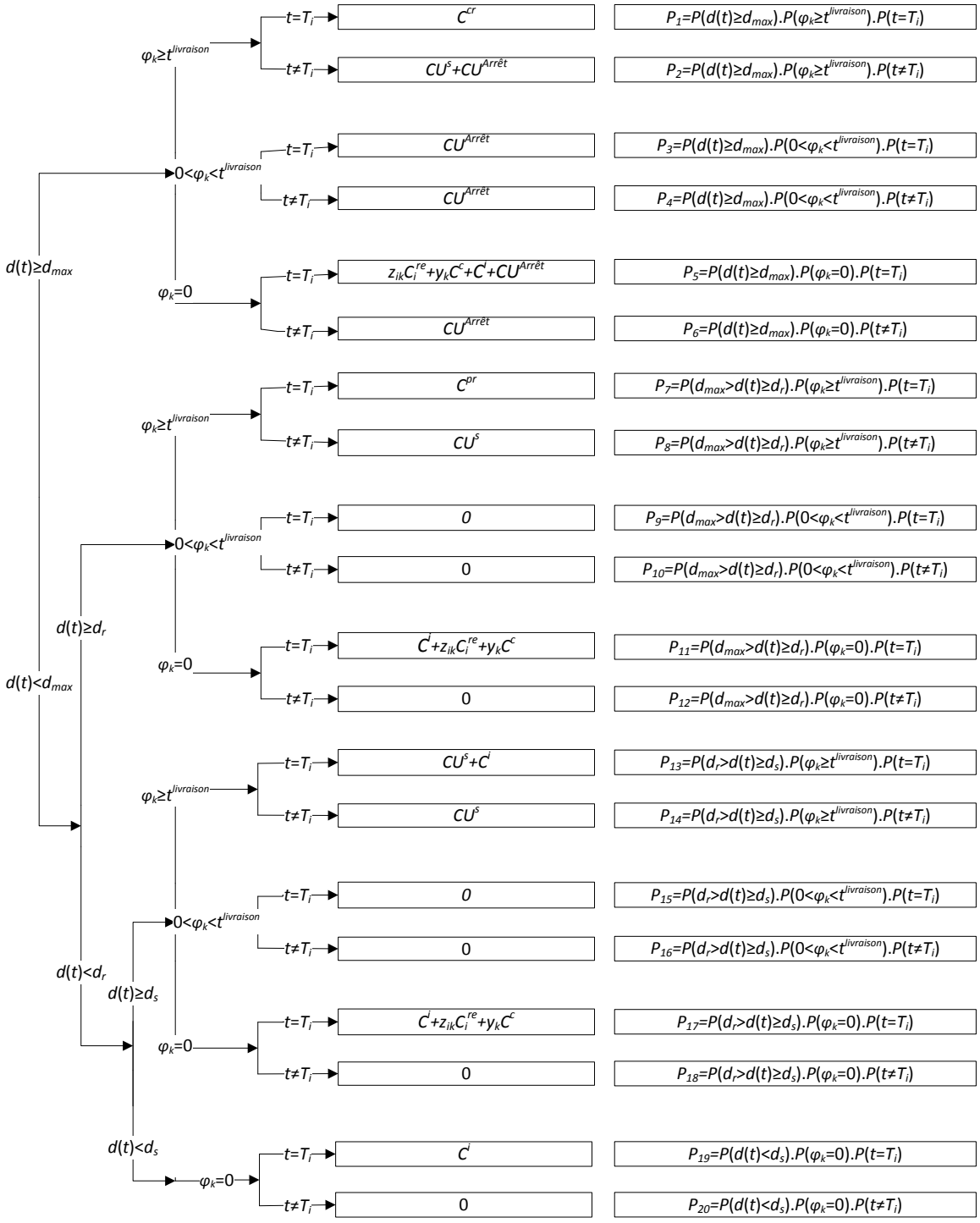


Figure 3:3 Arbre de probabilité associé.

Avec :

C_i^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; remanufacturée \; de \; qualité \; i \; est \; placée \; dans \; la \; machine \\ \qquad au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; neuve \; est \; commandée \; durant \; le \; cycle \; k-1 \; pour \; etre \; palcée \; dans \\ \qquad la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$i \in \{1,2,\dots,n-1\}, k \in \{1,2,\dots,CN\}$

L'aspect aléatoire qui caractérise le processus de dégradation implique que l'occurrence de chaque événement est associée à une probabilité. Les probabilités que l'événement survient à l'instant t et les coûts engendrés sont déterminés en utilisant l'arbre de probabilité (cf. Figure 3:3). Dans cet arbre, la probabilité que la série d'événements d'une branche surviennent est égale au produit de tous les nœuds (probabilités) de cette branche. Ainsi, la fonction de coût associée à l'instant t, s'écrit comme suit :

$$CT_t = \begin{pmatrix} P_1(C^{cr}) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) + P_3\left(CU^{Arrêt}\right) \\ +P_4\left(CU^{Arrêt}\right) + P_5\left(y_k C^c + z_{ik} C_i^{re} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7(C^{pr}) + P_8(CU^s) \\ +P_{11}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{13}\left(CU^s + C^i\right) \\ +P_{14}(CU^s) + P_{17}\left(C^i + y_k C^c + z_{ik} C_i^{re}\right) + P_{19}\left(C^i\right) \end{pmatrix}$$

Donc :

$$CT_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_5 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (y_k C^c + z_{ik} C_i^{re})(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

La fonction coût associée au cycle k est :

$$CT_k = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif est :

$$\boldsymbol{Min\ f = \sum_{k=1}^{CN} CT_k} \qquad \textbf{(3:2)}$$

CN: Nombre de cycles durant la mission T_{miss}.

D_{ik}: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité i durant le cycle k, jusqu'à son remplacement.

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^{n-1} z_{ik} + y_k = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{k=1}^{CN}\left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k\right) \geq T_{miss}$$

$$\sum_{k=1}^{CN-1}\left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k\right) < T_{miss}$$

3.2.3 Approche proposée

Afin d'optimiser le plan d'acquisition qui consiste à définir la séquence des pièces de rechange utilisées lors des différents remplacements, nous avons adopté un algorithme génétique basé sur la simulation qui permet d'évaluer les chromosomes en calculant le coût généré par les différentes actions.

Le codage : Les chromosomes sont représentés par une matrice bidimensionnelle avec deux lignes et *N* colonnes, où *N* est le nombre d'inspections réalisées pendant toute la durée de la mission T_{miss}. La première ligne donne des informations sur le niveau de dégradation lors de chaque inspection. La seconde ligne donne des informations sur la qualité des pièces placées dans la machine. Si l'inspection correspond à un instant de remplacement, la valeur de la deuxième ligne représente la qualité de la pièce de rechange, sinon la valeur est "-1". La figure 3:4 montre un exemple illustratif d'un chromosome :

7	9.7	11	2.5	3.7	5.9	9.1	12	9.5	13.2
2	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	3	-1

Figure 3:4 Structure d'un chromosome.

L'étape "reproduction" est basée sur les opérateurs génétiques qui servent à maintenir la diversité génétique. Chaque nouvelle population est générée avec les opérateurs génétiques classiques: un point de coupure pour le croisement, une sélection des meilleurs chromosomes générés avec une probabilité de 80% et une mutation aléatoire avec une probabilité de 20%.

Le croisement : un croisement par un point de coupure est implémenté (présentée par une flèche sur la Figure 3:5). Le point de croisement est choisi au hasard sur la longueur des chromosomes parents. Cette opération nécessite deux chromosomes parents et donne lieu à deux chromosomes enfants. Chaque chromosome enfant est le résultat de deux parties venant des deux parents.

Après le croisement, deux corrections sont nécessaires sur chaque chromosome enfant. Sans perte de généralité, nous allons prendre pour exemple un des deux chromosomes enfant, que nous allons nommer enfant 1. Ce chromosome recevra sa partie gauche du parent 1 et sa partie droite du parent 2.

La première correction est effectuée à la fin de la partie gauche de l'enfant 1 (à l'origine c'est la partie gauche du parent 1). Cette correction est effectuée à partir de la dernière date de remplacement de cette partie (les instants de remplacement sont présentés par un trait gras sur la figure 3:5), puisque le nombre d'inspections effectuées après le remplacement dépend de la qualité de la pièce de rechange utilisée pour le remplacement suivant. En conséquence, elles dépendent de la qualité de la première pièce de rechange qui apparaît dans la partie droite constituante de l'enfant 2 (à l'origine c'est la partie droite du parent 2). Cette correction peut être redondante, dans le cas où le point de coupure correspond à un instant de remplacement et la première qualité utilisée dans la deuxième partie du chromosome enfant 1 (venant du parent 2) est la même que celle du chromosome parent 1.

La deuxième correction est effectuée à la fin de la partie gauche de l'enfant 1 (à l'origine c'est la partie droite du parent 2), où le chromosome enfant 1 est parfois incomplet lorsque la séquence des pièces de rechange ne permet pas de terminer la mission. Dans ce cas, on ajoute des pièces de rechange à l'extrémité du chromosome, telles que leurs qualités correspondent à celles des pièces de rechange qui apparaissent de gauche à droite dans le chromosome parent 2.

6	7.2	11	3	5.7	5.9	9.1	12	8.5	10.2
2	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	3	-1

4.5	6.4	10.3	9.5	11.1	7.5	11.4	7	7.9	7.5
1	-1	-1	3	-1	3	-1	2	-1	3

Avant le croisement

6	7.2	11	3	5.7	5.9	9.1	12	8.5	10.2
2	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	3	-1

4.5	6.4	10.3	9.5	11.1	7.5	11.4	14	6	7.2
1	-1	-1	3	-1	3	-1	-1	2	-1

Après le croisement

Figure 3:5 Exemple illustratif du croisement et des procédures de correction

Mutation : le chromosome et le gène à muter sont sélectionnés au hasard. Cette procédure consiste à remplacer la qualité du gène avec une autre qualité générée de façon aléatoire. Le résultat de la mutation peut fournir un chromosome incomplet. Cette situation exige la même technique que la correction présentée ci-dessus dans la section de croisement (deuxième correction).

3.2.4 Expériences numériques et analyse

Dans cette partie, nous présentons deux exemples illustrant les résultats obtenus en appliquant l'approche proposée. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser deux scénarios de dégradation comme exemples d'application. Ces scénarios sont représentés par les bornes qui délimitent la dégradation de la machine, à savoir, le pire et le meilleur scénario de dégradation, donnés par l'équation 3:3 et 3:4 respectivement.

$$d^{min}(t)-d^{min}(t\text{-}1)= a^{min}_{i} \qquad (3:3)$$

$$d^{max}(t)-d^{max}(t\text{-}1)= a^{max}_{i} \qquad (3:4)$$

avec $a^{min}_{i} \leq a_i \leq a^{max}_{i}$ et $0 < a^{max}_{i} \leq a^{min}_{i+1}$; $i = 0\ldots n\text{-}1$.

De cette manière, nous fournissons au décideur des bornes liées au coût total engendré par les différentes actions réalisées durant la mission T_{miss}, et une idée précise sur les qualités possibles de pièces de rechange utilisées pour les remplacements.

Les données numériques communes entre les deux exemples sont :

Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5) : une qualité neuve, une qualité destiné à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. Les variables a_i sont

bornées par les valeurs suivantes : $a^{min}{}_0$ =0.5, $a^{max}{}_0$ =$a^{min}{}_1$=1, $a^{max}{}_1$ =$a^{min}{}_2$=1.5, $a^{max}{}_2$ =$a^{min}{}_3$=2, $a^{max}{}_3$ =2.5. Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux de dégradation initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5. Les seuils décisionnels d_r=7.5 et d_s=5 et la périodicité d'inspection T=4 *ut*.

***Exemple* 1** : Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=4 *ut* avec un coût de C^c=120 *um*, le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 1 est $t^{re}{}_1$=3 *ut* avec un coût de $C^{re}{}_1$=60 *um*, le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 2 est $t^{re}{}_2$=2 *ut* avec un coût de $C^{re}{}_2$=40 *um*, le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 3 est $t^{re}{}_3$=0 *ut* avec un coût de $C^{re}{}_3$=20 *um*, le coût unitaire d'inspection C^i=8 *um*, le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*, le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=250 *um*, le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S1$ est CU^s=3 *um/pièce/ut* et le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*.

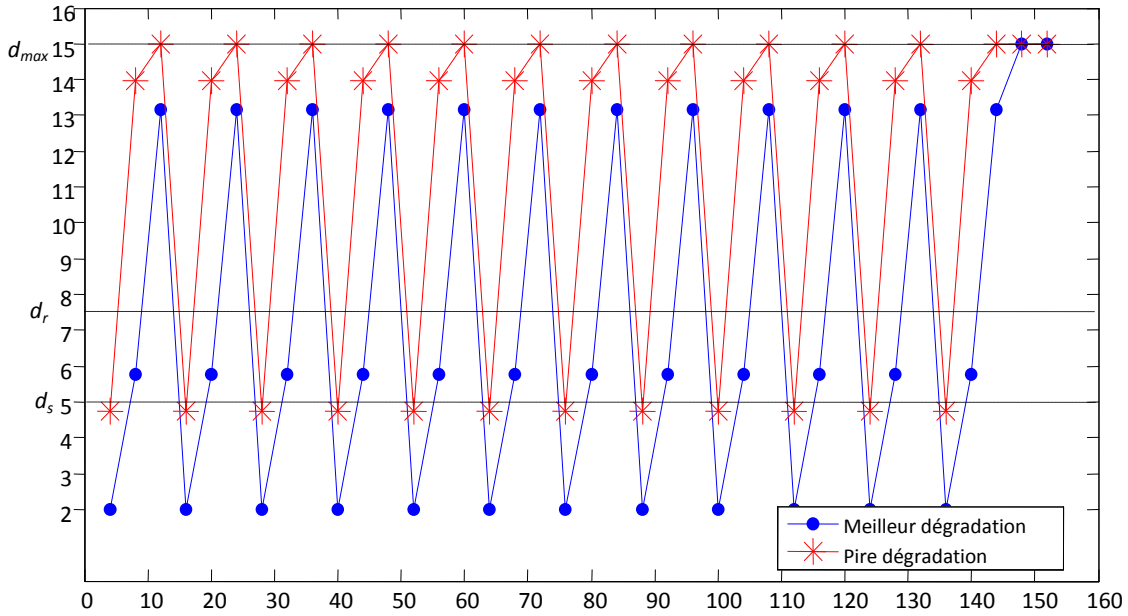


Figure 3:6 Niveau de dégradation observé (exemple 1)

														Cost
Meilleur scenario de dégradation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2498
Pire scenario de dégradation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5428

Tableau 3:1 Les qualités de pièces de rechange installées dans la machine.

Le niveau de dégradation observé lors des inspections pour le meilleur scénario de dégradation (MSD) est plus bas que le pire scénario de dégradation (PSD). Le niveau de dégradation dépasse le seuil de commande d_s à la seconde inspection. Lors de cette inspection, le niveau observé pour le MSD est loin du seuil de défaillance d_{max}, contrairement au PSD où le niveau observé est très proche de d_{max}. Dans la figure 3:6 (exemple 1), on remarque que pour le meilleur scénario de dégradation représenté en bleu, le niveau de dégradation n'atteint jamais le seuil de défaillance d_{max}. Toutes les pièces de rechange sont préventivement remplacées par de nouvelles pièces de

rechange (voir le tableau 3:1), sauf la dernière, qui est de qualité 3, cette pièce de rechange dépasse le seuil d_{max} et elle termine la mission avec un temps d'arrêt de la machine. Cependant, pour le pire scénario de dégradation représenté en rouge, les pièces de rechange sont de même qualité que celle du meilleur scénario de dégradation, mais avec des remplacements correctifs réalisés à l'instant où le niveau de dégradation atteint le seuil d_{max}.

***Exemple* 2** : Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=150 *um,* le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 1 est t^{re}_1=6 *ut* avec un coût de C^{re}_1=70 *um*, le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 2 est t^{re}_2=3 *ut* avec un coût de C^{re}_2=60 *um*, le temps de remanufacturation d'une pièce pour obtenir une pièce de qualité 3 est t^{re}_3=0 *ut* avec un coût de C^{re}_3=50 *um*, le coût unitaire d'inspection C^i=8 *um*, le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*, le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=250 *um*, le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans *S*1 est CU^s=3 *um/pièce/ut* et le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*.

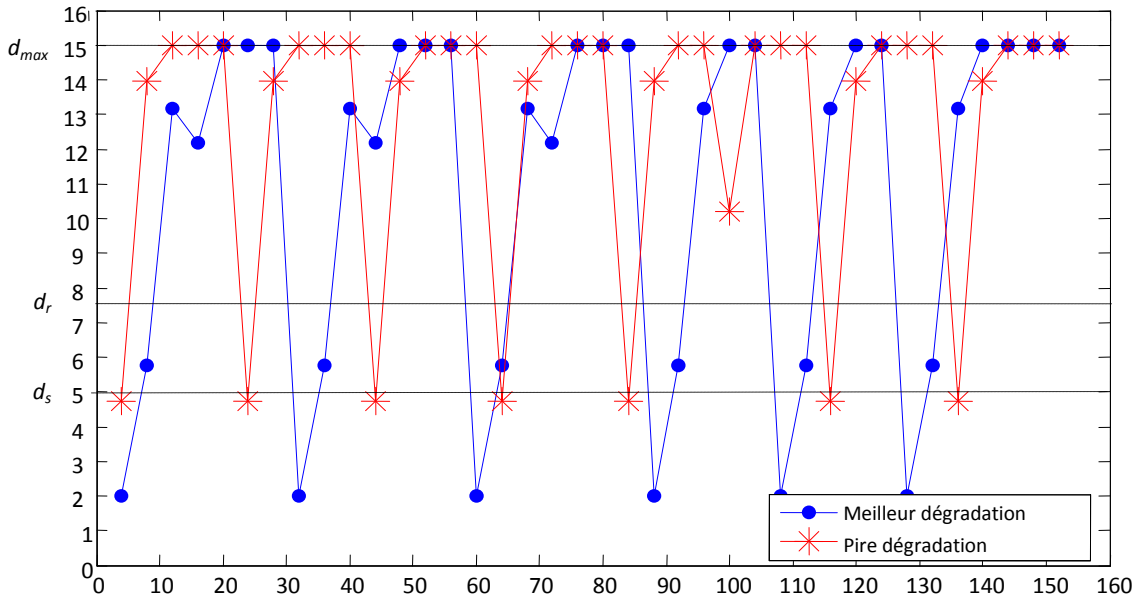


Figure 3:7 Niveau de dégradation observé (exemple 2).

											Cost
Meilleur scenario de dégradation	0	2	0	2	0	2	0	0	0	3	2498
Pire scenario de dégradation	0	0	0	0	0	1	0	0	Ø	Ø	5428

Tableau 3:2 Les qualités de pièces de rechange installées dans la machine (exemple 2).

Pour le deuxième exemple, nous pouvons distinguer le meilleur scénario de dégradation (figure 3:7) représenté en bleu et nous remarquons que si la pièce est de qualité 2 le niveau de dégradation dépasse le seuil de panne d_{max}, avec un temps d'arrêt de machine et des remplacements de correction avec une pièce rechange commandée neuve. D'autre part, si la pièce de rechange installée est neuve et celle qui est commandée ne l'est pas, alors la dégradation n'atteint pas le seuil d_{max} et son remplacement est préventif. Pour le pire scénario de dégradation représenté en rouge, la plupart des pièces de rechange sont neuves (voir tableau 3), et elles dépassent toutes le seuil d_{max} avec un temps d'arrêt de machine.

La différence observée sur les coûts générés est moins importante dans le second exemple par rapport à l'exemple 1, cela est dû à la nature des remplacements : ils sont préventifs pour MSD du premier exemple, et préventifs et correctifs dans le second exemple. Pour le PSD les remplacements sont correctifs pour les deux exemples.
En plus, la nature de remplacement (préventif ou correctif) dépend du délai de livraison. Ce qui implique que la pièce de rechange commandée arrive en stock avant ou après que le niveau de dégradation n'atteint le seuil d_{max}.

3.3 Optimisation de la politique d'acquisition des pièces de rechange avec la prise en compte de la gestion de stock

3.3.1 Description du problème

Dans cette partie du document, nous passons à une étape importante dans l'étude du système de production à une seule machine. Il s'agit d'une extension de la section précédente et nous visons à optimiser la politique d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour les remplacements. Les pièces de rechange arrivent principalement de deux sources : d'un fournisseur externe et d'un atelier de remanufacturation. Les pièces remanufacturées sont des pièces récupérées de la machine lors des remplacements. (cf. Figure 3:8).

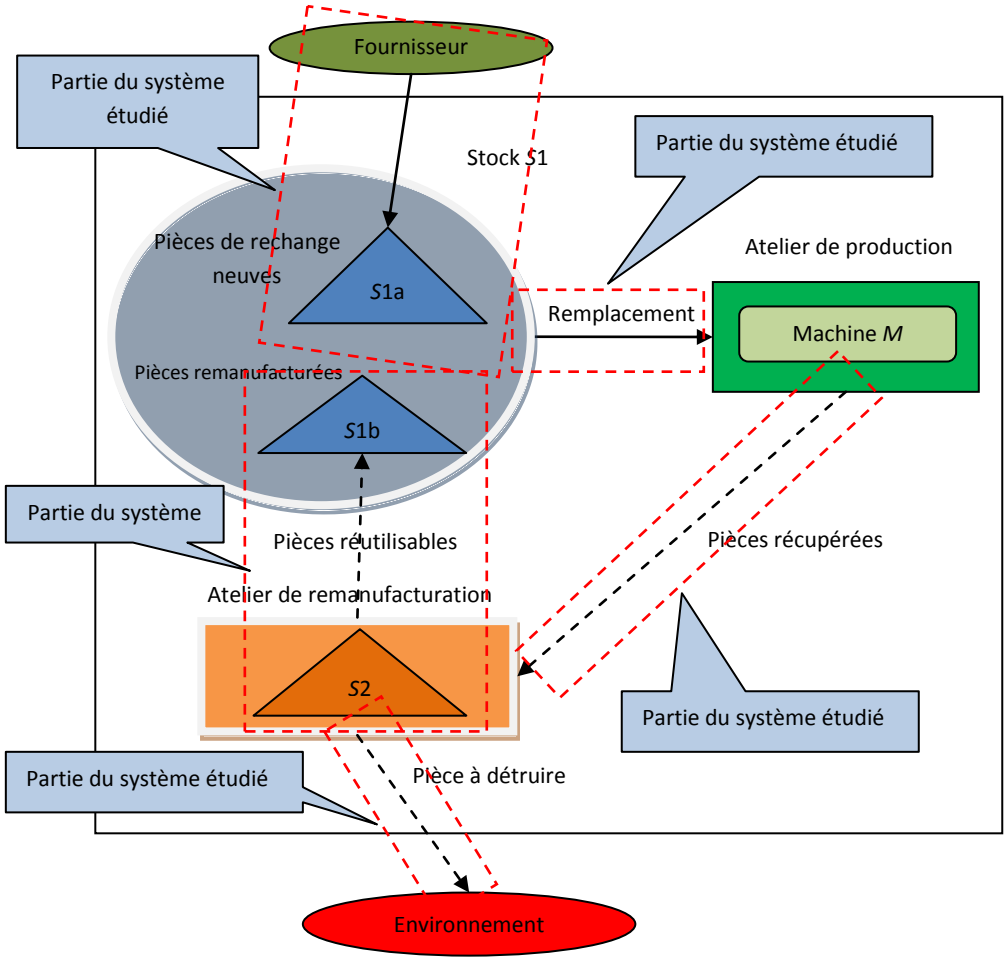


Figure 3:8 Système étudié

Sachant que la machine est sujette à des défaillances dues à une dégradation graduelle continue. Une maintenance conditionnelle est adoptée, dont les paramètres (seuils (d_s et d_r) et plan d'inspection) sont connus. Notre objectif consiste à optimiser la séquence de qualité de pièces de rechange utilisées pour les remplacements, sur un horizon fini T_{miss} , en revanche cette optimisation ne se limite pas aux qualités à installer dans la machine, mais intègre aussi le choix des qualités initiales (dans le cas des pièces remanufacturées) et la disponibilité de ces pièces dans le stock S2.

Les hypothèses de base de cette section sont peuvent résumées à travers les points suivants :

1. La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante et elle a pour incrément a_i qui dépend de la qualité de pièce de rechange. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d(t)=d(t-1)+ a_i \qquad (3:5)$$

a_i est une variable aléatoire uniforme qui dépend de la qualité i de la pièce de rechange installée (i = 0…n) ; $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

2. Les décisions relatives à l'optimisation de la maintenance, à savoir les seuils de dégradation et le plan d'inspection sont prises comme des données d'entrée pour le problème.

3. Les pièces de rechange destinées à la remanufacturation sont disponibles dans le stock $S2$, en quantités limitées pour chaque qualité. En effet, ces quantités dépendent des qualités récupérées de la machine lors des remplacements précédents.

4. Le niveau de remanufacturation dépend de la qualité de la pièce de rechange prise du stock $S2$ et de la qualité à installer dans la machine.

5. L'inspection est réalisée selon un plan périodique avec une l'annulation des actions d'inspection comprises entre la date du lancement de la commande et l'arrivée de la pièce en stock.

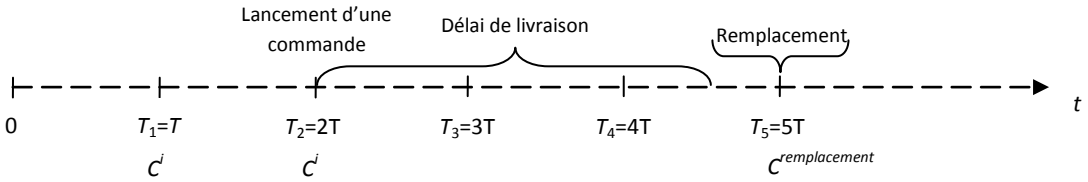


Figure 3:9 Politique périodique d'inspection adoptée

3.3.2 Modèle mathématique

L'objectif dans cette section est d'optimiser le plan d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour le remplacement, en sélectionnant le mode de commande (une pièce neuve ou remanufacturée) et le niveau de remanufacturation à réaliser, sous la contrainte de disponibilité des pièces dans le stock $S2$. Cela revient à déterminer l'ensemble des couples $\{(i,l)_k/k=1…CN,\ i\in\{0,…,3\}$ et $l\in\{0,…,3\}\}$ définis par : la qualité des pièces de rechange à installer dans la machine lors des rem-

placements et les pièces choisies du stock *S*2 dans le cas d'une pièce remanufacturée. Cette optimisation vise à minimiser le coût total engendré par les différentes actions impliquées.

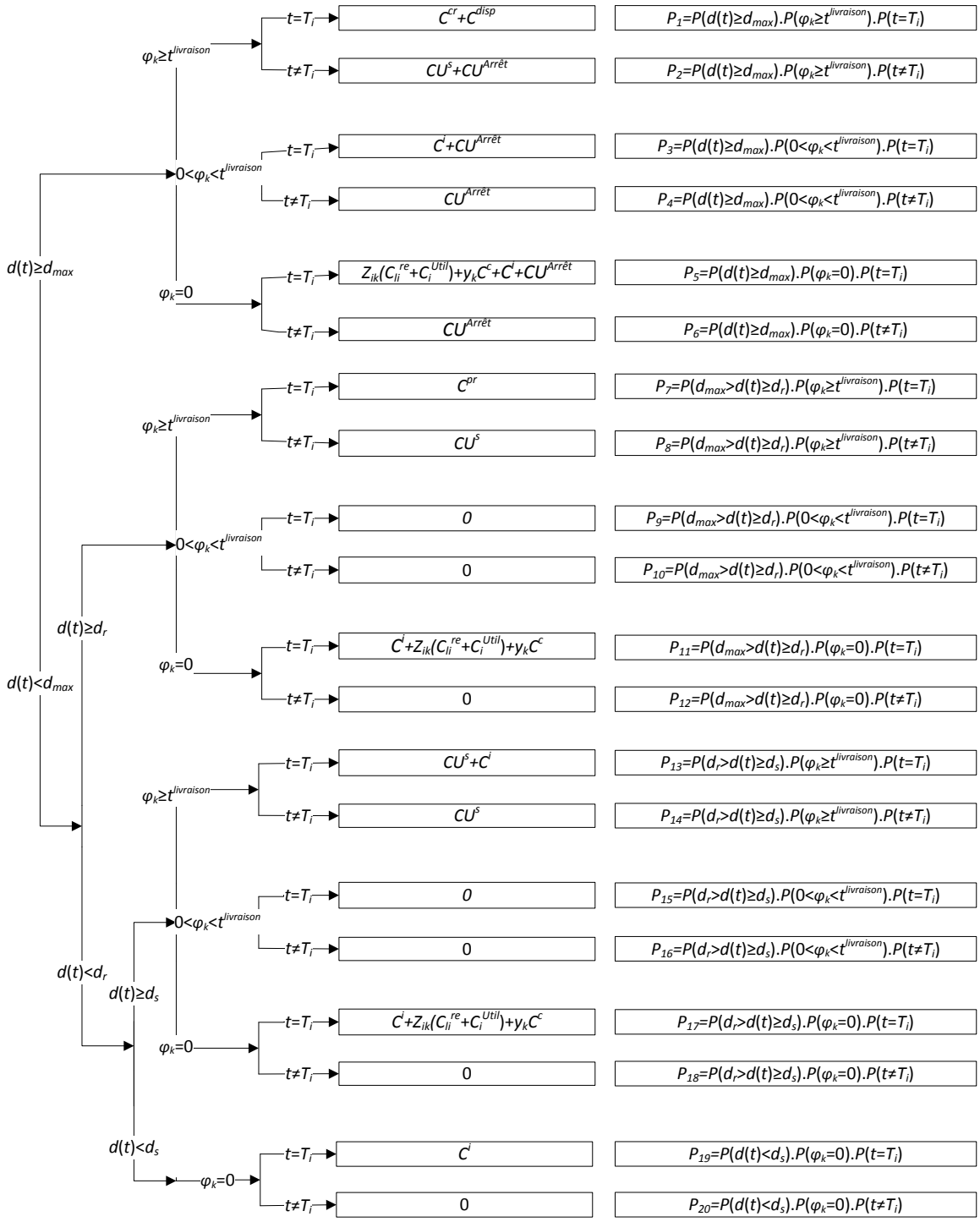


Figure 3:10 Arbre de probabilité associé.

Avec :

C^{disp}: Coût de destruction d'une pièce de qualité *n*

C_{li}^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce de qualité *l*, afin d'obtenir une pièce de rechange de qualité *i* ;

C_i^{Util}: Le coût d'utilisation d'une pièce de rechange de qualité *i* ;

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; remanufacturée \; de \; qualité \; i \; est \; placée \; dans \; la \; machine \\ \qquad au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; neuve \; est \; commandée \; durant \; le \; cycle \; k-1 \; pour \; etre \; palcée \; dans \\ \qquad la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$x_{lk} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; de \; qualité \; l \; est \; prise \; du \; stock \; S2 \; pour \; être \; remanufacturée \; durant \\ \qquad le \; cycle \; k-1 \; pour \; être \; placée \; dans \; la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$s_{hk} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; de \; qualité \; h \; est \; récupérée \; de \; la \; machine \; à \; la \; fin \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$i \in \{1, \dots, n-1\}, l \in \{1, \dots, n-1\}, h \in \{1, \dots, n\}, k \in \{1, \dots, CN\}$

En se basant que l'arbre de probabilité associé au problème étudié à travers cette section (cf. figure 3:10) la fonction de coût associée à l'instant *t*, s'écrit comme suit :

$$CT_t = \begin{pmatrix} P_1(C^{cr} + C^{disp}) + P_2(CU^s + CU^{Arrêt}) + P_3(CU^{Arrêt}) \\ +P_4(CU^{Arrêt}) + P_5(y_k C^{or} + z_{ik}(C_{li}^{re} + C_i^{Util}) + C^i + CU^{Arrêt}) \\ +P_6(CU^{Arrêt}) + P_7(C^{pr}) + P_8(CU^s) \\ +P_{11}(C^i + y_k C^{or} + z_{ik}(C_{li}^{re} + C_i^{Util})) + P_{13}(CU^s + C^i) \\ +P_{14}(CU^s) + P_{17}(C^i + y_k C^{or} + z_{ik}(C_{li}^{re} + C_i^{Util})) + P_{19}(C^i) \end{pmatrix}$$

donc :

$$CT_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + C^{disp}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_5 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (y_k C^{or} + z_{ik}(C_{li}^{re} + C_i^{Util}))(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

La fonction coût associée au cycle *k* est :

$$CT_k = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif est :

$$\boldsymbol{Min \; f = \sum_{k=1}^{CN} CT_k} \qquad \textbf{(3:6)}$$

CN: Nombre de cycles durant la mission T_{miss}.

D_{ik}: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité *i* durant le cycle *k*, jusqu'à son remplacement.

Sous les contraires suivants :

$$\sum_{i=1}^{n-1} z_{ik} + y_k = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} x_{lk} + y_k = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} P_7 . s_{lk} + P_1 . s_{nk} = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} l x_{lk} \geq \sum_{l=1}^{3} i z_{ik} \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{k=1}^{CN} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) \geq T_{miss}$$

$$\sum_{k=1}^{CN-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) < T_{miss}$$

Avec :

$$Q_{lk} \geq x_{lk} \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN \quad ; \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$$

$$Q_{lk} = Q_{lk-1} + s_{lk-1} - x_{lk+1}$$

$$\forall\, k = 1 \dots CN \,; \quad \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$$

Q_{lk} : Le nombre de pièce de qualité *j* disponible dans le stock *S*2 au début du cycle *k*.

3.3.3 Approche proposée

Afin d'optimiser le plan d'acquisition, qui consiste à définir la séquence des pièces de rechange qui seront utilisées pour les remplacements, nous avons adopté un algorithme génétique basé sur la simulation.

Le codage : Les chromosomes sont représentés par une matrice bidimensionnelle avec deux lignes et *N* colonnes, où *N* est le nombre d'inspections réalisées pendant toute la durée de la mission T_{miss} (figure 3:12).

La construction des chromosomes est basée sur le contenu du stock S2. Nous représentons le stock S2 par une matrice *M*1 de taille (1×4). Chaque élément de la matrice contient le nombre de pièces de rechange de qualité *i* disponibles dans le stock et l'indice de la cellule représente la qualité de la pièce de rechange. Les étapes suivantes décrivent comment un chromosome est construit :

Pour chaque colonne (instant de l'inspection) du chromosome:

1. Étape 1 : Sur la base de la matrice *M*1, nous créons une autre matrice *M*2 avec les indices des qualités disponibles dans *S*2 et la qualité neuve (considérée comme disponible à tout moment) (figure 3:11).

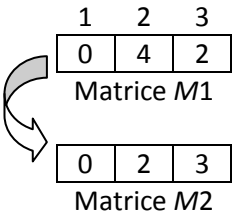


Figure 3:11 Exemple de création de matrice *M*2.

2. Étape 2 : Si l'inspection est un instant de remplacement, la valeur de la première ligne est un nombre réel aléatoire entre 0 et 1 et la valeur de la deuxième ligne représente le niveau de remanufacturation, sinon la valeur des deux lignes est égale à -1. Le niveau de remanufacturation est généré d'une façon aléatoire et dépend de la qualité de la pièce de rechange sélectionnée (commandée du fournisseur ou prise du *S*2).

   La qualité de la pièce de rechange sélectionnée pour un remplacement *m* correspond à l'un des indices de la matrice *M*2. Pour obtenir la valeur de cet indice, nous utilisons la valeur réelle mise à cette position (*m*). Elle est égale à la valeur entière supérieure de la multiplication de la valeur réelle par la longueur de la matrice *M*2. Par exemple, pour la matrice M2 de la figure 3:11, si la valeur réelle est 0.7, alors l'indice est $\lceil 0.7\times 3\rceil=3$ et la qualité choisie est ainsi la qualité 3.

3. Étape 3 : Mises à jour de la matrice M1, en mettant à jour le stock *S*2.

0.5	-1	-1	0.0	-1	-1	-1	-1	0.6	-1
0	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	-1

Figure 3:12 Structure d'un chromosome.

L'étape "reproduction" est basée sur les opérateurs génétiques qui servent à maintenir la diversité génétique. Chaque nouvelle population est générée avec les opérateurs génétiques classiques. Le codage, les opérateurs génétiques ainsi que les procédures de correction sont les mêmes que ceux détaillés dans la section 3.2.3.

3.3.4 Expériences numériques et analyse

Dans cette partie, nous allons présenter un exemple illustrant les résultats obtenus en appliquant l'approche proposée. Comme pour le premier problème de ce chapitre, nous avons décidé d'utiliser deux scénarios de dégradation, à savoir, le pire et le meilleur scénario de dégradation, donnés par l'équation 3:7 et 3:8 respectivement.

$$d^{min}(t)-d^{min}(t\text{-}1)= a^{min}_{i} \qquad (3:7)$$

$$d^{max}(t)-d^{max}(t\text{-}1)= a^{max}_{i} \qquad (3:8)$$

Où $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0 < a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$; $i = 0...n$.

Cela permet au décideur d'avoir les bornes du coût total engendré par les différentes actions réalisées durant la mission T_{miss}, pour la gestion des commandes et des actions de remanufacturation sous contrainte de disponibilité dans stock $S2$.

Les données numériques utilisées sont :

Comme pour le problème précédent, nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5) : une qualité neuve, une qualité destiné à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. Les variables a_i sont bornées par les valeurs suivantes : a^{min}_0 =0.5, a^{max}_0 =a^{min}_1=1, a^{max}_1 =a^{min}_2=1.5, a^{max}_2 =a^{min}_3=2, a^{max}_3 =2.5, Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux de dégradation initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5 et les seuils décisionnels d_r=7.5 et d_s=5 avec une périodicité d'inspection T=4 *ut*. Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=300 *um,* L'utilisation d'une pièce de rechange remanufacturée implique un coût fixe C_1^{Util}=70 (Pour qualité 1), C_2^{Util}=40 (Pour qualité 2), C_3^{Util}=10 (Pour qualité 3), le coût unitaire d'inspection C^i=8 *um,* le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um,* le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=250 *um,* le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S1$ est CU^s=3 *um/pièce/ut,* Le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*, Le coût destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um.* Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 3:3 e*t* les états des stocks $S2$ au début de la mission t=0 sont présentés dans le tableau 3:4.

	3->2	**3->1**	**2->1**
Coût de remanufacturation	10	20	10
Temps de remanufacturation	1	2	3

Tableau 3:3 Les temps et les coûts de remanufacturation.

	Qualité 1	**Qualité 2**	**Qualité 3**
S2	0	1	2

Tableau 3:4 L'état initial du stock S2.

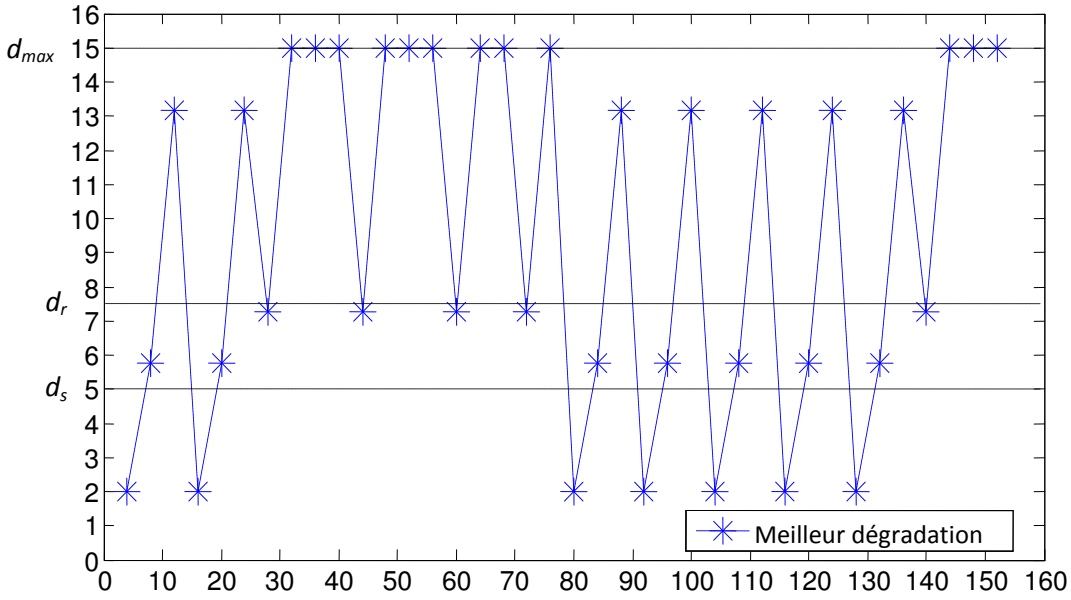


Figure 3:13 Niveau de dégradation observé (Meilleur dégradation)

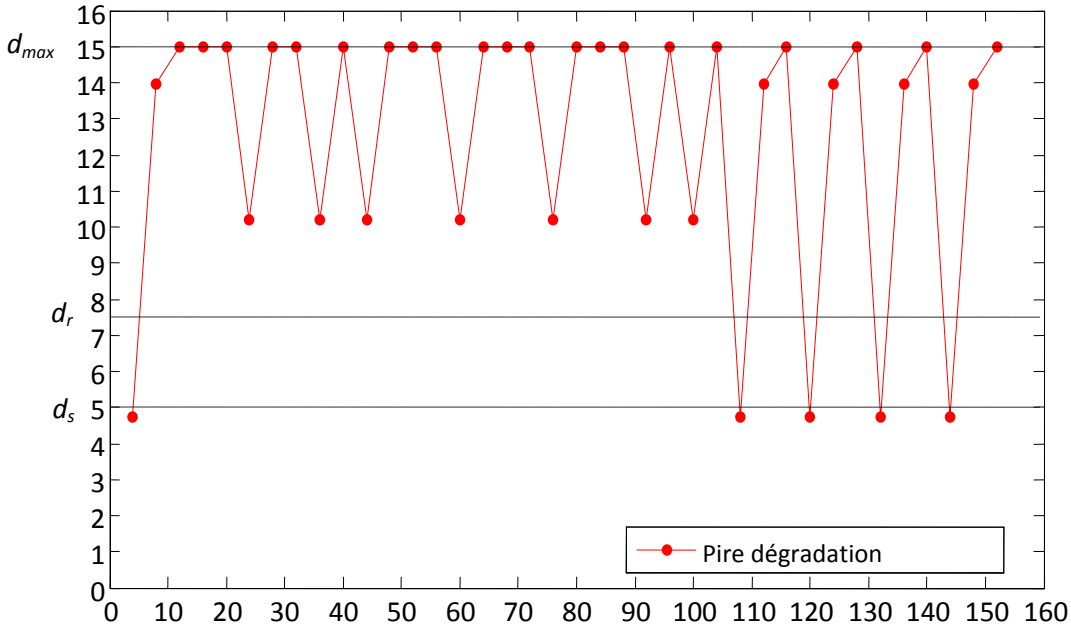


Figure 3:14 Niveau de dégradation observé (Pire dégradation)

	Meilleur scénario de dégradation									Pire scénario de dégradation								
Cycle	1			2			3			1			2			3		
Qualité de pièce de rechange dans S2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Le nombre disponible	2	1	5	1	1	6	1	1	5	2	1	3	2	0	3	1	0	3
Pièce de rechange installée	0			0			1			0			1			1		
Pièce de rechange choisie	0			0			1			0			3			2		
Niveau de remanufacturation	0			0			0			0			2			1		
Pièce de rechange récupérée	3			3			4			4			4			4		
Cycle	4			5			6			4			5			6		
Qualité de pièce de rechange dans S2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Le nombre disponible	1	1	4	1	0	4	1	0	4	1	0	2	1	0	1	1	0	0
Pièce de rechange installée	1			1			1			1			1			1		
Pièce de rechange choisie	3			3			2			1			3			3		
Niveau de remanufacturation	2			2			1			0			2			2		
Pièce de rechange récupérée	4			4			4			4			4			4		
Cycle	7			8			9			7			8			9		
Qualité de pièce de rechange dans S2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Le nombre disponible	1	0	5	1	0	6	1	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pièce de rechange installée	0			0			0			1			1			0		
Pièce de rechange choisie	0			0			0			3			1			0		
Niveau de remanufacturation	0			0			0			2			0			0		
Pièce de rechange récupérée	3			3			3			4			4			4		
Cycle	10			11			12			10			11			12		
Qualité de pièce de rechange dans S2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Le nombre disponible	1	0	8	0	0	9	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pièce de rechange installée	0			0			1			0			0			0		
Pièce de rechange choisie	0			0			1			0			0			0		
Niveau de remanufacturation	0			0			0			0			0			0		
Pièce de rechange récupérée	3			3			4			4			4			4		
Coût Total	4236.7 *um*									6056.3 *um*								

Tableau 3:5 Les temps et les coûts de remanufacturation.

Nous constatons que le niveau de dégradation observé lors des inspections dans le cas du meilleur scénario de dégradation (figure 3:14) est plus bas que dans le cas du pire scénario de dégradation (figure 3:15). Le niveau de dégradation dépasse le seuil de commande à la seconde inspection. Lors de cette inspection, le niveau inspecté dans le premier cas est loin du seuil de panne d_{max}, contrairement au deuxième cas où le niveau inspecté est très proche de d_{max}.
Pour le meilleur scénario de dégradation, nous remarquons que si la pièce de rechange installée est neuve, le niveau de dégradation n'atteindra jamais le seuil d_{max}, ainsi, le remplacement est préventif, par ailleurs, le niveau de dégradation dépasse d_{max}, avec un temps d'arrêt de la machine et un remplacement correctif.
Pour le pire scénario de dégradation, l'ensemble des remplacements sont correctifs, quelle que soit la qualité de la pièce de rechange placée (figure 3:15), avec un temps d'arrêt de la machine pour certains cas.
Nous observons aussi que dans les deux cas (pire et meilleur scénarios de dégradation), les pièces de rechange installées sont de qualité 1 ou de qualité 0.
Enfin, nous constatons que dans le meilleur scénario de dégradation, le nombre des pièces de rechange de qualité 3 augmentations dans $S2$ et elles sont peu utilisées. Cette situation pourrait affecter les politiques de maintenance et de remanufacturation en posant une contrainte supplémentaire obligeant le système à puiser dans ce stock de pièces de qualités 3.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système de production dans le cadre d'une chaîne logistique en boucle fermée avec une seule machine soumise à une détérioration stochastique monotone. Notre objectif consiste à déterminer la qualité des pièces de rechange à utiliser pour chaque action de remplacement pendant un horizon fini. Les pièces de rechange utilisées sont fournies par deux sources : de la part d'un fournisseur pour les pièces de rechange neuves ou de la part d'un atelier de remanufacturation après une action de remanufacturation qui dépend de la qualité de la pièce de rechange inspectée lors de sa récupération de la machine après une action de remplacement. Tout d'abord, nous avons proposé un modèle mathématique pour le problème. Par la suite, nous avons proposé une approche basée sur un algorithme génétique, pour déterminer la séquence des pièces de rechange à installer sur la machine. Cette approche a été proposée sous deux versions par rapport à la prise en compte de la gestion de stock. Nous avons appliqué par la suite les deux approches sur les bornes de dégradation pour fournir une limite inférieure et une limite supérieure du coût total. Cependant, les résultats des exemples numériques restent spécifiques; ils dépendent des coûts unitaires de chaque action, du niveau de stocks et des délais de livraison/remanufacturation.

Chapitre 4 Optimisation intégrée et en temps réel de la politique de maintenance et la politique d'acquisition des pièces de rechange

4.1 Introduction

Les défis économiques et environnementaux ont motivé les industriels à innover dans la conception des produits, dans les procédés de fabrication et dans la gestion des produits en fin de vie. Cependant, la problématique de gestion des opérations de fin de vie des produits et des systèmes reste à la fois la tâche la plus difficile à aborder et la plus influente sur l'économie et l'environnement. Cette influence est une conséquence de la façon avec laquelle les produits sont utilisés durant leur cycle de vie. Ainsi, différentes méthodes ont été développées afin de mieux exploiter les produits durant leur fonctionnement et après leur fin de la vie [80]. Ces méthodes ont donné naissance à la chaîne logistique en boucle fermée, qui inclut les opérations de la chaîne logistique classique et la chaîne logistique inverse.

Dans le même contexte, la maintenance d'un système vise à le maintenir en fonctionnement et prolonger sa durée de vie aussi longtemps que possible. Cependant, la disponibilité du système de production ne va pas dans le même sens que le coût engendré par les actions de maintenance (i.e. augmenter la disponibilité du système implique un coût plus élevé). En conséquence, des politiques de maintenance ont été développées afin de conserver un équilibre acceptable entre le coût de maintenance et la disponibilité du système. Ces politiques découlent principalement de deux politiques de maintenance, à savoir la maintenance corrective et maintenance préventive.

La politique de maintenance adoptée implique l'utilisation de ressources matérielles et humaines, qui varient en fonction du type de défaillance du système et la nature de ce dernier. Ces ressources interviennent sur différents niveau du processus de maintenance. D'une part, pour la détection de la défaillance, et d'autre part, pour la réalisation des actions de maintenance. La détection du niveau de dégradation est réalisée soit par une surveillance continue (camera, détecteur de vibration,…) ou par une inspection (intervention pour mesurer, observation,…). L'action de la maintenance est réalisée soit sous la forme d'une réparation (en utilisant des outils de réparation) ou par un remplacement (en utilisant une pièce de rechange).

L'utilisation des pièces de rechange pour la maintenance des systèmes de production n'est pas une nouveauté dans la littérature. Wang et al. [2] [21], ont étudié un système de production sujet à une dégradation aléatoire et soumis à une politique de maintenance conditionnelle adoptée pour le maintenir en marche, avec politique de commande pour les pièces de rechange utilisées lors des remplacements. Cette politique de commande est basée sur une chaîne logistique classique, telle que les pièces de rechange arrivent d'un fournisseur et passe par un stock avant d'être utilisées. Chari et al. [78] traitent une problématique liée à une garantie unidimensionnelle basée sur le temps. Durant cette garantie, le fabricant effectue les réparations de toutes les défaillances qui se produisent gratuitement. Afin de réaliser les réparations, le fabricant utilise des composants reconditionnés ou des composants neufs. Ainsi, l'acquisition des composants est basée sur une chaîne logistique en boucle fermée.

Dans ce chapitre, nous traitons une problématique qui combine les deux problèmes traités dans le chapitre 2 et 3 et nous proposons une intégration de la gestion des pièces de rechange par une chaîne logistique en boucle fermée, dans un contexte de maintenance conditionnelle d'un système de production à une seule machine. Ainsi, le but de chapitre est d'optimiser simultanément : les paramètres de la politique de maintenance, à savoir, le plan d'inspection et les seuils

décisionnels qui permettent de gérer les actions de maintenance ; La gestion d'acquisition des pièces de rechange utilisées lors des remplacements, sur la base d'une chaîne logistique en boucle fermée. Le reste du chapitre est organisé comme suit :

Dans la section 4.2, nous présentons les hypothèses liées au système étudié. Par la suite, nous présentons une formulation mathématique du problème dans la section 4.3, où nous utilisons l'arbre de probabilité pour déterminer la fonction coût. La section 4.4 est dédiée à la présentation de l'approche proposée. Des résultats illustrant l'application de l'approche proposée sont présentés dans la section 4.5. Enfin, des conclusions sont présentées dans la section 4.6.

4.2 Description du problème

Dans ce chapitre, nous passons à une autre étape dans notre étude de système à une seule machine. En effet, nous traitons la problématique d'intégration de la chaîne logistique en boucle fermée avec la contrainte de maintenance. Il s'agit d'étudier l'optimisation simultanée de la maintenance conditionnelle et la gestion de la chaîne logistique en boucle fermée qui vise à satisfaire le système en pièces de rechange utilisées pour chacun des remplacements. Ces pièces peuvent être neuves en provenance d'un fournisseur externe (chaîne logistique classique) ou récupérées puis remanufacturées dans un atelier de remanufacturation (chaîne logistique inverse) (figure 4:1).

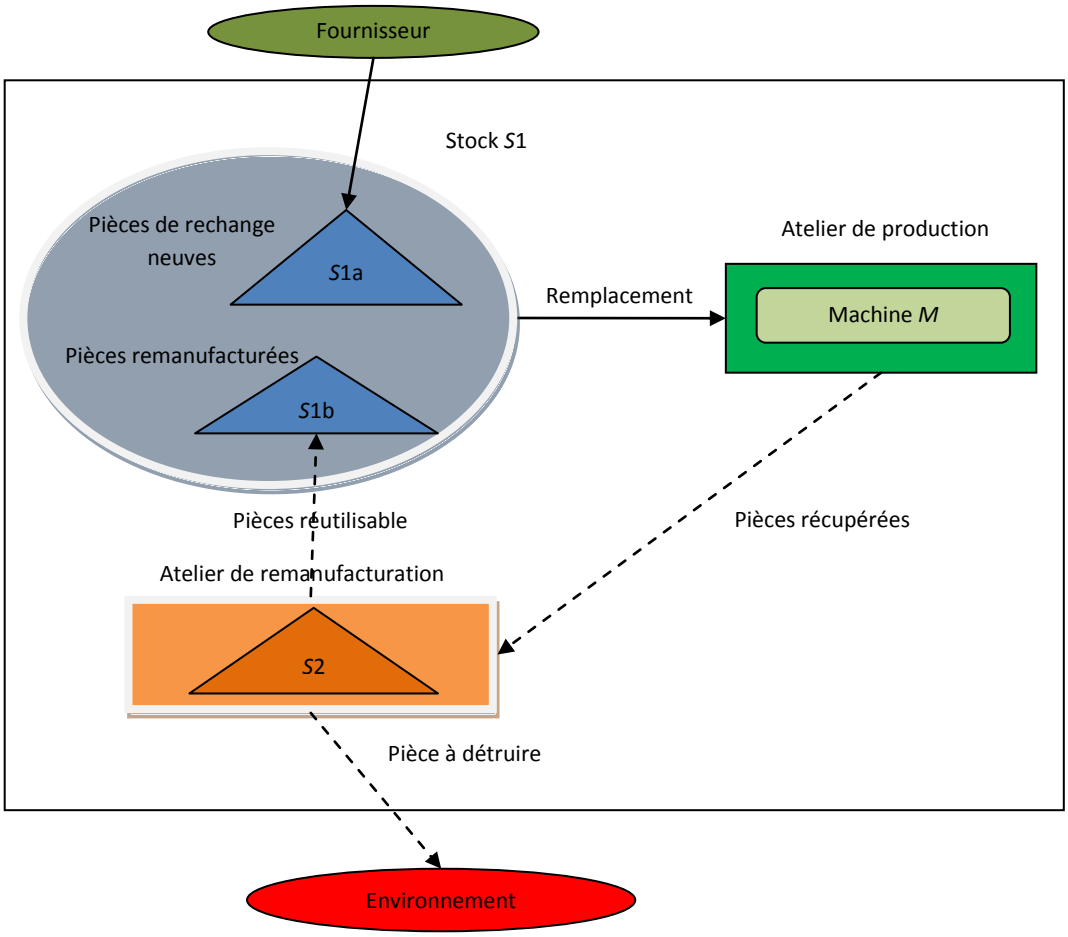


Figure 4:1 Système étudié

Comme nous l'avons déjà motionné plus haut, la machine qui constitue l'atelier de production est sujette à une défaillance due à une dégradation graduelle continue. L'objectif de ce chapitre consiste à optimiser simultanément et en temps réel sur un horizon fini T_{miss} les aspects suivants : (i) La séquence des qualités de pièces de rechange utilisées pour les remplacements avec le choix des qualités qui seront installées dans la machine et le choix des qualités initiales (dans les cas des pièces remanufacturées) sous une contrainte de disponibilité de ces pièces dans le stock S2. (ii) La politique de maintenance conditionnelle définie par les seuils décisionnels d_s et d_r, et le plan d'inspection de la machine.

Les hypothèses de base de ce chapitre sont résumées comme suit :

1. La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante avec un incrément a_i qui dépend de la qualité des pièces de rechange. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d(t)=d(t-1)+ a_i \qquad (4:1)$$

a_i est une variable aléatoire uniforme qui dépend de la qualité i de la pièce de rechange installée (i = 0…n) ; $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

2. Les pièces de rechange destinées à remanufacturation sont disponibles dans le stock $S2$ en quantités limitées pour chaque qualité. Ces quantités dépendent des qualités récupérées de la machine lors des remplacements précédents.

3. Le niveau de remanufacturation dépend de la qualité de la pièce prise du stock $S2$ et de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine.

4. L'inspection est réalisée selon un plan séquentiel, où les dates d'inspection sont calculées en utilisant l'heuristique proposée dans la section 2.3.

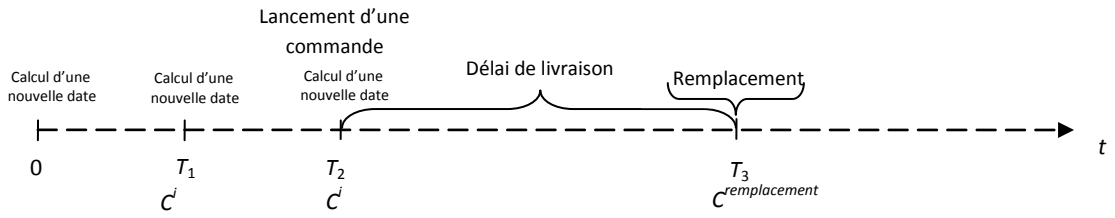


Figure 4:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée

4.3 Modèle mathématique

Rappelons que l'objectif de ce chapitre est l'optimisation intégrée de la politique de maintenance conditionnelle adoptée (seuils d_s et d_r, plan d'inspection) et le plan d'acquisition des pièces de rechange utilisées pour le remplacement. Ce plan est déterminé par le choix du mode de commande (une pièce neuve ou remanufacturée) et le niveau de remanufacturation sous contrainte de disponibilité des pièces dans le stock $S2$.
Il s'agit de déterminer l'ensemble des couples $\{(i,l)_k/k=1…CN,\ i\in\{0,…,3\}$ et $l\in\{0,…,3\}\}$, les seuils d_s et d_r et les dates d'inspection T_i. Précisons que l'ensemble des couples $(i,l)_k$ est défini par : la quali-

té de pièce de rechange qui sera installée dans la machine lors du remplacement et la pièce choisie du stock *S*2 (dans le cas d'une pièce remanufacturée).

Le critère de l'optimisation consiste à minimiser le coût total engendré par les différentes actions réalisées.

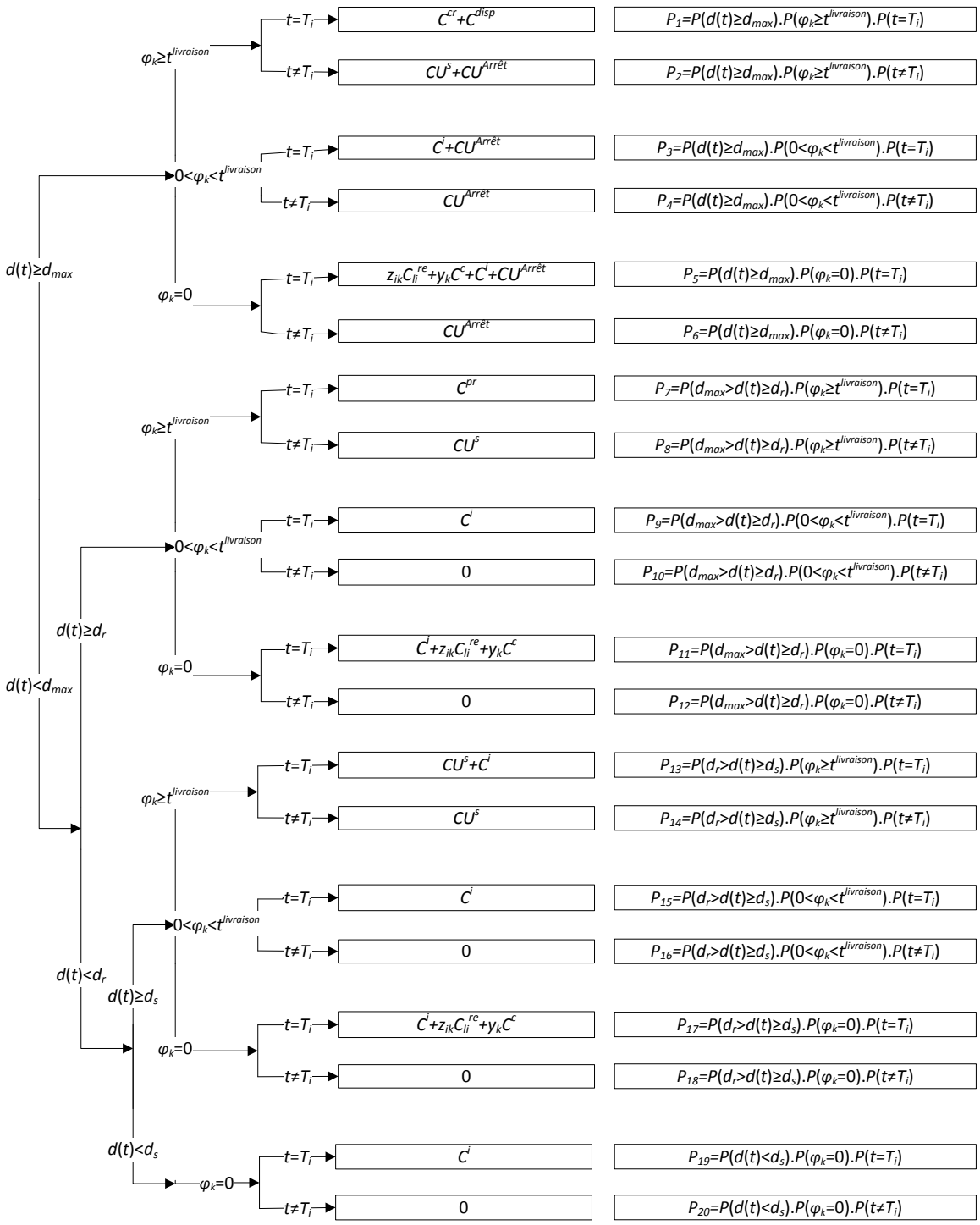


Figure 4:3 Arbre de probabilité associé.

Avec :

C^{disp}: Coût de destruction d'une pièce de qualité *n*;

C_{li}^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce de qualité *l*, afin d'obtenir une pièce de rechange de qualité *i* ;

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; remanufacturée \; de \; qualité \; i \; est \; placée \; dans \; la \; machine \\ \qquad au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; neuve \; est \; commandée \; durant \; le \; cycle \; k-1 \; pour \; etre \; palcée \; dans \\ \qquad la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$x_{lk} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; de \; qualité \; l \; est \; prise \; du \; stock \; S2 \; pour \; être \; remanufacturée \; durant \\ \qquad le \; cycle \; k-1 \; pour \; être \; placée \; dans \; la \; machine \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$s_{hk} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; de \; qualité \; h \; est \; récupérée \; de \; la \; machine \; à \; la \; fin \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$i \in \{1, \dots, n-1\}, l \in \{1, \dots, n-1\}, h \in \{1, \dots, n\}, k \in \{1, \dots, CN\}$

En se basant sur l'arbre de probabilité associé au problème étudié (figure 4:3), la fonction de coût associée à l'instant *t*, s'écrit comme suit :

$$CT_t = \begin{pmatrix} P_1\left(C^{cr} + C^{disp}\right) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) + P_3\left(C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_4\left(CU^{Arrêt}\right) + P_5\left(y_k C^{or} + z_{ik} C_{li}^{re} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7(C^{pr}) + P_8(CU^s) + P_9\left(C^i\right) \\ +P_{11}\left(C^i + y_k C^{or} + z_{ik} C_{li}^{re}\right) + P_{13}\left(CU^s + C^i\right) \\ +P_{14}(CU^s) + P_{17}\left(C^i + y_k C^{or} + z_{ik} C_{li}^{re}\right) + P_{19}\left(C^i\right) \end{pmatrix}$$

Donc :

$$CT_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + C^{disp}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_3 + P_5 + P_9 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (y_k C^{or} + z_{ik} C_{li}^{re})(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

La fonction coût associée au cycle *k* est :

$$CT_k = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif est :

$$\boldsymbol{Min \; f = \sum_{k=1}^{CN} CT_k} \qquad \textbf{(4:2)}$$

CN: Nombre de cycles durant la mission T_{miss}.

D_{ik}: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité *i* durant le cycle *k*, jusqu'à son remplacement.

Sous les contraires suivants :

$$\sum_{i=1}^{n-1} z_{ik} + y_k = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} x_{lk} + y_k = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} P_7 . s_{lk} + P_1 . s_{nk} = 1 \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} l x_{lk} \geq \sum_{l=1}^{3} i z_{ik} \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN$$

$$\sum_{k=1}^{CN} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) \geq T_{miss}$$

$$\sum_{k=1}^{CN-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) < T_{miss}$$

Avec :

$$Q_{lk} \geq x_{lk} \quad ; \forall\, k = 1 \dots CN \quad ; \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$$

$$Q_{lk} = Q_{lk-1} + s_{lk-1} - x_{lk+1}$$

$$\forall\, k = 1 \dots CN \,; \quad \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$$

Q_{lk} : Le nombre de pièce de qualité *j* disponible dans le stock *S*2 au début du cycle *k*.

4.4 Approche proposée

Il est nécessaire de mentionner que les décisions relatives à ce système sont prises en temps réel et dans un contexte aléatoire, ce qui rend l'utilisation d'une méthode de résolution exacte très difficile, vu la nature du problème qui peut être classé comme étant un problème NP-difficile. Pour cette raison, nous avons adopté une heuristique basée sur un algorithme glouton constructif qui repose sur deux étapes : La première étape sert à résoudre le problème sous sa forme déterministe d'un point de vu dégradation (statique). La deuxième étape utilise les résultats trouvés lors de l'étape 1 pour résoudre le problème sous sa forme aléatoire d'un point de vu dégradation (étape 2 : dynamique). Rappelons qu'un algorithme glouton repose sur une heuristique locale utilisée pour sélectionner des éléments ajoutés à l'ensemble constituant la solution. Pour cela, nous avons proposé deux heuristiques locales possibles (Heuristique 2 et Heuristique 3), dont nous cherchons à déterminer l'efficacité.

- L'heuristique gloutonne (Heuristique 1) est la procédure principale pour trouver la solution. Cette heuristique nécessite deux étapes :

- Etape 1 : Elle consiste à évaluer et à classifier toutes les successions possibles de pièces de rechange et à déterminer les meilleurs seuils (d_s, d_r) de chaque succession. Cette étape est effectuée hors ligne, avant le début de la mission. Les résultats sont basés sur trois scéna-

rios déterministes (statiques) de dégradation: Meilleur scénario dégradation, Scénario de dégradation moyenne et le pire scénario dégradation.

- Etape 2 : Cette étape est réalisée durant la construction de la solution du problème dynamique. Il s'agit de sélectionner à l'aide des heuristiques locales (Heuristique 2 ou Heuristique 3) les seuils (d_s, d_r) et la pièce de rechange utilisée pour le remplacement, et de mettre à jour les résultats obtenus par l'étape 1. Cette mise à jour est réalisée durant les inspections qui sont effectuées avant que la commande soit passée.

- La seconde heuristique (Heuristique 2) : dans cette heuristique, le choix des seuils (d_s, d_r) et de la pièce de rechange se base sur la minimisation du coût total seulement, en prenant le scénario qui donne le coût total minimum parmi ceux donnés par les trois scénarios, à savoir le meilleur scénario de dégradation, le scénario de dégradation moyenne et le pire scénario de dégradation.

- La troisième heuristique (Heuristique 3) : dans cette heuristique, le choix des seuils (d_s, d_r) et de la pièce de rechange se base sur une valeur limite acceptable fixée par le décideur. Cette valeur limite correspond à la différence entre le profit maximum possible et la perte maximale possible.

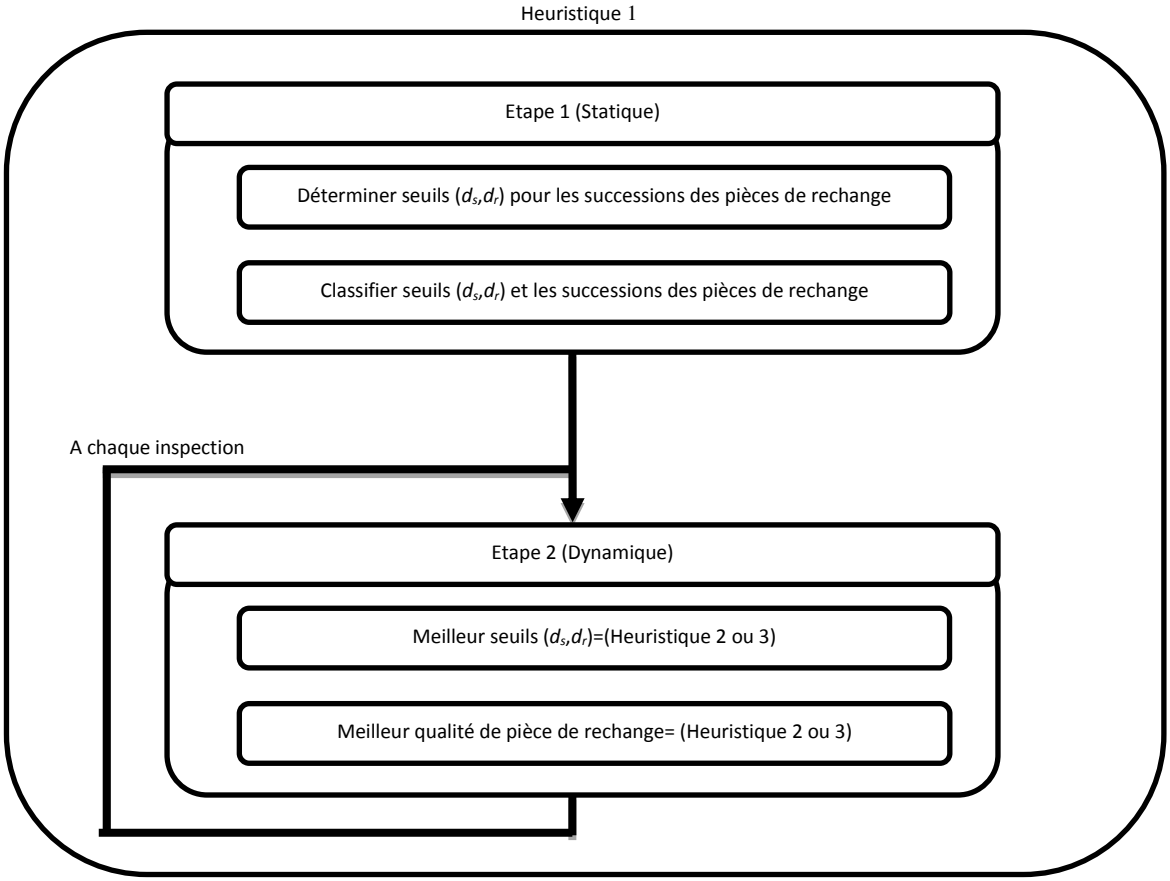


Figure 4:4 L'approche proposée.

Les heuristiques sont présentées comme suit:

Heuristique 1:

Etape 1 (évaluer et classifier les successions de pièce de rechange, et déterminer les seuils (d_s,d_r)) : (statique)

Entrées : qualités des pièces de rechange;

Sorties : coût des successions (i,(k,j)), classer les successions (i,(k,j)) selon i, les meilleurs seuils (d_s,d_r) associé aux successions (i,(k,j));

%% i est la qualité de pièce de rechange installé dans la machine
%% k est la qualité de pièce apte à être prise du stock $S2$
%% j est la qualité de pièce de rechange apte à être utilisée pour le remplacement

Pour les trois scénarios de dégradation (*cas moyen*, *pire cas*, *meilleur cas*):
    Pour toutes qualité de pièce de rechange $i \in \{0, 1,..., n\text{-}1\}$ installé dans la machine:
        Pour toutes qualité de pièce de rechange $j \in \{0, 1,..., n\text{-}1\}$ apte à être utilisée pour le remplacement (avec ou sans remanufacturation):
            Pour toutes qualité de pièce de rechange $k \in \{0, 1,...,n\text{-}1\}$ apte à être prise du stock $S2$:
                Calculer coût total de la succession (i,(k,j)) et déterminer les seuils (d_s,d_r) associés;
            Fin Pour
        Fin Pour
    Fin Pour
    classer les successions (i,(k,j)) selon l'ordre croissant du coût total;
Fin Pour

Etape 2 (construction procédure of the solution) : (dynamique)

Entrées : coût des successions (i,(k,j)), les successions (i,(k,j)) ordonnés selon i, les meilleurs seuils (d_s,d_r) associés aux successions (i,(k,j));

Sorties : S_{Real}, C_{Real};

%% S_{Real} La serie des successions (i,(k,j)) qui représente les pièces de rechange utilisées pour les remplacement.
%% C_{Real} Le coût total

$sp_{Installed}=m$; %% La qualité de la pièce de rechange installée dans la machine.

$S_{Real}=[m]$;

Tant que $T_{miss} \leq 0$:
    [(m,(k_{Best},j_{Best})),(d_s^{Best},d_r^{Best})] est succession et les seuils qui minimisent la fonction objectif, selon le meilleur scénario de dégradation.
    [(m,($k_{Average}$,$j_{Average}$)),($d_s^{Average}$,$d_r^{Average}$)] est succession et les seuils qui minimisent la fonction objectif, selon le scénario moyen de dégradation.
    [(m,(k_{Worst},j_{Worst})),(d_s^{Worst},d_r^{Worst})] est succession et les seuils qui minimisent la fonction objectif, selon le pire scénario de dégradation.

    (d_s,d_r)=Heuristique 2 (…) ou Heuristique 3 (…)

    t=0;
    remplacement=0;
    $d(t)=L_m$;

    Tant que *remplacement*==0:
        $t=t+1$;
        Si ($d(t)<d_s$**)**

Si (t==T^j)
Mettre à jour l'ordre des successions (Etape 1):
$(m,(k_{Best},j_{Best})),(m,(k_{Average},j_{Average})),(m,(k_{Worst},j_{Worst}))$;
Fin Si
Sinon
Si ($d(t)\geq d_s$ et t==T^j)
(k,j)=Heuristique 2 (…) or Heuristique 3 (…)
S_{Real}=[m,j];
Sinon
Si ($d(t)\geq d_r$ et (pièce de rechange j est délivré) et t==T^j)
La pièce de qualité m est remplacée par la pièce de qualité j;
remplacement= *remplacement* +1;
Fin Si

$sp_{Installed}$=j;
T_{miss}=T_{miss}-$D_{scenario}(m,j)$; %% $D_{scenario}(m,j)$ est le temps que la pièce de rechange de qualité m passera dans la machine quand elle est remplacée par une pièce de qualité j.

Fin Tant que
Fin Tant que

Heuristique 3:

Entrées : $([(m,(k_{Best},j_{Best})),(d_s^{Best},d_r^{Best})],[(m,(k_{Average},j_{Average})),(d_s^{Average},d_r^{Average})],[(m,(k_{Worst},j_{Worst})),(d_s^{Worst},d_r^{Worst})]$ ou $[(m,(k_{Best},j_{Best})),(d_s,d_r)]$, $[(m,(k_{Average},j_{Average})),(d_s,d_r)]$, $[(m,(k_{Worst},j_{Worst})),(d_s,d_r)])$;

Sorties : (d_s,d_r) ou (k,j);

Construire la matrice M=$\begin{bmatrix} CT_{BB} & CT_{AB} & CT_{WB} \\ CT_{BA} & CT_{AA} & CT_{WA} \\ CT_{BW} & CT_{AW} & CT_{WW} \end{bmatrix}$

Si le but est de déterminer les meilleurs seuils (d_s,d_r):
$M_{scénario1,scénario2}$: le coût dû à l'utilisation du seuil proposé par le scénario1 sur le scénario2 de dégradation.
Si le but est de déterminer le couple (k,j) (qualité prise du stock S2 et qualité mise dans la machine):
$M_{scénario1,scénario2}$: le coût dû à l'utilisation de la pièce de rechange proposée par le scénario1 sur le scénario2 de dégradation.

Trouver le minimum du minimum et le minimum du maximum de chaque ligne de la matrice *M*.

Si la ligne du minimum du minimum et ligne du minimum du maximum est la même, nous prenons le choix donné par le scénario correspondant à cette ligne.
Sinon nous comparons la *Limite_Acceptable* **fixée par le décideur à la différence entre le** *Profit* **et** *Perte*
Si *Limite_Acceptable* ≤ *Profit-Perte*
Nous prenons le choix donné par le scénario qui correspond à la ligne du minimum du minimum.
Si *Limite_Acceptable* > *Profit-Perte*
Nous prenons le choix donné par le scénario qui correspond à la ligne du minimum du maximum.

Nous présentons un exemple illustratif pour mieux comprendre les règles mises en œuvre dans les heuristiques proposées.

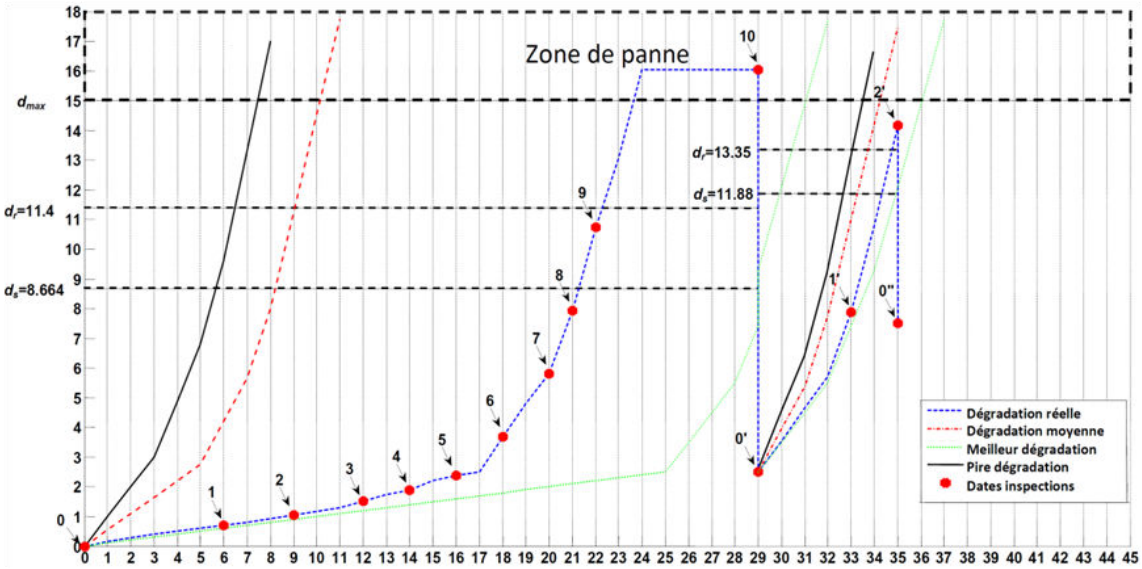


Figure 4:5 Exemple illustratif de l'application de l'heuristique constructive.

La figure 4:5 représente une partie de l'horizon d'exploitation de la machine. La dégradation réelle présentée en bleu est déterminée par une inspection parfaite, dont les dates sont représentées par des points rouges. Au point 0 (le premier point rouge), nous faisons appel à l'une des heuristiques locales (Heuristique 2 ou Heuristique 3) pour la sélection des seuils (d_s,d_r) et la présélection de la pièce de rechange utilisée pour le remplacement. Pour cet exemple, les seuils sélectionnées sont d_s = 8.664, d_r = 11.4. Aux dates d'inspections 1-8 des mises à jour de la pièce de rechange sélectionnée sont réalisées, en fonction du niveau de dégradation observé et les trois scénarios de dégradation (pire dégradation, dégradation moyenne et la meilleure dégradation). A la date d'inspection 9 le niveau de dégradation observé dépasse le seuil d_s, par conséquence, une commande pièce de rechange de l'atelier de remanufacturation est passée. Les dates d'inspection sont calculées à l'aide de l'heuristique proposée dans la section 2:3, ainsi, la date d'inspection 10 est planifiée à l'arrivée de la pièce de rechange remanufacturée. Après le remplacement, de nouveaux seuils (d_s,d_r) sont sélectionnés au point 0' (d_s = 11.88, d_r = 18.35). A la date d'inspection 2' la dégradation observée dépasse le seuil d_r, par conséquence, une commande pièce de rechange de l'atelier de remanufacturation est passée, mais avec un niveau zéro de remanufacturation (réutilisation directe). La pièce de rechange est ainsi envoyée immédiatement vers le stock $S1$, pour être installée dans la machine.

4.5 Expériences numériques et analyse

Dans cette section, nous proposons une heuristique basée sur un algorithme glouton pour la construction en temps réel de la solution du problème étudié. Pour valider l'efficacité des heuristiques locales proposées plusieurs exemples numériques sont réalisés. Nous avons vu dans la section précédente que les heuristiques proposées sont basées sur trois scénarios de dégradation (pire dégradation, dégradation moyenne et la meilleure dégradation) pour la sélection des éléments qui constituent la solution. Ainsi, nous comparons les résultats obtenus par l'application de l'Heuristique 2 ou l'Heuristique 3 comme heuristique locale. Notre plan de comparaison consiste à faire varier les bornes des variables aléatoires a_i, et d'étudier la variation de la qualité per-

çue sur les solutions obtenues. Pour chaque ensemble de données, nous appliquons les deux heuristiques au même cas de dégradation réelle. Pour générer la dégradation réelle, nous avons développé un module de simulation basée sur le modèle présenté dans la section 1.5.6. Les bornes des variables aléatoires a_i utilisées sont présentées dans le Tableau 4:1.

Le reste des données numériques utilisées sont comme suit :

Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5), dont une qualité neuve, une qualité destinée à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux de dégradation initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5. Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=200 *um*. Le coût unitaire d'inspection C^i=40 *um*, le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*, le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=500 *um*, le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S1$ est CU^s=3 *um/pièce/ut*, le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*, le coût destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um.* Les états des stocks $S2$ au début de la mission t=0 sont présentés dans table 4:2.

	a^{min}_0	a^{max}_0	a^{min}_1	a^{max}_1	a^{min}_2	a^{max}_2	a^{min}_3	a^{max}_3
Cas 1	0.1	1	1	1.9	1.9	2.8	2.8	3.7
Cas 2	0.1	10	10	19.9	19.9	29.8	29.8	39.7
Cas 3	0.1	1	1	4.9	4.9	11.8	11.8	21.7
Cas 4	0.1	10	1	19	1.9	28	2.8	37
Cas 5	0.1	1	0.5	5	0.9	9	1.3	13

Tableau 4:1 Les borne des variables a_i.

	Qualité 1	**Qualité 2**	**Qualité 3**
S2	0	1	2

Tableau 4:2 L'état initial du stock *S2*.

Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 4:2 :

	3->2	**3->1**	**2->1**
Coût de remanufacturation	8	10	7
Temps de remanufacturation	2	7	3

Tableau 4:3 Les temps et les coûts de remanufacturation.

Notations :

- Méthode 1: Heuristique 3 pour le choix de la pièce de rechange et Heuristique 3 pour le choix des seuils (d_s,d_r).
- Méthode 2: Heuristique 3 pour le choix de la pièce de rechange et Heuristique 2 pour le choix des seuils (d_s,d_r).
- Méthode 3: Heuristique 2 pour le choix de la pièce de rechange et Heuristique 3 pour le choix des seuils (d_s,d_r).

- Méthode 4: Heuristique 2 pour le choix de la pièce de rechange et Heuristique 2 pour le choix des seuils (d_s,d_r).

Les résultats expérimentaux sont divisés en deux parties. La première partie est présentée par les figures (4:6-4:15) et la deuxième partie par le tableau 4:3. Les figures représentent la variation du coût total en utilisant les heuristiques proposées. Nous comparons l'efficacité des quatre méthodes en les appliquant à dix scénarios de dégradation prédéterminés, avec deux variantes pour les méthodes 1, 2 et 3, où la limite acceptable fixée par le décideur varie entre 0 et 10 unités monétaires. Les scénarios ont été générés d'une manière aléatoire à l'aide d'un outil de simulation mis au point pour cette étude. Le cas i, (i= 1, ..., 5) correspond aux cas de bornes de a_i présentés dans le tableau 4:1.

Les résultats représentés par les figures (4:6-4:15) montrent que l'utilisation de trois heuristiques permet une amélioration de la qualité de la solution. Cependant, la méthode 4, qui est principalement basée sur l'Heuristique 2 donne des résultats que nous considérons comme acceptable. L'efficacité des méthodes varie en fonction de la variation des limites de la variable aléatoire a_i. Par exemple, nous pouvons observer dans les figures 4:6 et 4:7 que la méthode 3 est la plus efficace pour le cas 1, donc nous utilisons l'heuristique 2 pour le choix de la pièce de rechange et l'heuristique 3 pour le choix des seuils (d_s, d_r). Nous pouvons également observer sur les figures 4:8 et 4:9 l'efficacité des méthodes 1 et 2 dans les cas 2 et 4. Toutefois, pour le cas 3 et 5, l'efficacité des méthodes reste difficile à observer.

Pour la deuxième partie des résultats expérimentaux présentés dans le tableau 4:3, nous avons appliqué les quatre méthodes avec deux variantes 1, 2 et 3, telle que la limite acceptable fixée par le décideur varie entre 0 à 10 unités monétaires. Pour cette partie, les méthodes sont appliquées à cinquante scénarios différents pour chaque cas de a_i. Ainsi, les valeurs détaillées dans le tableau suivant représentent le coût moyen des cinquante scénarios de chaque cas i.

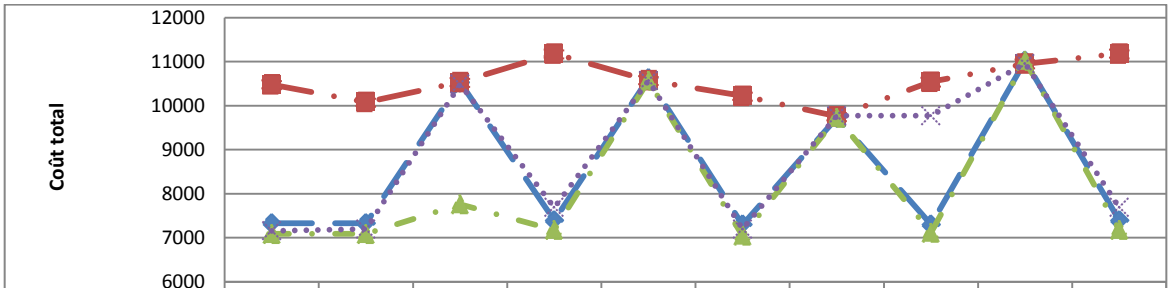
	Cas 1	**Cas 2**	**Cas 3**	**Cas 4**	**Cas 5**
Méthode 1(0)	8315.5	13827	10189.44	12510.4	10735.96
Méthode 2 (0)	10584.12	13801.8	10490.14	12548.4	10731.3
Méthode 3 (0)	7918.74	13863.6	10017.7	13712.8	10771.56
Méthode 4	8589.88	13989.4	10121.64	13686.86	10722.4
Méthode 1 (10)	8235.64	13750	9823.04	12577.2	10828.76
Méthode 2 (10)	10670.56	13774	9934.94	12597.2	10788.72
Méthode 3 (10)	7724.3	13938	10062.72	13728.86	10781.66

Tableau 4:4 Les coûts moyens en appliquant les méthodes sur cinquante scénarios de dégradation réelle.

Les résultats du tableau 4:4 confirment les observations faites à partir des résultats de la première partie. La méthode 3 du cas 1 est la plus efficace avec un gain compris entre 5% et 38%. Pour le cas 4, l'utilisation des méthodes 1 ou 2 fournit un gain qui peut atteindre 10%. En plus, les deux parties des résultats expérimentaux montrent l'efficacité et la bonne stabilité de la méthode 1. Cela reste valable pour l'ensemble des cas possibles des bornes et pour les deux variantes (limite

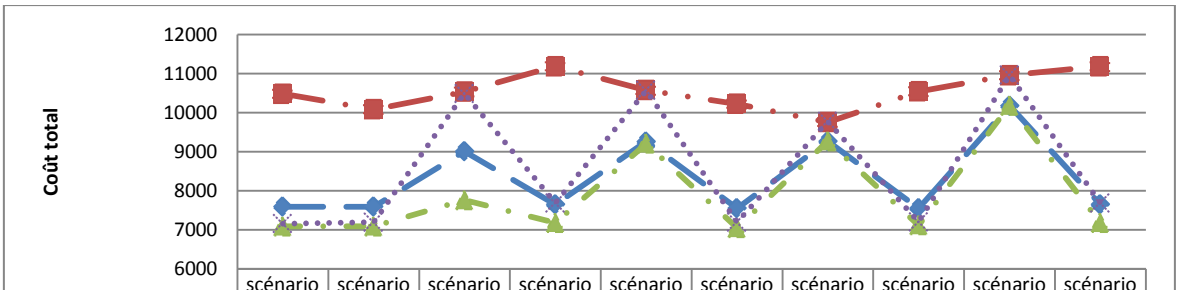
acceptable est égale à 0 ou 10). Ainsi, l'heuristique 3 fournie clairement une bonne amélioration de la qualité de la solution.

Cas 1 :



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	7326	7326	10527	7392	10618	7294	9727	7296	11017	7392
Méthode 2	10481	10081	10533	11183	10573	10221	9756	10541	10953	11183
Méthode 3	7087	7087	7758	7177	10567	7047	9727	7115	11017	7177
Méthode 4	7155	7195	10486	7685	10566	7195	9769	9769	10957	7685

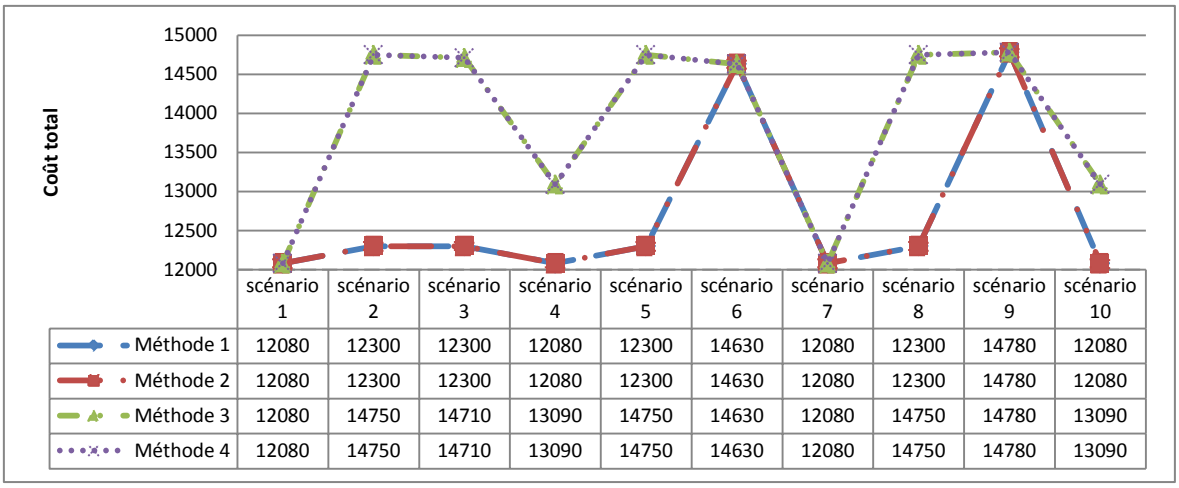
Figure 4:6 Le changement du coût total pour le cas 1 et une limite acceptable égale à 0.



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	7590	7590	9007	7648	9258	7550	9267	7552	10177	7648
Méthode 2	10481	10081	10533	11183	10573	10221	9756	10541	10953	11183
Méthode 3	7087	7087	7758	7177	9207	7047	9267	7115	10177	7177
Méthode 4	7155	7195	10486	7685	10566	7195	9769	7203	10957	7685

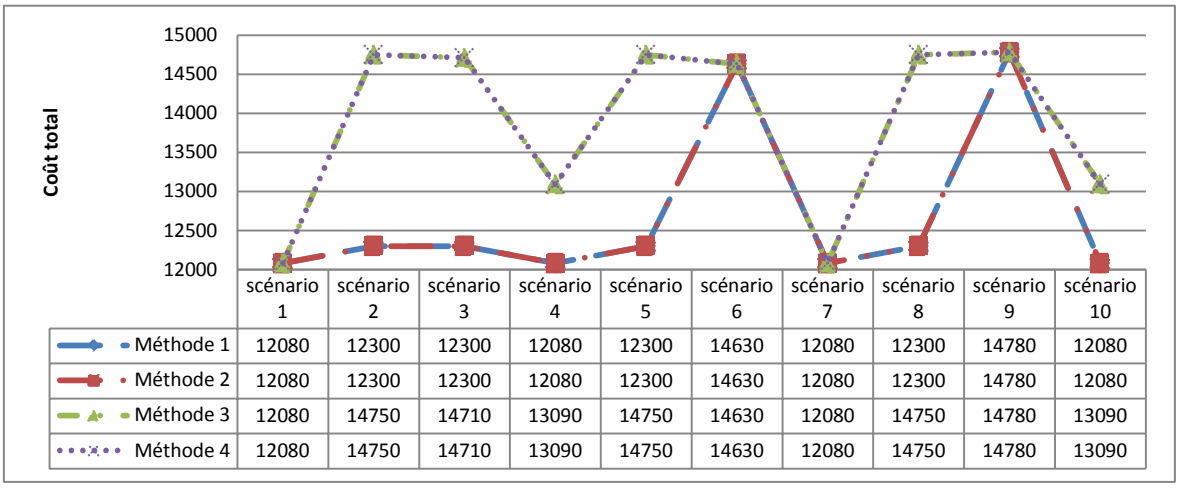
Figure 4:7 Le changement du coût total pour le cas 1 et une limite acceptable égale à 10.

Cas 2:



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	12080	12300	12300	12080	12300	14630	12080	12300	14780	12080
Méthode 2	12080	12300	12300	12080	12300	14630	12080	12300	14780	12080
Méthode 3	12080	14750	14710	13090	14750	14630	12080	14750	14780	13090
Méthode 4	12080	14750	14710	13090	14750	14630	12080	14750	14780	13090

Figure 4:8 Le changement du coût total pour le cas 2 et une limite acceptable égale à 0.



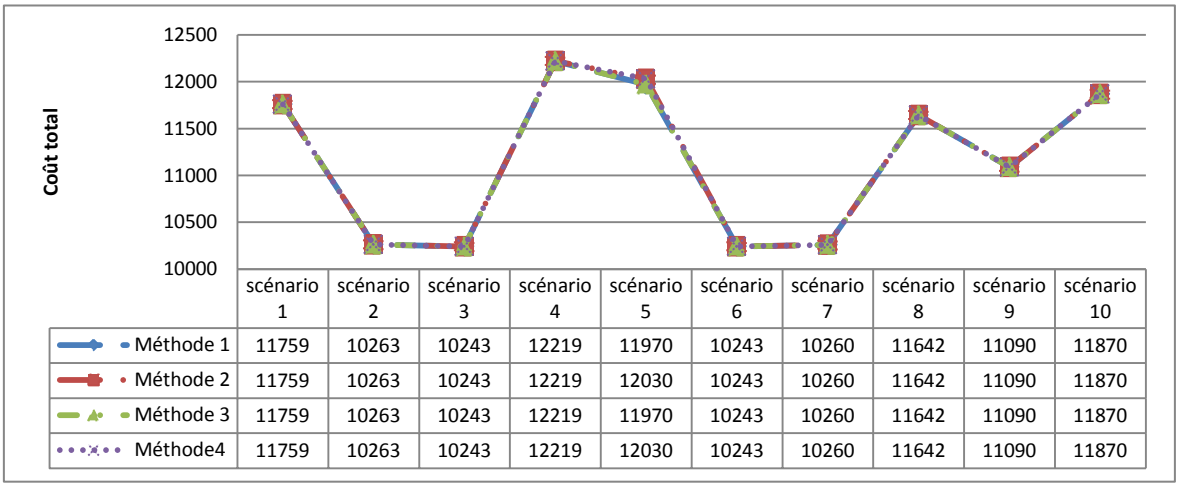
	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	12080	12300	12300	12080	12300	14630	12080	12300	14780	12080
Méthode 2	12080	12300	12300	12080	12300	14630	12080	12300	14780	12080
Méthode 3	12080	14750	14710	13090	14750	14630	12080	14750	14780	13090
Méthode 4	12080	14750	14710	13090	14750	14630	12080	14750	14780	13090

Figure 4:9 Le changement du coût total pour le cas 2 et une limite acceptable égale à 10.

Cas 3:

	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	11759	10263	10243	12219	11970	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode 2	11759	10263	10243	12219	12030	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode 3	11759	10263	10243	12219	11970	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode 4	11759	10263	10243	12219	12030	10243	10260	11642	11090	11870

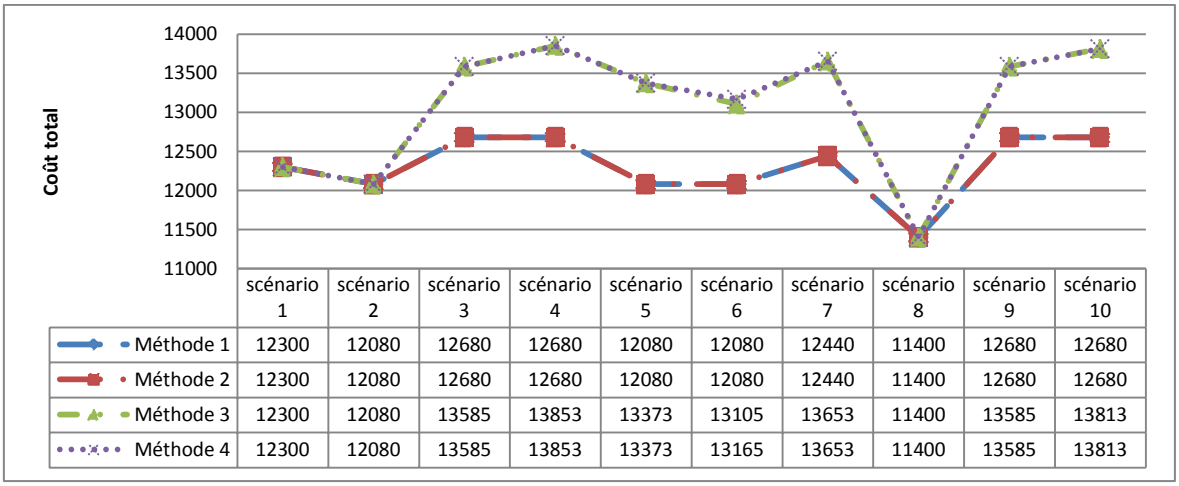
Figure 4:10 Le changement du coût total pour le cas 3 et une limite acceptable égale à 0.



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	11759	10263	10243	12219	11970	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode 2	11759	10263	10243	12219	12030	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode 3	11759	10263	10243	12219	11970	10243	10260	11642	11090	11870
Méthode4	11759	10263	10243	12219	12030	10243	10260	11642	11090	11870

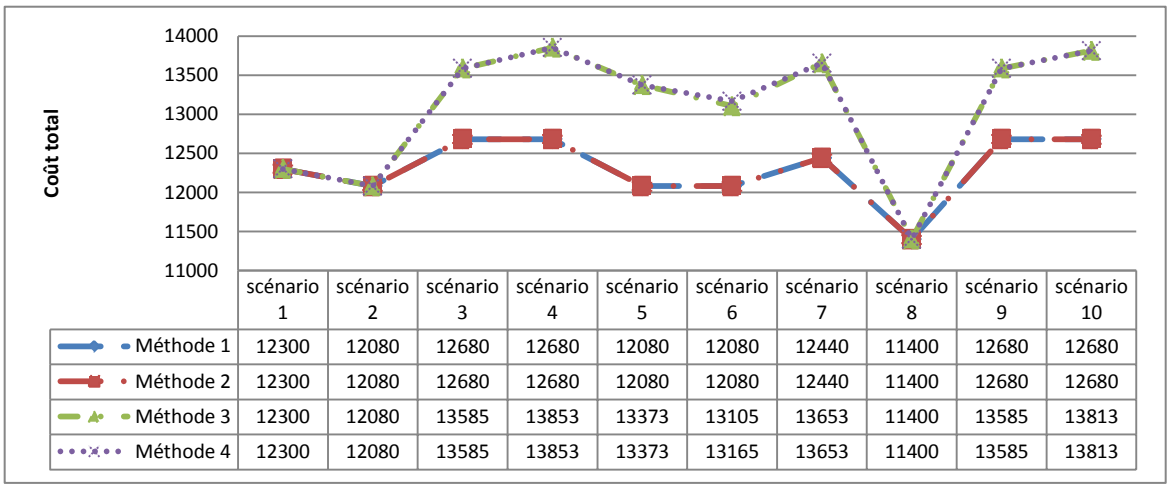
Figure 4:11 Le changement du coût total pour le cas 3 et une limite acceptable égale à 10.

Cas 4:



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	12300	12080	12680	12680	12080	12080	12440	11400	12680	12680
Méthode 2	12300	12080	12680	12680	12080	12080	12440	11400	12680	12680
Méthode 3	12300	12080	13585	13853	13373	13105	13653	11400	13585	13813
Méthode 4	12300	12080	13585	13853	13373	13165	13653	11400	13585	13813

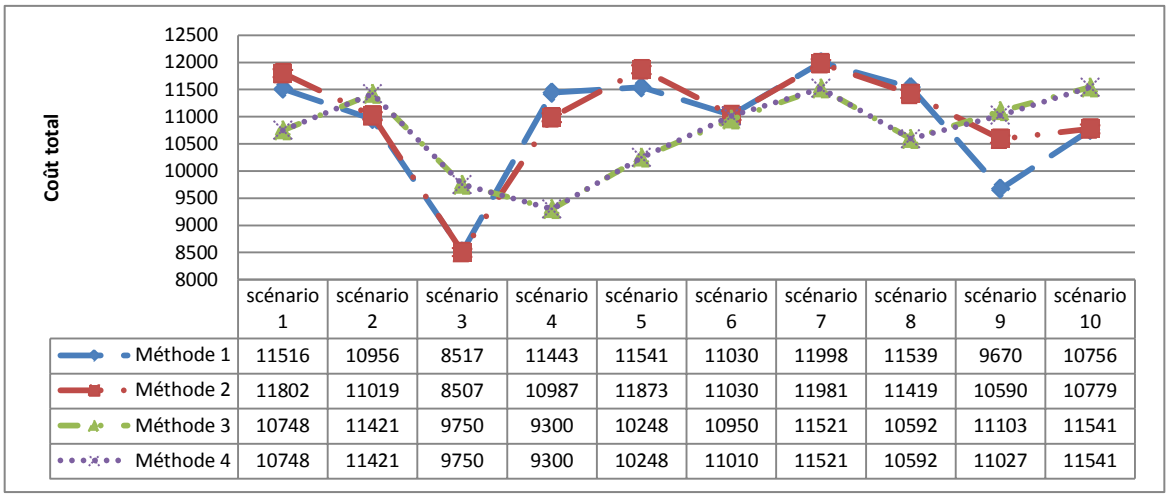
Figure 4:12 Le changement du coût total pour le cas 4 et une limite acceptable égale à 0.



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	12300	12080	12680	12680	12080	12080	12440	11400	12680	12680
Méthode 2	12300	12080	12680	12680	12080	12080	12440	11400	12680	12680
Méthode 3	12300	12080	13585	13853	13373	13105	13653	11400	13585	13813
Méthode 4	12300	12080	13585	13853	13373	13165	13653	11400	13585	13813

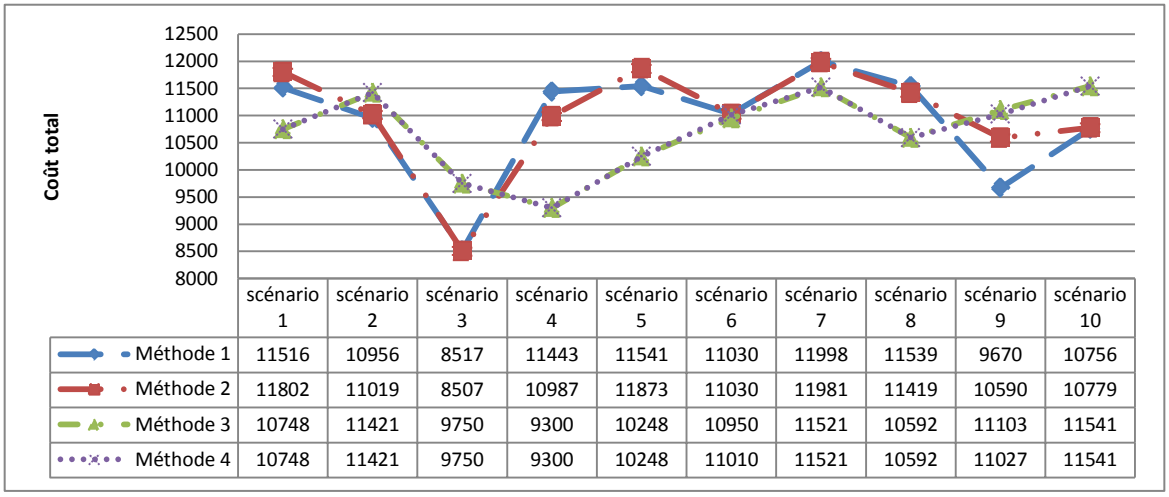
Figure 4:13 Le changement du coût total pour le cas 4 et une limite acceptable égale à 10.

Cas 5:



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	11516	10956	8517	11443	11541	11030	11998	11539	9670	10756
Méthode 2	11802	11019	8507	10987	11873	11030	11981	11419	10590	10779
Méthode 3	10748	11421	9750	9300	10248	10950	11521	10592	11103	11541
Méthode 4	10748	11421	9750	9300	10248	11010	11521	10592	11027	11541

Figure 4:14 Le changement du coût total pour le cas 5 et une limite acceptable égale à 0.



	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	scénario 5	scénario 6	scénario 7	scénario 8	scénario 9	scénario 10
Méthode 1	11516	10956	8517	11443	11541	11030	11998	11539	9670	10756
Méthode 2	11802	11019	8507	10987	11873	11030	11981	11419	10590	10779
Méthode 3	10748	11421	9750	9300	10248	10950	11521	10592	11103	11541
Méthode 4	10748	11421	9750	9300	10248	11010	11521	10592	11027	11541

Figure 4:15 Le changement du coût total pour le cas 5 et une limite acceptable égale à 10.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé une nouvelle partie dans le problème intégrant la chaîne logistique et la maintenance. Le système étudié est composé d'une seule machine soumise à une dégradation stochastique. Pour la maintenance de la machine, nous avons adopté une politique de remplacement conditionnelle, basée sur une chaîne logistique en boucle fermée pour l'approvisionnement en pièce de rechange. Nous avons proposé une approche composée de deux parties pour résoudre le problème de prise de décision dynamique (en temps réel) qui vise à déterminer les paramètres de la maintenance conditionnelle (les seuils d_s et d_r) et ceux de la séquence de qualité des pièces de rechange à installer dans la machine lors des remplacements. La première partie de l'approche est exécutée en statique (avant la mise en marche de la machine). La deuxième partie est exécutée en temps réel lorsque la machine est en marche en se basant sur les résultats de la première partie. Cette deuxième partie de l'approche a été proposée en deux versions pour le choix des seuils et des pièces de rechange utilisées aux remplacements (avec ou

sans remanufacturation). Une comparaison entre les heuristiques (Heuristique 2 et Heuristique 3) a été réalisée sur la base du choix de la pièce de rechange et le choix des seuils de décision (d_s,d_r). Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de l'Heuristique 3 donne les meilleurs résultats.

Une extension de ce travail est détaillée dans le chapitre suivant, dans laquelle, deux nouvelles contraintes supplémentaires sont intégrées : la gestion de production et le contrôle de qualité.

Chapitre 5 Optimisation intégrée de la politique de maintenance et la politique d'acquisition des pièces de rechange avec une dépendance entre la cadence de production et la dégradation, sous contrainte de demande

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé la problématique d'intégration de la gestion des pièces de rechange par une chaîne logistique en boucle fermée dans un contexte de maintenance conditionnelle d'un système de production à une seule machine. Nous avons proposé une optimisation conjointe des paramètres de la politique de maintenance et ceux de la gestion d'acquisition des pièces de rechange utilisées lors des remplacements.

Dans le présent chapitre, nous présentons une extension du chapitre précédent en intégrant la production et le contrôle de qualité. Ainsi, le système étudié vise à satisfaire une demande fixe livrée en fin de mission. En conséquence, le but du chapitre est d'optimiser simultanément : (i) les paramètres de la politique de maintenance, à savoir, le plan d'inspection et les seuils décisionnels qui permettent de gérer les actions de maintenance ; (ii) La gestion d'acquisition des pièces de rechange utilisées lors des remplacements, sur la base d'une chaîne logistique en boucle fermée ; et (iii) la gestion de la production sous contrainte de qualité.

Le reste du chapitre est organisé comme suit : dans la section 5.2, nous décrivons les hypothèses liées au système étudié. La section 5.3 décrit le modèle mathématique proposé, dans lequel nous utilisons l'arbre de probabilité pour déterminer la fonction coût. La section 5.4 est consacrée à la présentation de l'approche proposée. Ensuite, nous présentons des résultats illustratifs dans la section 5.5. Nous terminons le chapitre par la section 5.6, où nous présentons quelques conclusions

5.2 Description du problème

Dans ce chapitre nous étudions un système de production composé d'une seule machine produisant un seul type de produit. La machine est sujette des défaillances causées par une dégradation stochastique monotone. Afin de satisfaire une demande constante D_{miss} sur un horizon fini T_{miss} la machine doit fonctionner avec une cadence de production qui dépend de la longueur de la mission, la disponibilité de la machine et de la quantité demandée. Cependant, la variation du taux de production affecte le mode de dégradation de la machine : une cadence de production élevée implique une dégradation rapide et une faible cadence de production implique une dégradation plus lente. En plus, la dégradation affecte directement la qualité de la production : un niveau de dégradation élevé implique un taux de rejet plus élevé des articles produits.
Le phénomène de dégradation nécessite la mise en place d'une politique de maintenance, qui consiste à remplacer le composant (pièce) principal de la machine. Les pièces récupérées de la machine au moment du remplacement sont placées dans le stock S2 pour une réutilisation ultérieure ou envoyées en destruction. La pièce de rechange utilisée lors chaque remplacement provient d'un stock S1 alimenté par un fournisseur de pièces neuves ou par l'atelier de remanufacturation.
Lorsque les articles produits sont valides (de bonne qualité) ils seront stockés dans un stock intermédiaire $S3$ jusqu'à la fin de la mission. La figure 5:1 illustre les caractéristiques du système objet de cette étude.

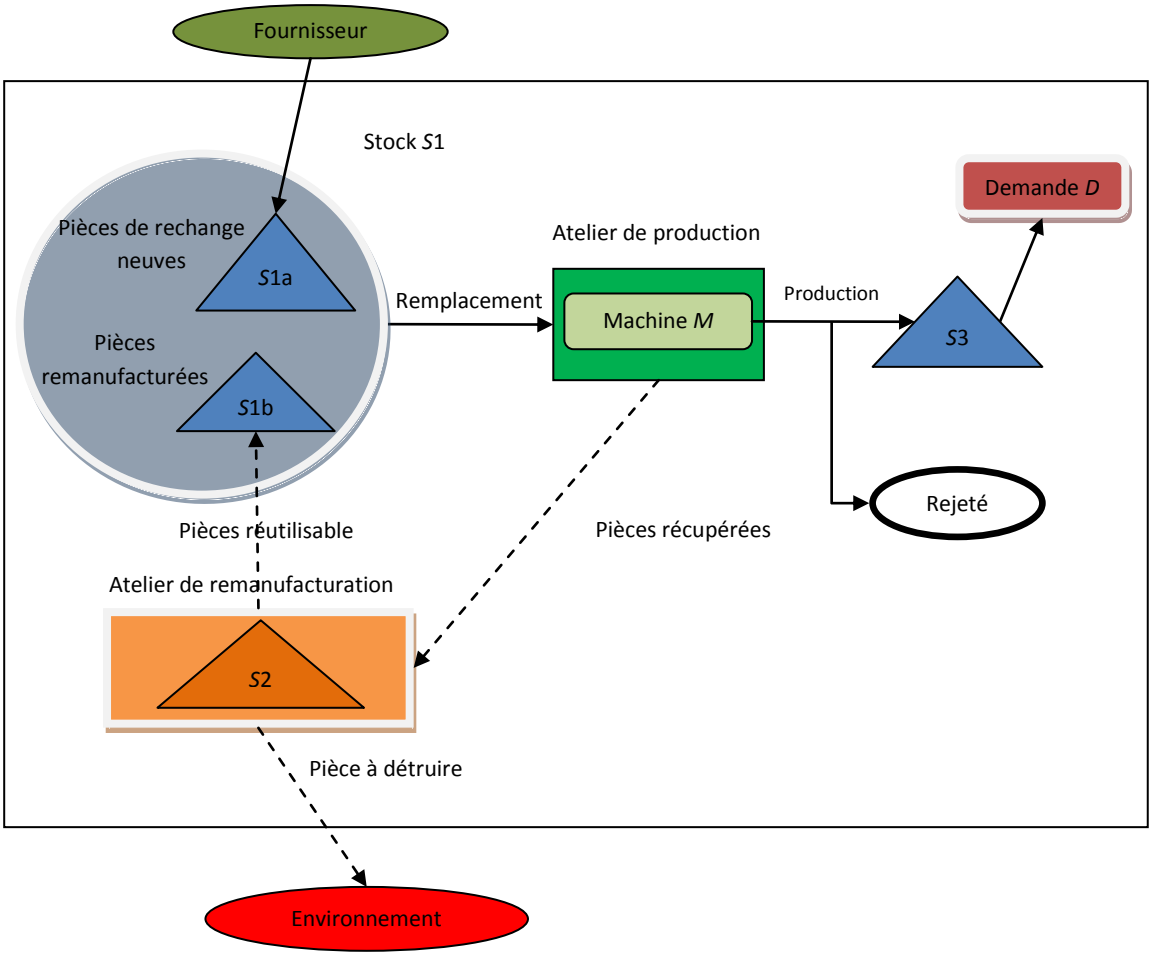


Figure 5:1 Le système étudié

La dégradation $d(t)$ de la machine est monotone croissante, et elle a pour incrément a_i dépend de la qualité de pièce de rechange. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d(t)=d(t-1)+ a_i \qquad (5:1)$$

a_i est une variable aléatoire uniforme qui dépend de la qualité i de la pièce de rechange installée ($i = 0...n$), $a^{min}_i \leq a_i \leq a^{max}_i$ et $0< a^{max}_i \leq a^{min}_{i+1}$.

Comme nous l'avons mentionné, la dégradation est en lien direct avec la cadence de production. Ce lien se manifeste à travers une influence sur les bornes des variables aléatoires a_i. Soit $u(t)$ la cadence de production de la machine à l'instant t, avec une contrainte de capacité $0\leq u(t) \leq u_{max}$, telle que u_{max} est la cadence maximale de production de la machine. La relation entre la cadence de production et les bornes des variables aléatoires a_i est donnée par les équations suivantes :

$$a^{min}_i =(u(t)/ u_{max}).\alpha^{min}_i \qquad (5:2)$$

$$a^{max}_i =(u(t)/ u_{max}).\alpha^{max}_i \qquad (5:3)$$

$\alpha^{min}{}_i$ et $\alpha^{max}{}_i$ sont les valeurs maximales que les bornes $a^{min}{}_i$ et $a^{max}{}_i$ peuvent atteindre respectivement.

Le choix de la cadence de production est réalisé lors du remplacement de la pièce installée dans la machine. Ainsi, en installant dans la machine une pièce de rechange de qualité i, la cadence de production appliquée sur la machine sera fixe durant le cycle k, notée par $u_{ik}(t)$, (k=1…CN) tel que CN est le nombre de cycles durant la mission T_{miss}. En conséquence, la variable aléatoire a_i est bornée comme suit :

$$(u_{ik}(t)/u_{max}).\alpha^{min}{}_i \leq a_i \leq (u_{ik}(t)/u_{max}).\alpha^{max}{}_i,\ i=1\ldots n-1 \qquad (5:4)$$

De plus, la dégradation du système affecte négativement la qualité des articles produits, de sorte que l'augmentation de la dégradation diminue le taux d'acceptation et augmente le taux de rebut des articles produit.
Soit $\delta(d(t))$ le taux de rebut en fonction du niveau de dégradation $d(t)$ à l'instant t. Nous avons adapté la fonction proposée par Rivera-Gomez et al. (2013) [72], en remplaçant le nombre de défaillances par le niveau de dégradation de la machine. La fonction obtenue est donnée comme suit :

$$\delta(d(t))= \delta^0+ \delta^1.(d(t)/d_{max})^r \qquad (5:5)$$

δ^0 est le taux de rebut aux conditions initiales, δ^1 est le taux de rebut maximum possible et r est un paramètre qui définit la tendance du taux de rebut.

A partir de l'équation 5:5, nous pouvons obtenir une relation entre la cadence de production et taux de rebut, et elle est développée comme suit:

$$\delta(d(t))= \delta^0+\delta^1.((d(t-1)+a_i)/d_{max})^r \qquad (5:6)$$

L'équation 5:6 nous permet de borner le taux de rebut en fonction la cadence de production

$$\delta^0+\delta^1.((d(t-1)+(u_{ik}(t)/u_{max}).\alpha^{min}{}_i)/d_{max})^r \leq \delta^0+\delta^1.((d(t-1)+a_i)/d_{max})^r \leq \delta^0 +\delta^1.((d(t-1)+(u_{ik}(t)/u_{max}).\alpha^{max}{}_i)/d_{max})^r \qquad (5:7)$$

Si le niveau de dégradation dépasse le seuil d_{max}, la machine est considérée en état de panne. Par conséquent, la machine ne fonctionne plus dès que le niveau de dégradation dépasse le seuil de remplacement correctif d_{max}. Nous notons par $T^{dmax}{}_{ik}$ le temps opératoire de la pièce de rechange de qualité i installée dans machine durant le cycle k et D_{ik} la durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité i durant le cycle k, jusqu'à l'instant de son remplacement. Ainsi, la cadence de production appliquée sur la pièce de rechange de qualité i durant le cycle k est donnée comme suit :

$$u_{ik}(t) = \begin{cases} u_{ik}(t) & if\ t \leq T_{ik}^{dmax} \\ 0 & if\ t > T_{ik}^{dmax} \end{cases}$$

Le reste des hypothèses sont détaillées comme suit :

1. Si la production est interrompue par une défaillance de la machine le processus de production de l'article en cours de production ne peut pas être repris après le remplacement et cet article est considéré comme rejeté.

2. Les pièces de rechange destinées à remanufacturation sont disponibles dans le stock *S*2, en quantités limitées pour chaque qualité. Ces quantités dépendent des qualités récupérées de la machine lors des remplacements précédents.

3. Le niveau de remanufacturation dépend de la qualité de la pièce de rechange prise du stock *S*2 et de la qualité à installer dans la machine.

4. L'inspection est réalisée selon un plan séquentiel, où les dates d'inspection sont calculées en utilisant l'heuristique proposée dans la section 2.3.

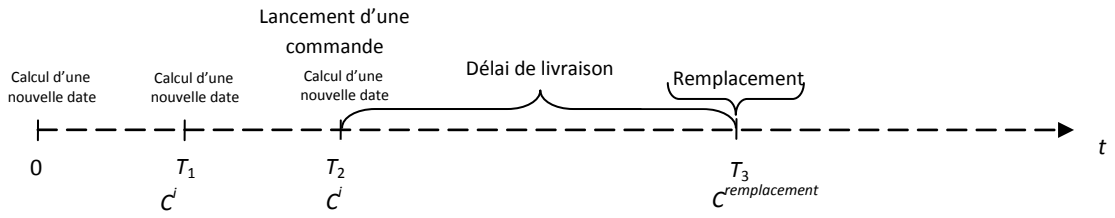


Figure 5:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée

5.3 Modèle mathématique

Le modèle mathématique proposé est basé en partie sur le modèle présenté au chapitre 4 pour décrire la maintenance de la machine. Dans ce modèle de maintenance, nous avons utilisé l'arbre de probabilité pour déterminer les probabilités et les coûts engendrés par l'occurrence des différents évènements à chaque instant *t* de la mission T_{miss}.
Le problème d'optimisation vise à déterminer le meilleur quadruplet $((i,j)_k, (d_r,d_s)_{jk}, T_j, u_{ik}(t))$ défini par : la qualité de la pièce de rechange installée dans la machine pour le cycle *k* et sa qualité de départ (cas de remanufacturation), les seuils décisionnels utilisés pour la qualité *i* lors du cycle *k*, les dates d'inspection et la cadence de production utilisée. Ainsi, la fonction coût liée à la maintenance pour l'instant *t* est donnée par l'équation suivante :

$$MC_t = \begin{pmatrix} C^{cr}(P_1) + C^{disp}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +C^i(P_3 + P_5 + P_9 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +C^{pr}(P_7) + (\, y_k C^{or} + z_{ik} C_{li}^{re})(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

Avec :

$P_1=P(d(t)\geq d_{max}).P(\varphi_k\geq {}^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_2=P(d(t)\geq d_{max}).P(\varphi_k\geq t^{livraison}).P(t\neq T_i)$

$P_3=P(d(t)\geq d_{max}).P(0<\varphi_k<t^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_4=P(d(t)\geq d_{max}).P(0<\varphi_k<t^{livraison}).P(t\neq T_i)$

$P_5=P(d(t)\geq d_{max}).P(\varphi_k=0).P(t=T_i)$

$P_6=P(d(t)\geq d_{max}).P(\varphi_k=0).P(t\neq T_i)$

$P_7=P(d_{max}>d(t)\geq d_r).P(\varphi_k\geq t^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_8=P(d_{max}>d(t)\geq d_r).P(\varphi_k\geq t^{livraison}).P(t\neq T_i)$

$P_9=P(d_{max}>d(t)\geq d_r).P(0<\varphi_k<t^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_{11}=P(d_{max}>d(t)\geq d_r).P(\varphi_k=0).P(t=T_i)$

$P_{13}=P(d_r>d(t)\geq d_s).P(\varphi_k\geq t^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_{14}=P(d_r>d(t)\geq d_s).P(\varphi_k\geq t^{livraison}).P(t\neq T_i)$

$P_{15}=P(d_r>d(t)\geq d_s).P(0<\varphi_k<t^{livraison}).P(t=T_i)$

$P_{17}=P(d_r>d(t)\geq d_s).P(\varphi_k=0).P(t=T_i)$

$P_{19}=P(d(t)<d_s).P(\varphi_k=0).P(t=T_i)$

Et :

C^{disp}: Coût de destruction d'une pièce de qualité *n*

C_{li}^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce de qualité *l*, afin d'obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

$$z_{ik}=\begin{cases}1\ si\ une\ pièce\ remanufacturée\ de\ qualité\ i\ est\ placée\ dans\ la\ machine\\ \qquad au\ début\ du\ cycle\ k\\ 0\ sinon\end{cases}$$

$$y_k=\begin{cases}1\ si\ une\ pièce\ neuve\ est\ commandée\ durant\ le\ cycle\ k-1\ pour\ etre\ placée\ dans\\ \qquad la\ machine\ au\ début\ du\ cycle\ k\\ 0\ sinon\end{cases}$$

$$x_{lk}=\begin{cases}1\ si\ une\ pièce\ de\ qualité\ l\ est\ prise\ du\ stock\ S2\ pour\ être\ remanufacturée\ durant\\ \qquad le\ cycle\ k-1\ pour\ être\ placée\ dans\ la\ machine\ au\ début\ du\ cycle\ k\\ 0\ sinon\end{cases}$$

$$s_{hk}=\begin{cases}1\ si\ une\ pièce\ de\ qualité\ h\ est\ récupérée\ de\ la\ machine\ à\ la\ fin\ du\ cycle\ k\\ 0\ sinon\end{cases}$$

$i\in\{1,\dots,n-1\}, l\in\{1,\dots,n-1\}, h\in\{1,\dots,n\}, k\in\{1,\dots,CN\}$

La fonction coût de maintenance associée au cycle *k* est :

$$MC_k=\sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1}D_{ik}z_{ik}+D_{0k}y_k}CT_t$$

Ainsi, la partie liée à la maintenance dans la fonction objectif est :

$$\boldsymbol{f_{Mainetance}=\sum_{k=1}^{CN}MC_k} \qquad \textbf{(5:8)}$$

CN: Nombre de cycles durant la mission T_{miss}.
D_{ik}: La durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité *i* durant le cycle *k*, jusqu'à son remplacement.

La deuxième partie de la fonction objectif liée à la production est composée de coût de production, le coût de stockage et le coût engendré par rejet.

La quantité produite jusqu'à l'instant t_k du cycle *k* :

$$QP(t_k) = \sum_{t=1}^{t_c} u_{ik}(t)$$

Soit $IL(t_c)$ le niveau du stock *S*3 des articles produits à l'instant t_{ik} du cycle *k*, avec $IL(0_1)=0$, 0_1 est instant de début de la mission T_{miss}.

$$IL(t_k) = \begin{cases} IL(t_k - 1) + (\sum_{t=t_k-\lceil 1/u_{ik}(t)\rceil}^{t_k} u_{ik}(t).\left(1 - \delta\big(d(t)\big)\right)) & Si\ t_k mod\ \left({}^{1}/_{u_{ik}(t_k)}\right) < 1 \\ IL(t_k - 1) & Sinon \end{cases}$$

La quantité rejetée jusqu'à l'instant t_k :

$$RQ(t_k) = \begin{cases} RQ(t_k - 1) + (\sum_{t=t_k-\lceil 1/u_{ik}(t)\rceil}^{t_k} u_{ik}(t).\left(\delta\big(d(t)\big)\right)) & Si\ t_k mod\ \left({}^{1}/_{u_{ik}(t_k)}\right) < 1 \\ RQ(t_k - 1) & Sinon \end{cases}$$

Par conséquent, la fonction de coût de production est donnée comme suit :

$$\boldsymbol{f_{production} = \left[\sum_{k=1}^{CN}(\sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik}+D_{0k}y_k} IL(t).CUT^s)\right] + \left[\sum_{k=1}^{CN} QP(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik} + D_{0k}y_k)\right].CU^{prod} + \left[\sum_{k=1}^{CN} RQ(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik} + D_{0k}y_k)\right].CU^{rej}} \quad \textbf{(5:9)}$$

Avec :

CUT^s : Coût unitaire de stockage d'article produit

CU^{prod}: Coût unitaire de production

CU^{rej}: Coût unitaire de rejet

En se basant sur les deux fonctions coûts définies précédemment, la fonction objectif est exprimée sous la forme suivante :

$$Min\ f = f_{production} + f_{Maintenance}$$

Ainsi,

$$\boldsymbol{Min\ f = \left[\sum_{k=1}^{CN}(\sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik}+D_{0k}y_k} IL(t).CUT^s)\right] + \left[\sum_{k=1}^{CN} QP(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik} + D_{0k}y_k)\right].CU^{prod} + \left[\sum_{k=1}^{CN} RQ(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}z_{ik} + D_{0k}y_k)\right].CU^{rej} + \sum_{c=1}^{CN} MC_c} \quad \textbf{(5:10)}$$

Sous les contraintes suivantes :

$\sum_{i=1}^{n-1} z_{ik} + y_k = 1 \quad \forall\, k = 1 \dots CN$

$\sum_{l=1}^{n-1} x_{lk} + y_k = 1 \quad \forall\, k = 1 \dots CN$

$\sum_{l=1}^{n-1} P_7 . s_{lk} + P_1 . s_{nk} = 1 \quad \forall\, k = 1 \dots CN$

$\sum_{l=1}^{n-1} lx_{lk} \geq \sum_{l=1}^{n-1} iz_{ik} \quad \forall\, k = 1 \dots CN$

$\sum_{k=1}^{CN} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) \geq T_{miss}$

$\sum_{k=1}^{CN-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik} z_{ik} + D_{0k} y_k \right) < T_{miss}$

$Q_{lk} \geq x_{lk} \quad \forall\, k = 1 \dots CN \quad \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$

$Q_{lk} = Q_{lk-1} + s_{lk-1} - x_{lk+1}$

$\forall\, k = 1 \dots CN \quad \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\}$

$IL(T_{miss}) \geq D_{miss}$

Q_{lk} : Le nombre de pièces de qualité *j* disponibles dans le stock *S*2 au début du cycle *k*.

5.4 Approche proposée

Comme pour le problème traité dans le chapitre 5, l'approche proposée pour résoudre le problème étudié est basée sur une heuristique hybride réunissant un algorithme génétique avec un algorithme glouton. Ainsi, les résultats trouvés par l'algorithme génétique sont utilisés comme des données d'entrée pour l'algorithme glouton.

Partie 1 : Algorithme génétique

Dans cette première partie, nous optimisons les politiques de maintenance et de production pour le pire et le meilleur scénario de dégradation. Cette optimisation sera réalisée sur chaque triplet possible de pièces de rechange (*x*; (*y*, *z*)), tel que (*x*; (*y*, *z*)) signifie que la pièce de rechange de qualité *x* est remplacée par une pièce de rechange de qualité *y* et que cette dernière (la pièce de qualité *y*) est le résultat d'une action de remanufacturation réalisée sur une pièce de qualité *z*.
L'optimisation de la politique de production est accomplie par une stratégie énumérative. Pour chaque cadence de production possible ($u_{xk}(t)$=1…u_{max}), nous cherchons la politique de maintenance optimale en déterminant les seuils décisionnels (d_r et d_s). Pour cela, nous avons adopté l'algorithme génétique proposé dans la section 2.2.3. Les chromosomes ont été représentés par deux valeurs réelles telles que la première donne le rapport entre d_r et d_{max}, et la seconde donne le rapport entre d_s et d_r. Cependant, l'opérateur de croisement par point unique est remplacé par un croisement arithmétique. Ce croisement est plus approprié pour les chromosomes représentés

par des valeurs réelles. La production de deux nouvelles descendances est réalisée en utilisant les équations suivantes :

$$\text{Enfant1} = \mu.\text{Parent1} + (1-\mu).\text{Parent2}$$
$$\text{Enfant2} = (1-\mu).\text{Parent1} + \mu.\text{Parent2}$$

μ est généré aléatoirement à partir d'une distribution uniforme sur l'intervalle]0,1[.

Partie 2 : Algorithme glouton

La deuxième partie de l'approche consiste à construire la séquence des pièces de rechange qui seront utilisées lors des remplacements. Pour cela, nous utilisons les résultats obtenus dans la première partie pour les deux scénarios de dégradation (le pire et le meilleur scénario) en sélectionnant le meilleur choix de pièces de rechange disponible dans le stock.

Heuristique locale : A chaque étape de la construction (cycle k), nous sélectionnons la meilleure paire (y, z). Cette sélection est basée sur deux objectifs :

1. Le coût réel de production d'un article correspondant à la pièce de rechange de qualité x. Ce coût est donné par le rapport "coût total de production sur la quantité produite (CT_{xk}/PQ_{xk})".

2. La cadence réelle de production correspondant à la pièce de rechange de qualité x. Cette cadence est donnée par le rapport "quantité produite sur durée d'utilisation (PQ_{xk}/D_{xk})".

Ainsi, la sélection est faite de la manière suivante :

Heuristique locale

Soit x_k la qualité de pièce de rechange installée dans la machine durant le cycle k.
Pour chaque paire (y, z)
    Choisir la cadence $u_{xk}^{min}(t)$ et les seuils $(d_r,d_s)_{u_{xk}(t)}^{min}$ qui minimisent le coût réel (CT_{xk}/PQ_{xk}) parmi les cadence et les seuils possible ($u_{xk}(t)=u_{min}...u_{max}$; $(d_r, d_s)_{u_{xk}(t)}$).
Fin
Parmi les minimums trouvés, choisir la paire (y, z), la cadence $u_{xk}^{min}(t)$ et les seuils $(d_r,d_s)_{u_{xk}(t)}^{min}$ qui garantissent la cadence réelle (PQ_{xk}/D_{xk}) la plus grande.

L'algorithme de construction se résume comme suit :

Algorithme glouton

k=0
Soit x_k la qualité de pièce de rechange installée dans la machine durant le cycle k.
Tant que la mission n'est finie
    Heuristique locale (x_k) ;
    k=k+1 ;
Fin

5.5 Expériences numériques et analyse

Nous entamons cette section par une analyse de sensibilité sur l'algorithme génétique de la première partie de l'approche, en l'appliquant sur les différents triplets (x; (y, z)) possibles. Cette analyse vise à illustrer l'effet de la cadence de production d'une part et des paramètres de la fonction de rebut de l'autre part sur la quantité produite, le coût généré et sur la période d'utilisation des pièces de rechange. Cet effet sera observé via les deux objectifs : le coût réel de production d'un article (CT_x/PQ_x) et la cadence réel de production (PQ_x/D_x). Ainsi, nous procédons à la variation de la cadence de production entre ses valeurs minimales et maximales et le paramètre δ_1 de la fonction du taux de rebut dans l'ensemble {0.2, 0.4, 0.6, 0.8}. Les autres valeurs de la fonction de rebut sont : $\delta_0 = 0$, $r = 1$.

Le reste des résultats utilisés sont présentés comme suit :

Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5) : une qualité neuve, une qualité destinée à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. Les valeurs maximales des variables a_i sont présentées dans le tableau 5:1. Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux initiaux de dégradation des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5. Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=200 *um*. Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 5:2. L'utilisation d'une pièce de rechange remanufacturée implique un coût fixe C_1^{Util}=60 (pour la qualité 1), C_2^{Util}=30 (pour la qualité 2). Le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S2$ est CU^s=3 *um/pièce/ut*. Le coût d'inspection C^i=15 *um*. Le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*. Le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=500 *um*. Le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um*/ut. Le coût destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um.* Les cadences de production minimale et maximale sont respectivement u_{min}=1 et u_{max}=10.

α^{min}_0	α^{max}_0	α^{min}_1	α^{max}_1	α^{min}_2	α^{max}_2	α^{min}_3	α^{max}_3
1	5	4	10	7	15	10	20

Tableau 5:1 Les bornes des variables a_i.

	3->2	**3->1**	**2->1**
Coût de remanufacturation	8	10	7
Temps de remanufacturation	2	7	3

Tableau 5:2 Les temps et les coûts de remanufacturation.

1. Le cas du meilleur scénario de dégradation :

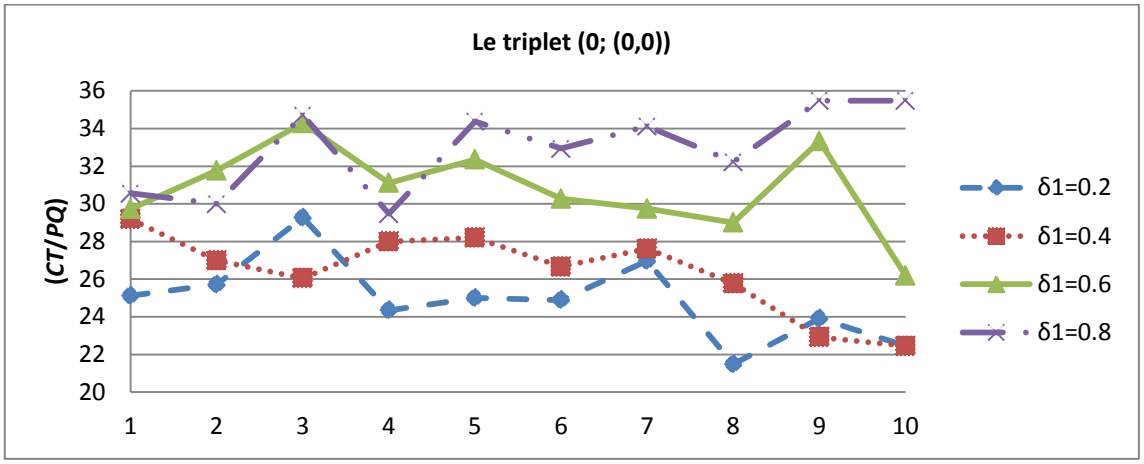


Figure 5:3 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))

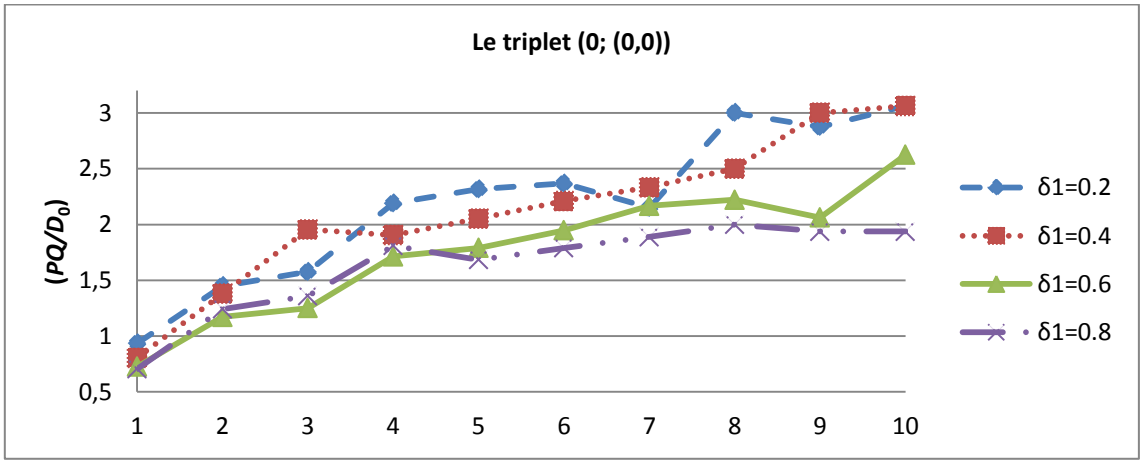


Figure 5:4 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	43	42	41	46	44	45	43	54	46	49
	Temps d'utilisation	46	29	26	21	19	19	20	18	16	16
	CT	1080	1080	1200	1120	1100	1120	1160	1160	1100	1100
δ^1=0.4	Quantité produite	37	40	43	40	39	42	42	45	48	49
	Temps d'utilisation	46	29	22	21	19	19	18	18	16	16
	CT	1080	1080	1120	1120	1100	1120	1160	1160	1100	1100
δ^1=0.6	Quantité produite	37	34	35	36	34	37	39	40	33	42
	Temps d'utilisation	51	29	28	21	19	19	18	18	16	16
	CT	1100	1080	1200	1120	1100	1120	1160	1160	1100	1100
δ^1=0.8	Quantité produite	36	36	34	38	32	34	34	36	31	31
	Temps d'utilisation	51	29	25	21	19	19	18	18	16	16
	CT	1100	1080	1180	1120	1100	1120	1160	1160	1100	1100

Tableau 5:3 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0)).

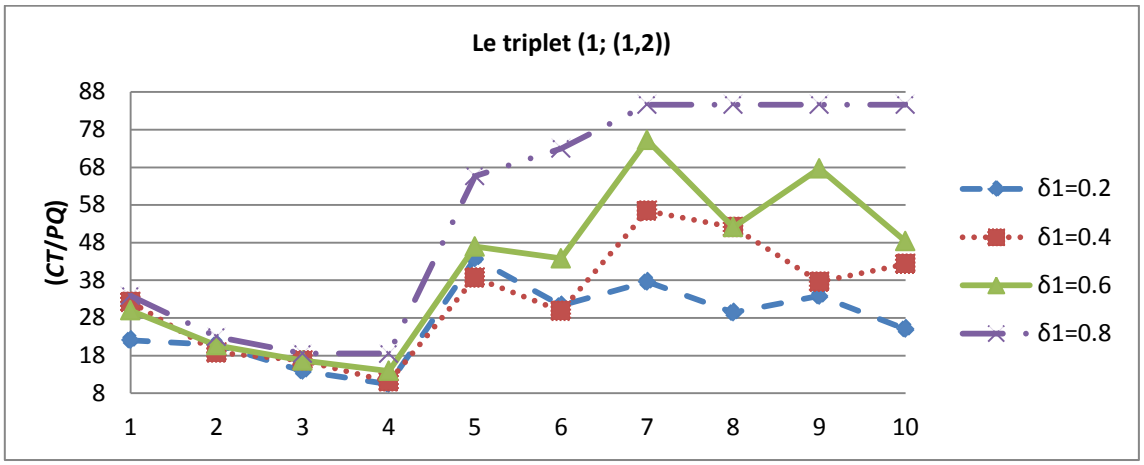


Figure 5:5 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))

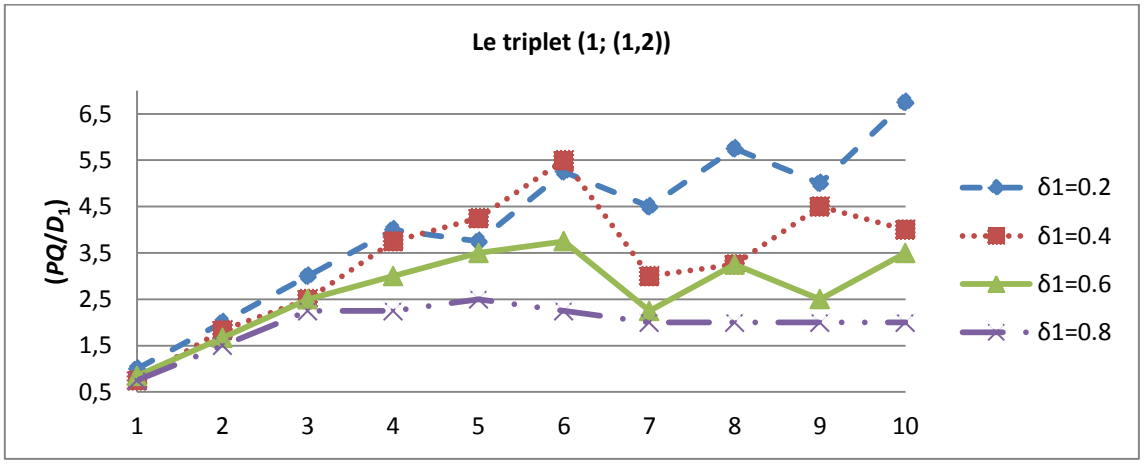


Figure 5:6 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	13	12	12	16	15	21	18	23	20	27
	Temps d'utilisation	13	6	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	287	250	167	167	657	657	677	677	677	677
δ^1=0.4	Quantité produite	9	11	10	15	17	22	12	13	18	16
	Temps d'utilisation	12	6	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	290	207	167	167	657	657	677	677	677	677
δ^1=0.6	Quantité produite	11	10	10	12	14	15	9	13	10	14
	Temps d'utilisation	13	6	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	330	207	167	167	657	657	677	677	677	677
δ^1=0.8	Quantité produite	9	9	9	9	10	9	8	8	8	8
	Temps d'utilisation	12	6	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	305	207	167	167	657	657	677	677	677	677

Tableau 5:4 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2)).

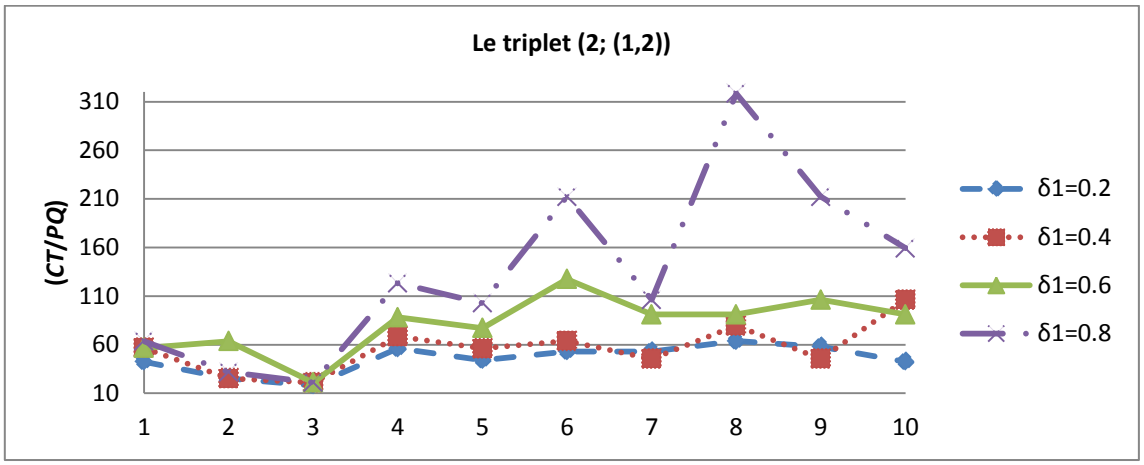


Figure 5:7 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))

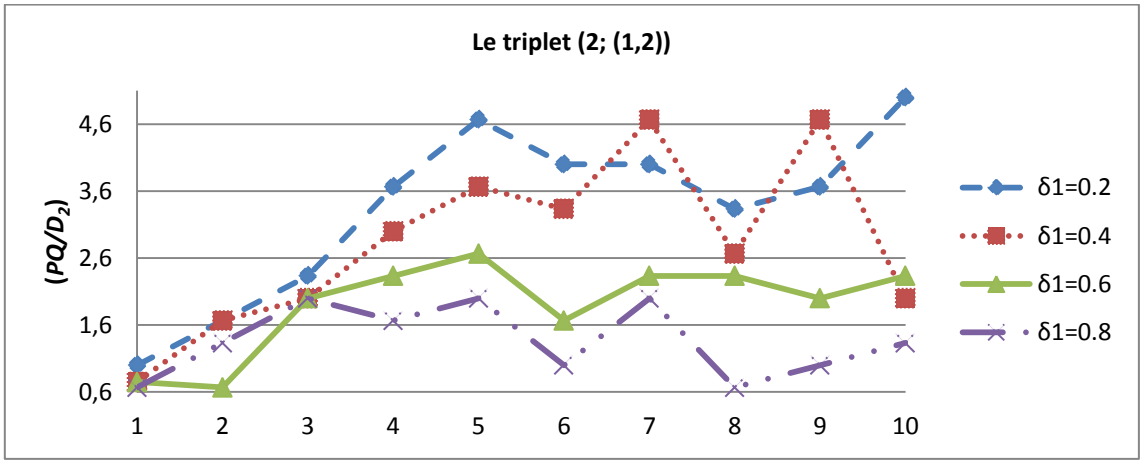


Figure 5:8 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	4	5	7	11	14	12	12	10	11	15
	Temps d'utilisation	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	170	127	127	617	617	637	637	637	637	637
δ^1=0.4	Quantité produite	3	5	6	9	11	10	14	8	14	6
	Temps d'utilisation	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	170	127	127	617	617	637	637	637	637	637
δ^1=0.6	Quantité produite	3	2	6	7	8	5	7	7	6	7
	Temps d'utilisation	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	170	127	127	617	617	637	637	637	637	637
δ^1=0.8	Quantité produite	2	4	6	5	6	3	6	2	3	4
	Temps d'utilisation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	127	127	127	617	617	637	637	637	637	637

Tableau 5:5 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)).

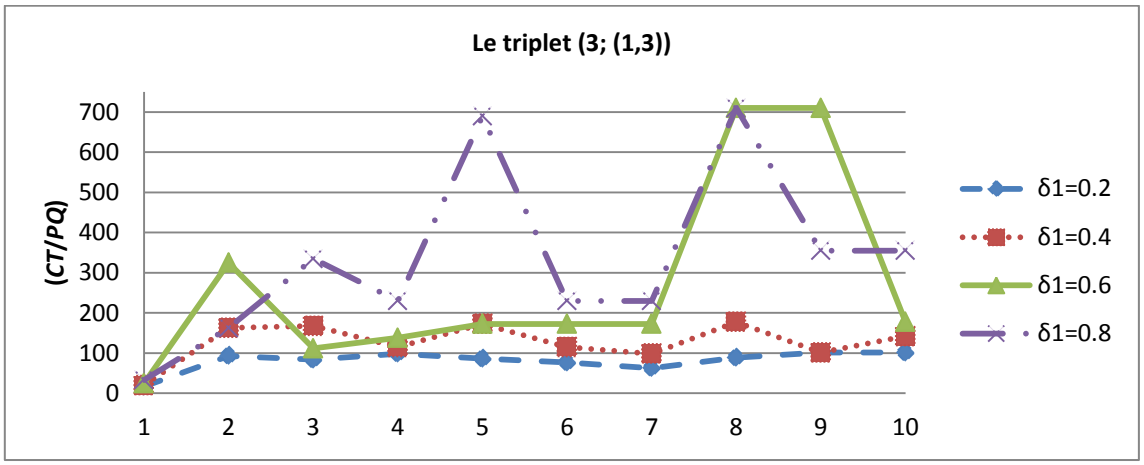


Figure 5:9 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))

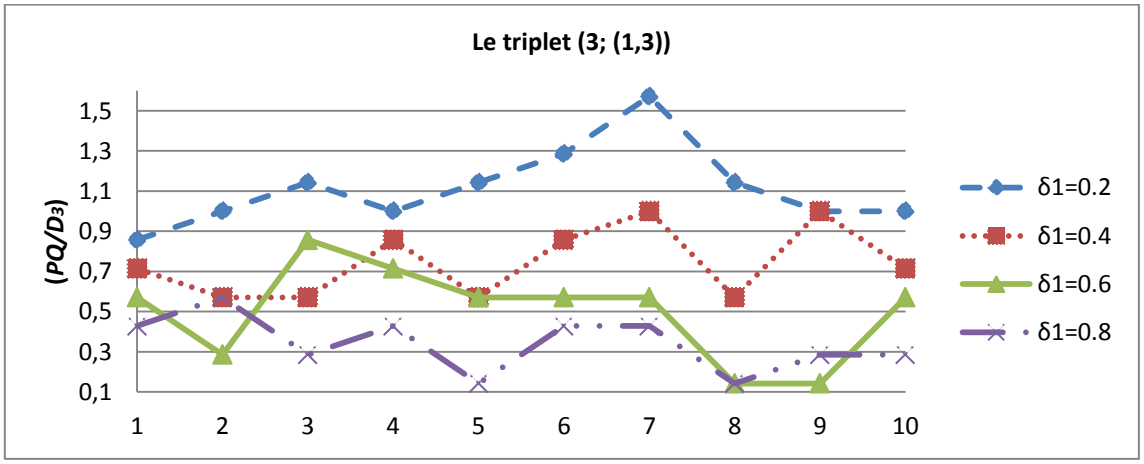


Figure 5:10 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	6	7	8	7	8	9	11	8	7	7
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	100	650	670	690	690	690	690	710	710	710
δ^1=0.4	Quantité produite	5	4	4	6	4	6	7	4	7	5
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	100	650	670	690	690	690	690	710	710	710
δ^1=0.6	Quantité produite	4	2	6	5	4	4	4	1	1	4
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	100	650	670	690	690	690	690	710	710	710
δ^1=0.8	Quantité produite	3	4	2	3	1	3	3	1	2	2
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	100	650	670	690	690	690	690	710	710	710

Tableau 5:6 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)).

2. Le cas du pire scénario de dégradation :

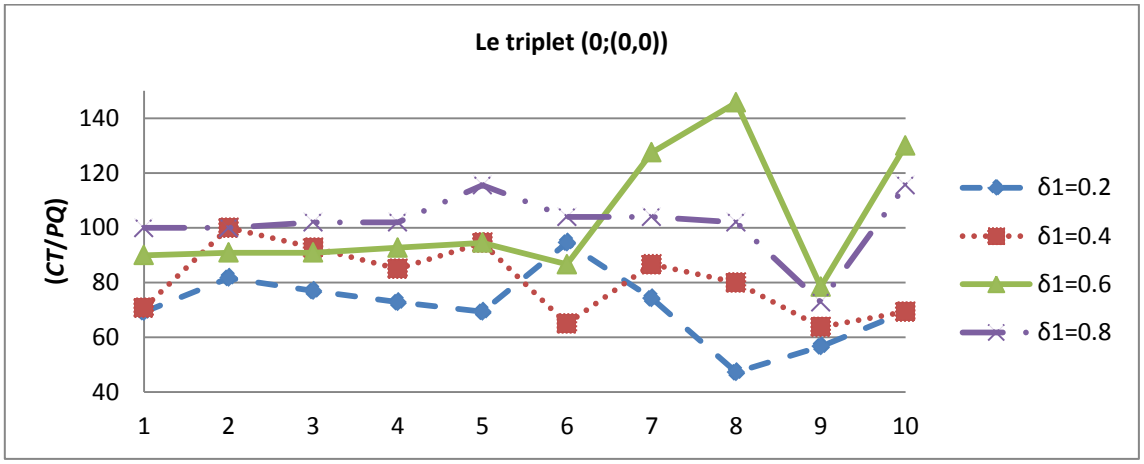


Figure 5:11 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))

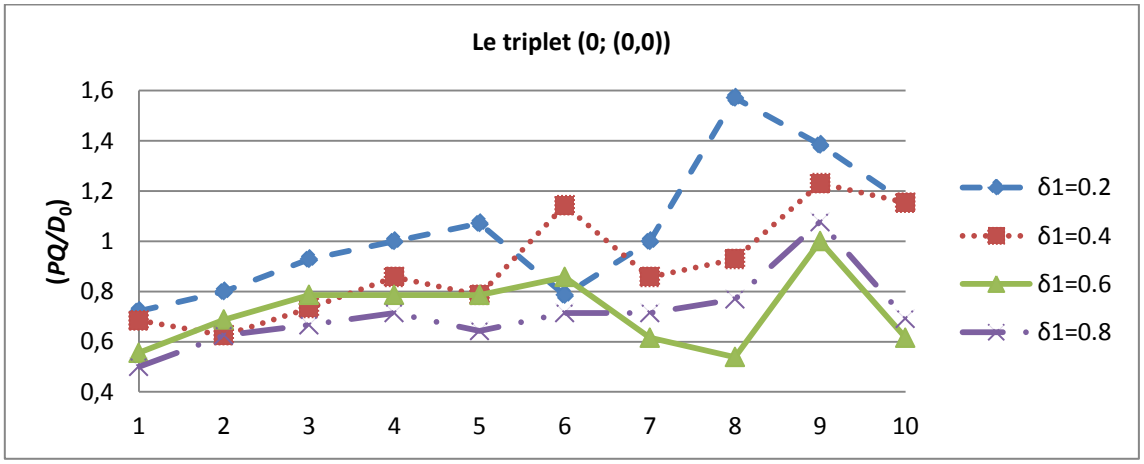


Figure 5:12 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	13	12	13	14	15	11	14	22	18	15
	Temps d'utilisation	18	15	14	14	14	14	14	14	13	13
	CT	900	980	1000	1020	1040	1040	1040	1040	1020	1040
δ^1=0.4	Quantité produite	13	10	11	12	11	16	12	13	16	15
	Temps d'utilisation	19	16	15	14	14	14	14	14	13	13
	CT	920	1000	1020	1020	1040	1040	1040	1040	1020	1040
δ^1=0.6	Quantité produite	10	11	11	11	11	12	8	7	13	8
	Temps d'utilisation	18	16	14	14	14	14	13	13	13	13
	CT	900	1000	1000	1020	1040	1040	1020	1020	1020	1040
δ^1=0.8	Quantité produite	9	10	10	10	9	10	10	10	14	9
	Temps d'utilisation	18	16	15	14	14	14	14	13	13	13
	CT	900	1000	1020	1020	1040	1040	1040	1020	1020	1040

Tableau 5:7 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (0; (0,0)).

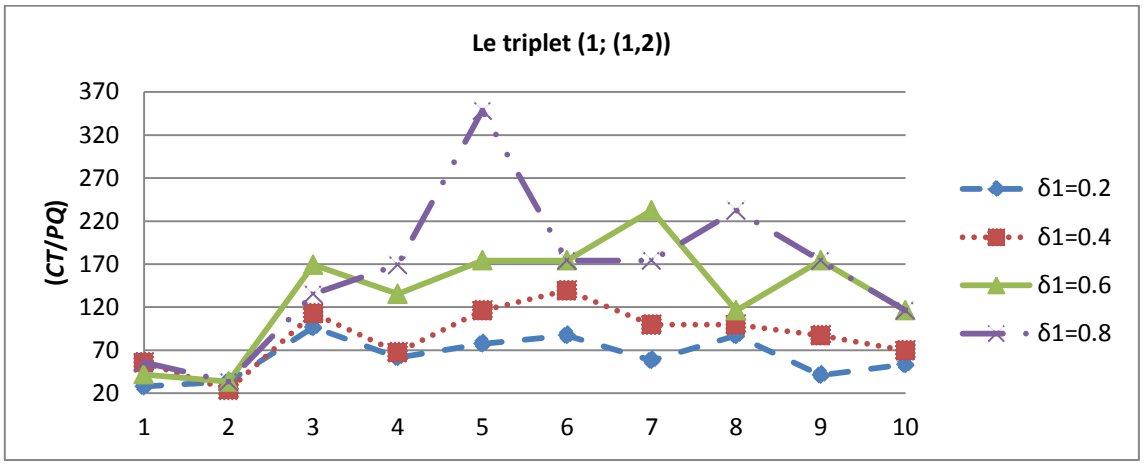


Figure 5:13 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))

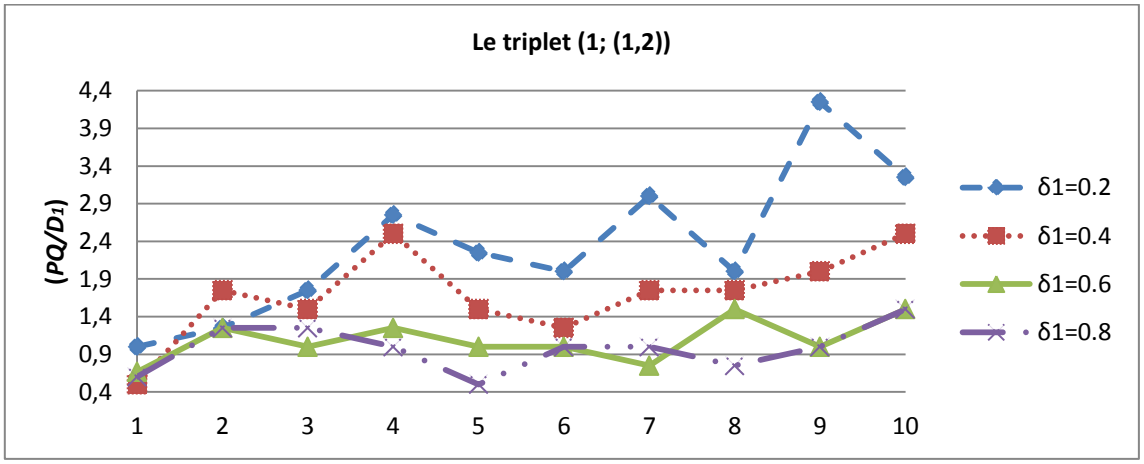


Figure 5:14 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	6	5	7	11	9	8	12	8	17	13
	Temps d'utilisation	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	167	167	677	677	697	697	697	697	697	697
δ^1=0.4	Quantité produite	3	7	6	10	6	5	7	7	8	10
	Temps d'utilisation	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	167	167	677	677	697	697	697	697	697	697
δ^1=0.6	Quantité produite	4	5	4	5	4	4	3	6	4	6
	Temps d'utilisation	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	167	167	677	677	697	697	697	697	697	697
δ^1=0.8	Quantité produite	3	5	5	4	2	4	4	3	4	6
	Temps d'utilisation	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	CT	167	167	677	677	697	697	697	697	697	697

Tableau 5:8 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (1; (1,2)).

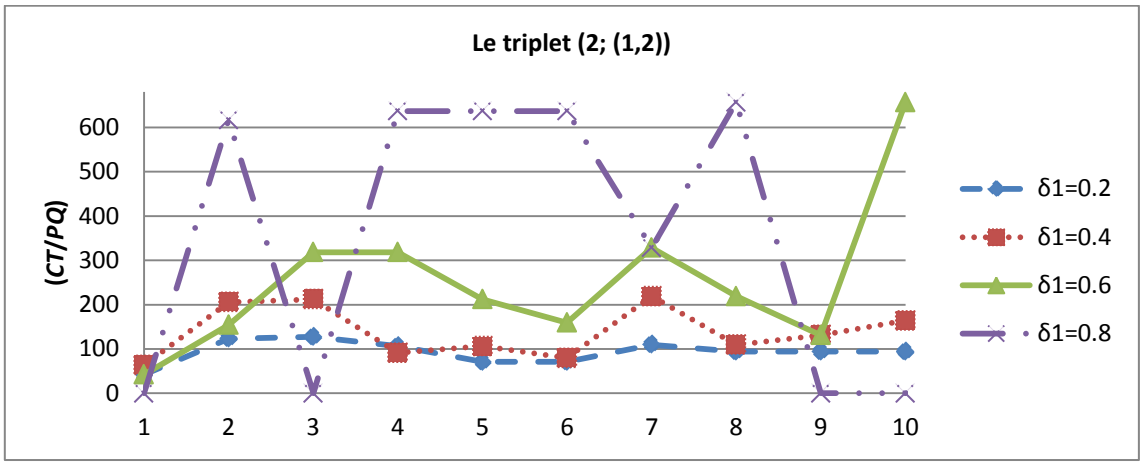


Figure 5:15 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))

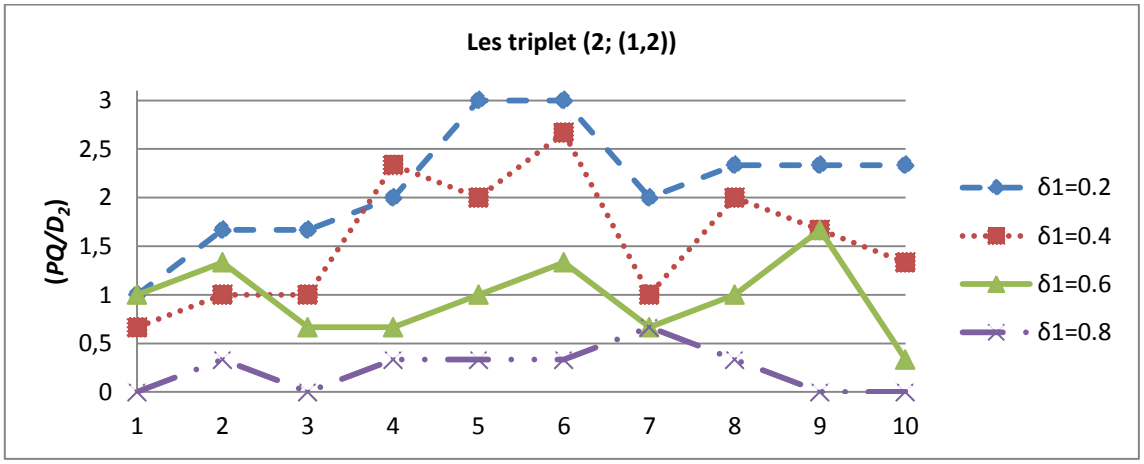


Figure 5:16 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	3	5	5	6	9	9	6	7	7	7
	Temps d'utilisation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	127	617	637	637	637	637	657	657	657	657
δ^1=0.4	Quantité produite	2	3	3	7	6	8	3	6	5	4
	Temps d'utilisation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	127	617	637	637	637	637	657	657	657	657
δ^1=0.6	Quantité produite	3	4	2	2	3	4	2	3	5	1
	Temps d'utilisation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	127	617	637	637	637	637	657	657	657	657
δ^1=0.8	Quantité produite	0	1	0	1	1	1	2	1	0	0
	Temps d'utilisation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	CT	127	617	637	637	637	637	657	657	657	657

Tableau 5:9 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (2; (1,2)).

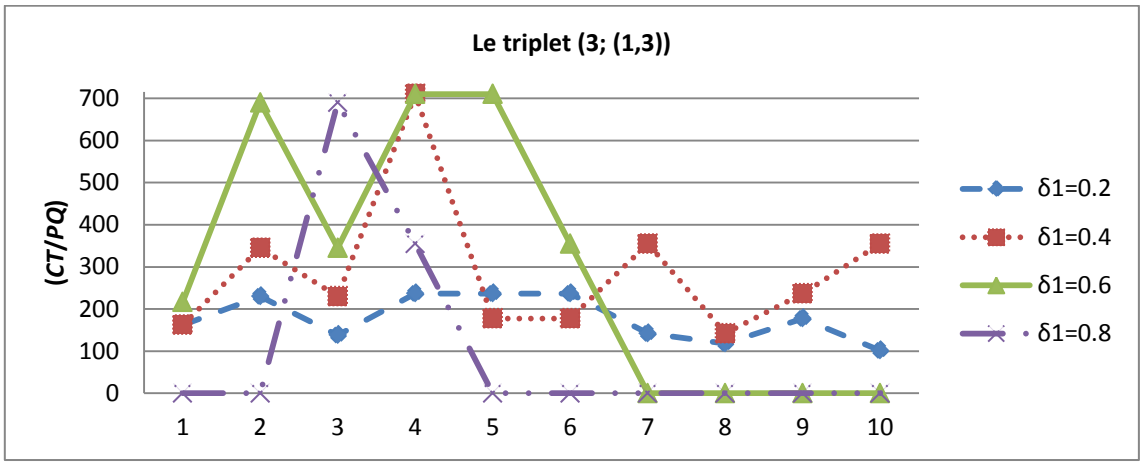


Figure 5:17 Variation du coût réel en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))

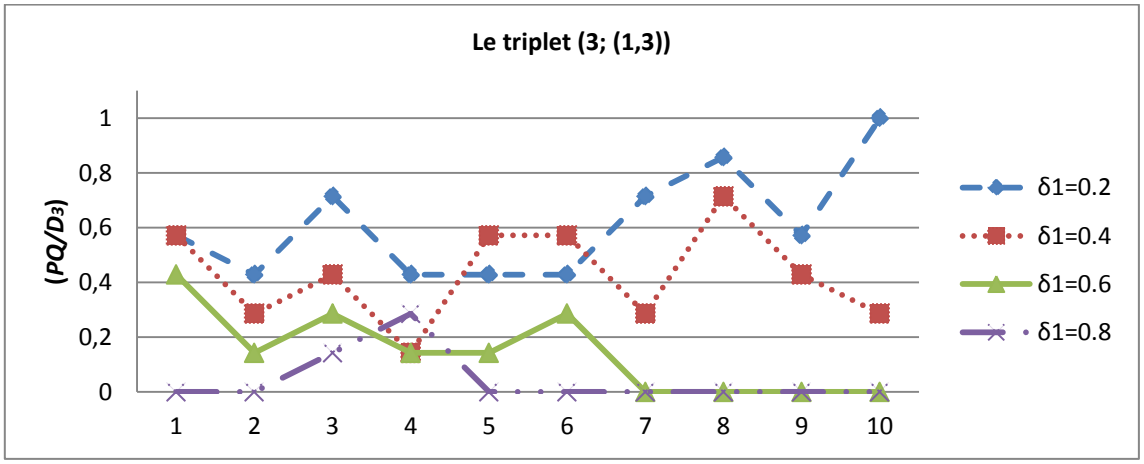


Figure 5:18 Variation de la cadence réelle en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3))

	Cadence de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ^1=0.2	Quantité produite	4	3	5	3	3	3	5	6	4	7
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	650	690	690	710	710	710	710	710	710	710
δ^1=0.4	Quantité produite	4	2	3	1	4	4	2	5	3	2
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	650	690	690	710	710	710	710	710	710	710
δ^1=0.6	Quantité produite	3	1	2	1	1	2	0	0	0	0
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	650	690	690	710	710	710	710	710	710	710
δ^1=0.8	Quantité produite	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
	Temps d'utilisation	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	CT	650	690	690	710	710	710	710	710	710	710

Tableau 5:10 Variation de la qualité produite, temps d'utilisation et du cout total en fonction de la cadence appliquée (3; (1,3)).

Les figures 5:3-5:18 et les tableaux 5:3-5:10 représentent une liste non exhaustive des résultats obtenus en appliquant l'algorithme génétique. Les résultats montrent une cohérence entre le

coût réel de production, la cadence réelle et la variation du paramètre δ_1 de la fonction du taux de rebut. Ainsi, l'augmentation du paramètre δ_1 implique une augmentation du taux de rebut. Cette augmentation conduit à la diminution du coût réel et à l'augmentation de la cadence réelle. D'autre part, nous remarquons que la variation du paramètre δ_1 n'a pas d'influence sur le coût total *CT* et le temps d'utilisation, mais l'effet est observé principalement sur la quantité produite.

La seconde partie de cette section est consacrée à la présentation des résultats obtenus par l'application de l'approche proposée. Cependant, nous limitons notre étude aux deux scénarios de dégradation qui limite la dégradation réelle, à savoir, le pire et le meilleur scénario de dégradation. Ainsi, nous appliquons l'algorithme de construction pour déterminer la quantité maximale produite par ces deux scénarios sur une mission de longueur T_{miss}= 150 *ut*, avec un stock *S*2 initial représenté par le tableau 5:11 :

	Qualité 1	**Qualité 2**	**Qualité 3**
S2	2	1	4

Tableau 5:11 L'état initial du stock *S*2.

		Pire dégradation	***Meilleur dégradation***
δ^1=0.2	**Quantité totale produite**	318	924
	CT_{miss}	16000	13350
δ^1=0.4	**Quantité totale produite**	225	647
	CT_{miss}	14280	14350
δ^1=0.6	**Quantité totale produite**	176	484
	CT_{miss}	13740	13380
δ^1=0.8	**Quantité totale produite**	177	491
	CT_{miss}	13740	13400

Tableau 5:12 Quantité et coût total engendré pour le pire et meilleur scénarios de dégradation en fonction du paramètre δ_1.

A partir du tableau 5:12, nous remarquons que les quantités produites par les deux scénarios de dégradation diminuent avec l'augmentation du paramètre δ_1, avec une stabilité entre δ_1=0.6 et 0.8. D'autre part, l'écart entre les quantités produites se réduit aussi en augmentant le paramètre δ_1. Finalement, nous pouvons dire que la capacité de la machine est limitée, selon le paramètre δ_1 entre 491 et 924 articles sur l'horizon de la mission étudiée.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé un problème intégrant la chaîne logistique, la maintenance et la gestion de la production avec le contrôle de qualité. Le système étudié est composé d'une seule machine soumise à une dégradation stochastique. Pour la maintenance de la machine, nous

avons adopté une politique de remplacement conditionnelle, basée sur une chaîne logistique en boucle fermée pour l'approvisionnement en pièce de rechange. La production de la machine vise à satisfaire une demande, qui doit être livrée à la fin de la mission. Cette production est soumise à un contrôle de qualité, ce qui conduit au rejet de certains articles non-conformes. Le taux de rejet des articles produits est en lien direct avec la dégradation de la machine, c'est-à-dire, le niveau de dégradation de la pièce de rechange installée dans la machine. Nous avons proposé une approche en deux parties afin de résoudre le problème d'optimisation des paramètres liés à la maintenance conditionnelle (les seuils d_s et d_r), à ceux de la séquence de qualité des pièces de rechange (à installer dans la machine lors des remplacements) ainsi qu'aux cadences avec lesquelles les pièces de rechange sont utilisées. La première partie de l'approche est basée sur un algorithme génétique, qui vise à optimiser les seuils d_s et d_r pour toutes les cadences possibles, et ceci pour les deux bornes de dégradation (le pire et meilleur scénarios de dégradation). La deuxième partie est basée sur les résultats de la première partie. Cette partie de l'approche consiste à construire la séquence optimale des qualités de pièces de rechange, des seuils d_s et d_r et les cadences avec lesquelles les pièces de rechange sont utilisées. Une analyse de sensibilité a été réalisée portant sur la première partie de notre approche. Par la suite, nous avons appliqué à la deuxième partie de l'approche sur les deux bornes de dégradation (le pire et meilleur scénarios de dégradation), ce qui a permis de limiter la quantité produite par le système, sur l'horizon de la mission.

Partie 2 Système de production multi-machines

Chapitre 6 Sélection des machines sous critères de maintenance et satisfaction de demande

6.1 Introduction

L'optimisation des systèmes de production comprend des décisions à différents niveaux. D'un point de vue stratégique, la conception du système de production joue un rôle important et affecte les décisions prises aux autres niveaux. Par exemple, l'emplacement des machines dans l'atelier de production réduit le temps de passage des articles entre les machines, ce qui peut améliorer le temps de planification des opérations de production.
Dans la littérature, la conception du système de production a été étudiée par plusieurs auteurs, et sous différents angles. Marques et al. [81] proposent une approche pour la conception d'un système de production flexible, intégrant la gestion des ressources de production, la planification des opérations, la logistique interne et la qualité. Dans [82], les auteurs traitent de problème de sélection des outils de la machine. Ils proposent un outil d'aide à l'estimation des coûts pour les centres d'usinage vertical à grande vitesse, en fonction des caractéristiques du produit et des exigences de productivité. Dans le cadre de l'intégration de la fiabilité et de la maintenance dans la conception du système de production, nous trouvons le travail de Huang [83], où il compare le modèle prédiction du débit avec le débit réel du système. Nahas et al. [84] proposent un algorithme génétique pour la sélection des machines et tampons pour un réseau d'assemblage/désassemblage, où chaque machine est caractérisée par le coût de possession, le taux de panne, le taux de réparation et le temps de traitement.

Le problème étudié dans ce chapitre s'inscrit dans la même catégorie que celle abordée dans [84]. Ainsi, nous traitons la problématique de sélection des machines sous contraintes de maintenance, de fiabilité et de disponibilité du système. Les machines proposées sont sujettes à détérioration stochastique. Afin de réduire le risque de défaillance, nous adoptons une politique de maintenance conditionnelle basée sur deux seuils décisionnels et un plan d'inspection périodique. Les actions de maintenance sont réalisées sous la forme d'un remplacement, ce qui nécessite des pièces de rechange. L'acquisition des pièces de rechange est réalisée dans un contexte d'une chaîne logistique en boucle fermée.

Le reste du chapitre est organisé comme suit : dans la section 6.2, nous décrivons le problème en détails. Dans la section 6.3, nous présentons la formulation mathématique du problème d'optimisation. Par la suite, nous présentons l'heuristique proposée dans la section 6.4. La section 6.5 est consacrée à la présentation d'un exemple numérique. Quelques remarques finales sont présentées dans la section 6.6.

6.2 Description du problème

Dans ce chapitre nous étudions la problématique de conception d'un système de production multi-machines. Il s'agit de sélectionner un ensemble de machines parmi un ensemble de machines candidates (susceptibles de composer le système de production) afin de garantir un seuil de production $Prod_{seuil}$ à la fin de la mission T_{miss}. La sélection des machines se fait sur la base du coût d'exploitation et de disponibilité du système résultant. En effet, les machines M_r (r=1,…,m) candidates sont indépendantes et classées en deux catégories en fonction de la technologie utilisée. Elles sont sujettes à des défaillances dues à une dégradation aléatoire continue monotone. Des actions de remplacement sont réalisées sur la base d'une politique de maintenance conditionnelle prédéterminée. Cette politique de maintenance est basée sur un plan d'inspection périodique et

deux seuils de dégradation décisionnels (d_s, d_r) pour gérer respectivement, les commandes des pièces de rechange et les remplacements préventifs. Par conséquence, le coût d'exploitation des machines dépend de la politique d'acquisition des pièces de rechange qui sont utilisées lors des remplacements.

Ainsi, ce travail relève de la problématique de conception de systèmes de production et a comme objectif l'intégration de l'optimisation de la gestion d'acquisition des pièces de rechange dans le choix des machines. L'optimisation de la gestion d'acquisition consiste à déterminer la meilleure séquence de pièces de rechange qui seront installées dans chaque machine, avec la possibilité de commander une pièce neuve à partir d'un fournisseur externe ou de réutiliser des pièces récupérées et remanufacturées par un atelier de remanufacturation. Notons que deux machines de technologies différentes ne peuvent pas utiliser le même type de pièces de rechange. Par conséquent, les pièces récupérées sont répertoriées selon la technologie dans deux stocks séparés S4 et S3. Les pièces de rechange commandées sont stockées selon la technologie dans deux stocks séparés S1 et S2. La figure 6:1 illustre le système étude :

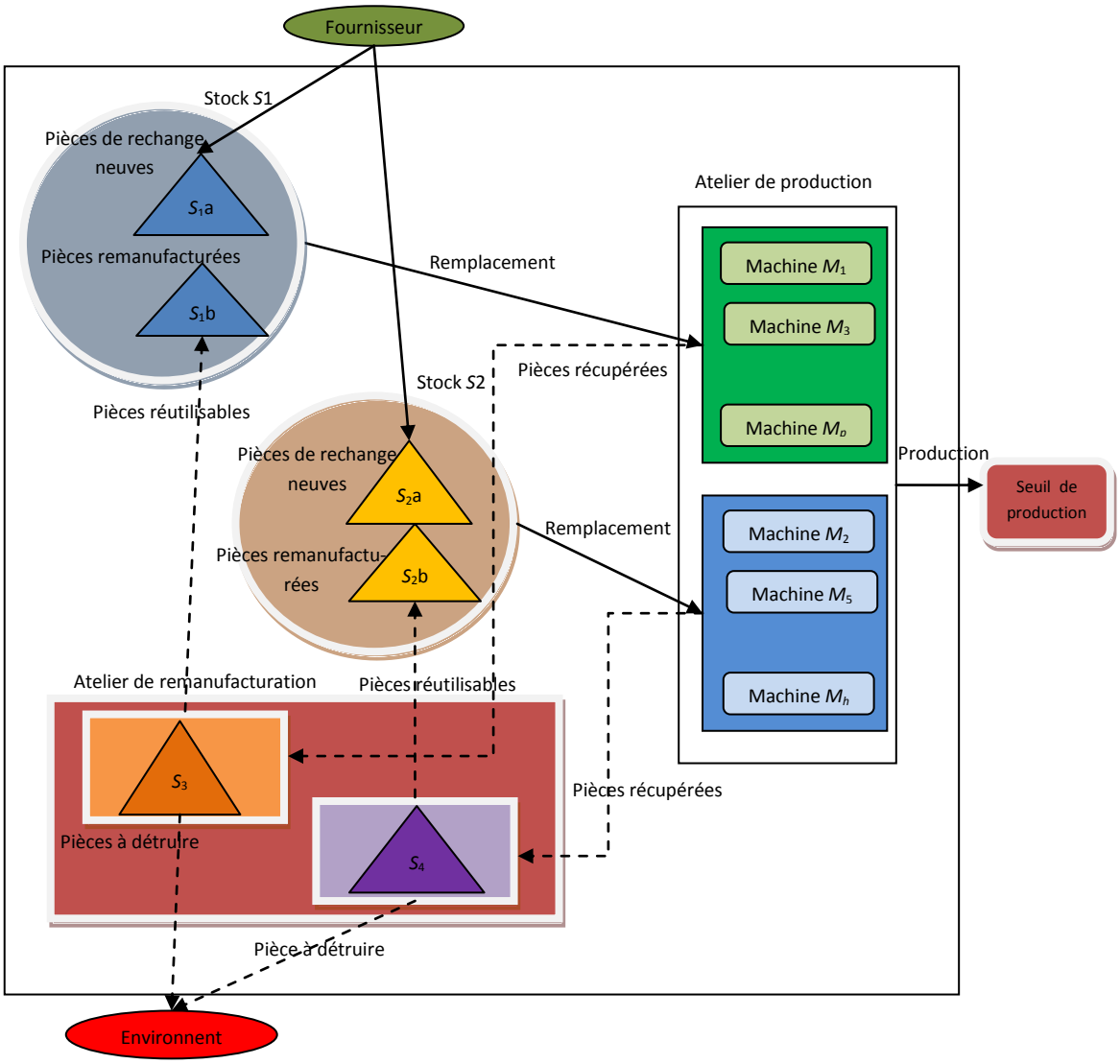


Figure 6:1 Système étudié

Les hypothèses de base du présent chapitre sont résumées comme suit :

1. La dégradation $d_r(t)$ de chaque machine r est monotone croissante et a pour incrément a_{ri} qui dépend de la qualité de la pièce de rechange installée dans la machine. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d_r(t)=d_r(t-1)+ a_{ri} \qquad (6:1)$$

a_{ri} est une variable aléatoire uniforme qui dépend la qualité i de la pièce de rechange installée dans la machine r (i = 0…n ; r=1,…,m) ; $a^{min}_{ri} \leq a_{ri} \leq a^{max}_{ri}$ et $0< a^{max}_{ri} \leq a^{min}_{ri+1}$.

2. La production vise à satisfaire un seuil de production $Prod_{seuil}$ à la fin de la mission T_{miss}, avec une cadence de production u_{Mr} qui peut être différente pour chaque machine.

3. Le fournisseur a la capacité de satisfaire la demande en pièces de rechange neuves pour les deux technologies.

4. Les décisions relatives à l'optimisation de la maintenance, à savoir les seuils de dégradation et le plan d'inspection sont prises comme étant des données d'entrée pour le problème.

5. L'atelier de remanufacturation dispose des moyens et des ressources nécessaires pour réaliser les différents niveaux de remanufacturation pour les deux technologies.

6. Les pièces de rechange destinées à remanufacturation sont disponibles dans le stock $S3$ et $S4$, en quantités limitées pour chaque qualité et pour chaque technologie. Ces quantités dépendent des qualités récupérées des machines lors des remplacements antérieurs.

7. Le niveau de remanufacturation dépend de la qualité de la pièce de rechange prise du stock ($S3$ ou $S4$) et de la qualité à installer dans la machine.

8. L'inspection est réalisée selon un plan périodique, avec une annulation des actions d'inspection comprises entre la date du lancement de la commande et l'arrivée de la pièce dans le stock.

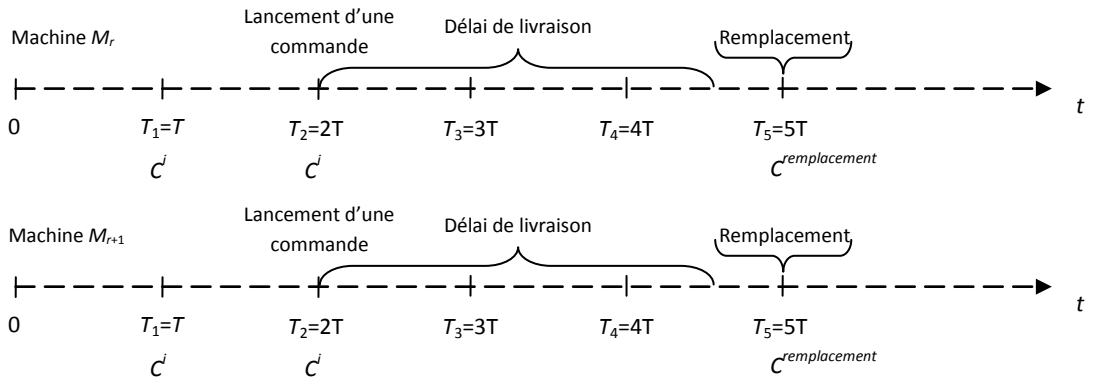


Figure 6:2 Politique périodique d'inspection adoptée

9. Le coût d'acquisition des machines sont négligeables.

6.3 Modèle mathématique

Ce chapitre est consacré à la problématique de conception d'un système de production. Le problème consiste à construire le système de production en sélectionnant des machines parmi un ensemble de machines candidates.
Dans notre étude, le critère de sélection des machines est basé sur le coût total d'exploitation du système (généré par les opérations de maintenance) et la disponibilité du système tout au long d'un horizon fini de production. La disponibilité est exprimée comme la quantité d'articles produits, devant garantir un seuil de satisfaction fixe de production. Les paramètres de politique de maintenance étant déterminés (en se basant sur les études menées dans les autres chapitres), nous visons alors à déterminer la meilleure configuration de la machine qui constitue le système, et la meilleure séquence de la pièce de rechange à utiliser pour les remplacements pendant toute la période considérée.

Ainsi, d'un point de vu mathématique, le problème consiste à déterminer l'ensemble $M=\{M_r\ ;\ r\in\{1,\ldots,m\}\}$ des machines sélectionnées pour constituer le système de production et des couples $\{(i,l)_k^{M_r}/k=1\ldots CN_{M_r}\ \ i\in\{0,\ldots,n\text{-}1\},\ l\in\{0,\ldots,n\text{-}1\}$ et $r\in\{1,\ldots,m\}\}$ définis par : la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine r lors des remplacements et la pièce choisie du stock $S3$ ou $S4$ selon la technologie de la machine (dans le cas d'une pièce remanufacturée). Le critère d'optimisation de cette problématique vise à minimiser le coût total engendré par les différentes actions réalisées.

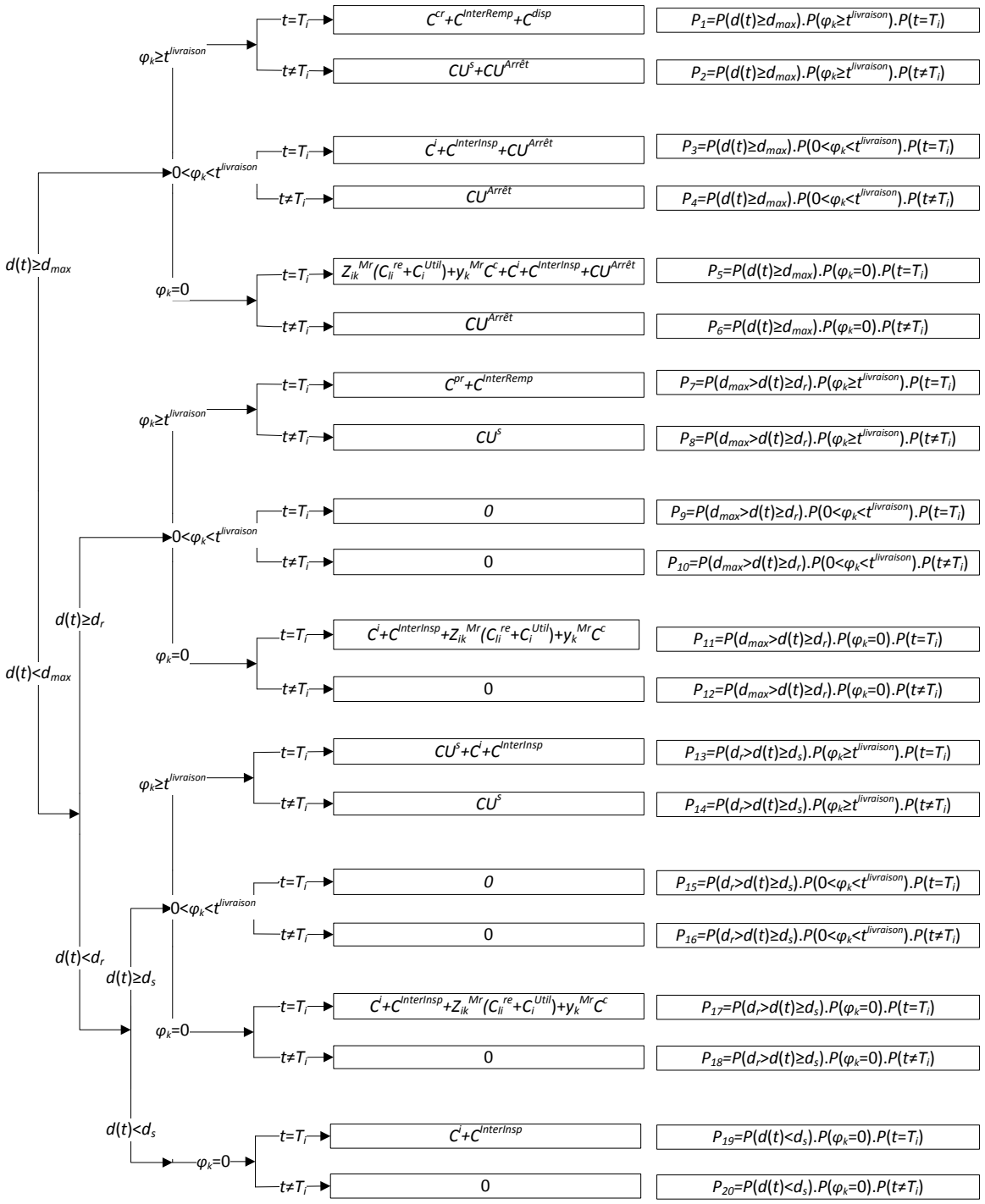


Figure 6:3 Arbre de probabilité associé.

Avec :

$C^{InterInsp}$: Coût d'intervention pour une inspection

C^{disp}: Coût de destruction d'une pièce de qualité *n*

$C^{InterRemp}$: Coût d'intervention pour un remplacement

C_{li}^{re}: Coût de remanufacturation d'une pièce de qualité *l*, afin d'obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

C_i^{Util}: Coût d'utilisation d'une pièce de rechange de qualité *i*

$$v_{M_r} = \begin{cases} 1 & Si\ la\ machine\ M_k\ est\ sélectionnée\ pour\ farire\ partie \\ & du\ système\ de\ production \\ 0 & sinon \end{cases}$$

$$z_{ik}^{M_r} = \begin{cases} 1\ si\ une\ pièce\ remanufacturée\ de\ qualité\ i\ est\ placée\ dans\ la\ machine\ r \\ au\ début\ du\ cycle\ k \\ 0\ sinon \end{cases}$$

$$y_k^{M_r} = \begin{cases} 1\ si\ une\ pièce\ neuve\ est\ commandée\ durant\ le\ cycle\ k-1\ pour\ être\ palcée\ dans \\ la\ machine\ r\ au\ début\ du\ cycle\ k \\ 0\ sinon \end{cases}$$

$$x_{lk} = \begin{cases} 1\ si\ une\ pièce\ de\ qualité\ l\ est\ prise\ du\ stock\ S2\ pour\ être\ remanufacturée\ durant \\ le\ cycle\ k-1\ et\ placée\ dans\ la\ machine\ au\ début\ du\ cycle\ k \\ 0\ sinon \end{cases}$$

$$s_{hk}^{M_r} = \begin{cases} 1\ si\ une\ pièce\ de\ qualité\ h\ est\ récupérée\ de\ la\ machine\ r\ à\ la\ fin\ du\ cycle\ k \\ 0\ sinon \end{cases}$$

$i \in \{1, \dots, n-1\},\ l \in \{1, \dots, n-1\},\ h \in \{1, \dots, n\},\ M_r \in M,\ k \in \{1, \dots, CN_r\}$

L'aspect aléatoire qui caractérise le processus de dégradation de chaque machine implique que l'occurrence de chaque événement est associée à une probabilité. Les probabilités que l'événement survient à l'instant *t* et les coûts engendrés sont déterminés en utilisant l'arbre de probabilité (cf. Figure 6:3). Dans cet arbre, la probabilité que la série d'événements d'une branche surviennent est égale au produit de tous les nœuds (probabilités) de cette branche. Ainsi, la fonction de coût associée à l'instant *t* de la machine *r*, s'écrit comme suit :

$$CT_t^{M_r} = \begin{pmatrix} P_1\left(C^{InterRempl} + C^{cr} + C^{disp}\right) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) + P_3\left(CU^{Arrêt}\right) \\ +P_4\left(CU^{Arrêt}\right) + P_5\left(y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util}) + C^{InterInsp} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7\left(C^{InterRempl} + C^{pr}\right) + P_8(CU^s) \\ +P_{11}\left(C^i + C^{InterInsp} + y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}\left(C_{li}^{re} + C_i^{Util}\right)\right) \\ +P_{13}\left(CU^s + C^{InterInsp} + C^i\right) + P_{14}(CU^s) \\ + P_{17}\left(C^i + C^{InterInsp} + y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util})\right) + P_{19}\left(C^{InterInsp} + C^i\right) \end{pmatrix}$$

Ainsi,

$$CT_t^{M_r} = \begin{pmatrix} (C^{InterRempl} + C^{cr})(P_1) + C^{disp}(P_1) + CU^{s}(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +(C^{InterInsp} + C^{i})(P_5 + P_{11} + P_{13} + P_{17} + P_{19}) \\ +(C^{InterRempl} + C^{pr})(P_7) + \left(y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util}) \right)(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

Cependant, les coûts liés aux interventions (de remplacement ou inspection) seront réduits à un seul coût d'intervention pour l'ensemble de machines concernées par cette même intervention (remplacement ou inspection).

La fonction coût associée au cycle *k* de la machine *r* est :

$$CT_k^{M_r} = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}^{M_r} z_{ik}^{M_r} + D_{0k}^{M_r} y_k^{M_r}} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif est exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{Min\ f = \sum_{r=1}^{m} \sum_{k=1}^{CN_r} CT_k} \qquad \textbf{(6:2)}$$

CN_r: Nombre de cycles durant la mission T_{miss} pour la machine *r*.
$D_{ik}^{M_r}$: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité *i* sur la machine *r* durant le cycle *k*, jusqu'à son remplacement.
$Prod_{seuil}$: Seuil de production désiré (à garantir).
u_{M_r} : Cadence de production de la machine *r*.

Sous les contraires suivants :

$$\sum_j^{CN_r}(\sum_{i=1}^{n-1} z_{ij}^{M_r} + y_j^{M_r}) = CN_r v_{M_r} \qquad M_r \in M$$

$$\sum_j^{CN_r}(\sum_{l=1}^{n-1} x_{lj}^{M_r} + y_j^{M_r}) = CN_r v_{M_r} \qquad M_r \in M$$

$$\sum_j^{CN_r}(\sum_{l=1}^{n-1} Ppr.s_{lj}^{M_r} + Pcr.s_{nj}^{M_r}) = CN_r v_{M_r} \qquad M_r \in M$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} lx_{lj}^{M_r} \geq \sum_{l=1}^{n-1} iz_{ij}^{M_r} \qquad \forall\, j = 1 \dots CN_r,\ \ M_r \in M$$

$$\sum_{M_r \in M}(\sum_{j=1}^{CN_r}(\sum_{i=1}^{n-1} D_{ij}^{M_r} z_{ij} + D_{0j}^{M_r} y_j) u_{M_r}) \geq Prod_{seuil}$$

Avec :

$$Q_{lj}^{S_t} \geq x_{lj}^{M_r} \qquad \forall\, j = 1 \dots CN_r$$

$$Q_{lj}^{S_t} = Q_{lj-1}^{S_t} + s_{lj-1}^{M_r} - x_{lj+1}^{M_r}$$

$$\forall\, j = 1 \dots CN_r\ ;\ \ \forall\, l \in \{1, \dots, n-1\} \qquad \forall\, t \in \{3,4\}$$

6.4 Approche proposée

Nous proposons dans cette partie de notre étude un outil d'aide à la décision destiné à faciliter le choix des machines dans une problématique de conception d'un système de production. Cet outil d'aide à la décision s'appuie sur une approche basée sur l'algorithme génétique proposé dans la section 3.3.3, qui optimise la séquence des pièces de rechange utilisée pour le remplacement sur les machines sélectionnées $(i,l)_k^{Mr}$. Par le biais de cet outil, nous présentons toutes les configurations du système (ensembles de machines) permettant de satisfaire le seuil de production demandé. Ainsi, nous appliquons l'algorithme génétique sur les configurations déterminées. Nous attirons une attention particulière au fait que dans certains cas l'algorithme génétique ne peut pas être exécuté, faute de population suffisante.

Étant donné que la dégradation de chaque machine est bornée par deux scénarios de dégradation (pire et meilleur scénarios de dégradation), nous basons notre approche sur le pire scénario de dégradation, dont la fonction de dégradation est donnée par l'équation 6:3. Ce scénario nous permettra de classifier les sous-ensembles candidats en sous-ensemble réalisable et sous-ensemble non réalisable vis-à-vis la garantie de satisfaction du seuil de production demandé. Il permettra ensuite de trier le sous-ensemble réalisable par rapport au coût total engendré. L'approche proposée est représentée dans l'organigramme de la figure 7:4 :

$$d^{max}_r(t)-d^{max}_r(t-1)= a^{max}_{ri} \qquad (6:3)$$

avec $a^{min}_{ri} \leq a_{ri} \leq a^{max}_{ri}$ et $0 < a^{max}_{ri} \leq a^{min}_{ri+1}$; $i = 0\ldots n-1$, $r=1\ldots m$.

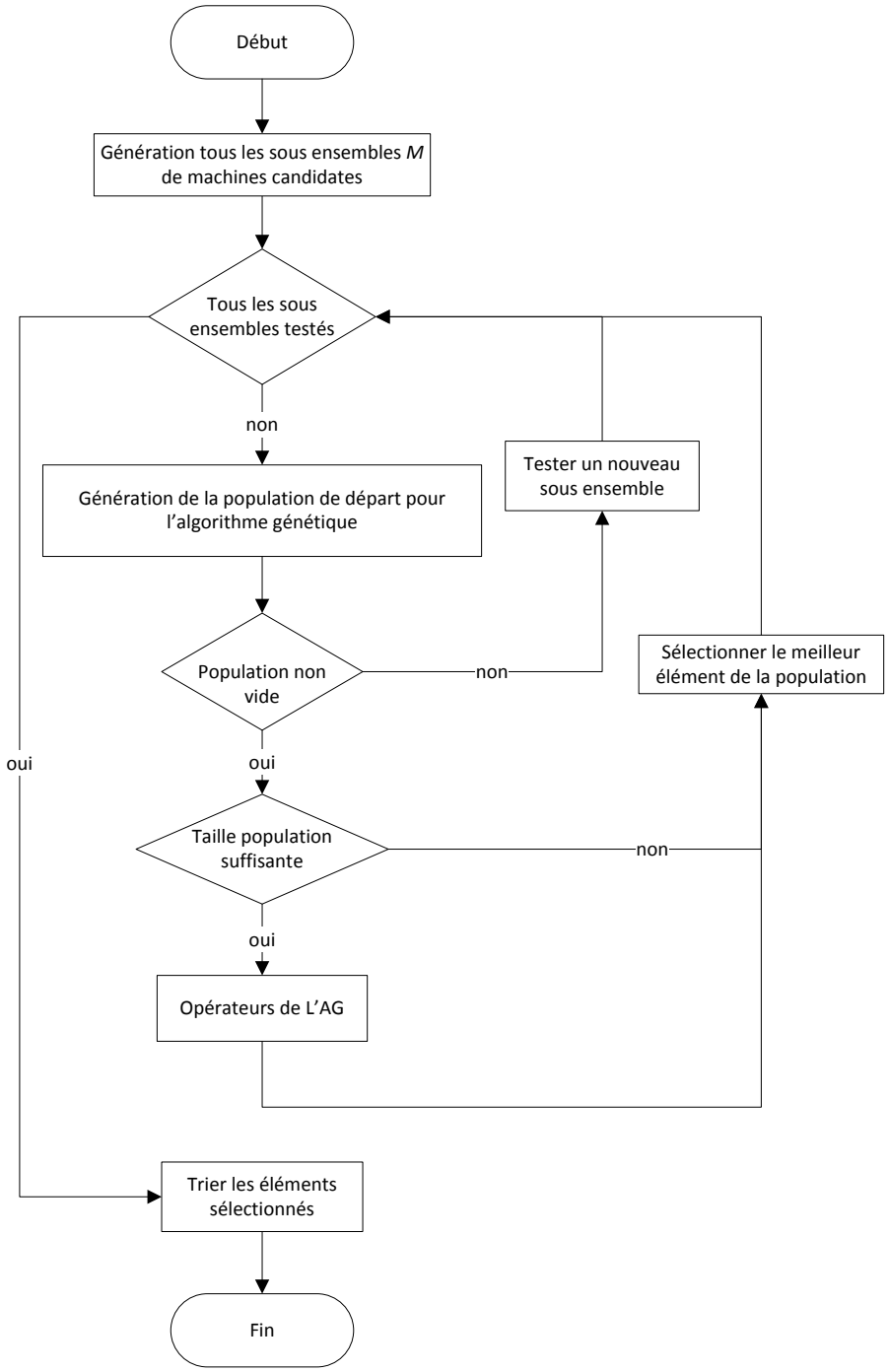


Figure 6:4 L'organigramme de l'approche proposée.

6.5 Expériences numériques et analyse

Dans cette section nous allons présenter un exemple illustratif des résultats obtenus par l'application de l'approche proposée. Nous avons considéré un exemple de 5 machines candidates, dont trois sont de technologie 1 et deux sont de technologie 2. Les machines sélectionnées vise à atteindre un seuil de production $Prod_{seuil}$=350 unités sur un horizon fini de T_{miss}=150 *ut*. Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5) pour chaque technologie, dont une qualité neuve, une qualité destiné à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanu-

facturées. Les variables aléatoires a_{ri} sont bornées par les valeurs présentées dans le tableau 6:1. Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux de dégradation initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5. La périodicité d'inspection T=4 *ut. L*es seuils décisionnels d_r et d_s dépendent de la machine et leur valeurs sont présentées dans le tableau 6:2.

Les machines M_1, M_2 et M_5 sont de technologie 1. Elles utilisent des pièces de rechange de catégorie 1 et leurs pièces de rechange remanufacturées sont prises du stock $S3$.
Pour ces pièces de rechange de catégorie 1 : le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=200 *um*. Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 6:3. L'utilisation d'une pièce de rechange remanufacturée implique un coût fixe C_1^{Util}=60 (Pour qualité 1), C_2^{Util}=30 (Pour qualité 2).
Pour cette technologie 1 : le coût d'inspection C^i=15 *um, le c*oût l'intervention pour une inspection $C^{InterRemp}$=100 *um, l*e coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um*, le coût de destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um.*

Les machines M_3 et M_4 sont de technologie 2. Elles utilisent des pièces de rechange de catégorie 2 et leurs pièces de rechange remanufacturées sont prises du stock $S4$.
Pour ces pièces de rechange de catégorie 2 : le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=10 *ut* avec un coût de C^c=150 *um.* Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 6:4. L'utilisation d'une pièce de rechange remanufacturée implique un coût fixe C_1^{Util}=55 (Pour qualité 1), C_2^{Util}=25 (Pour qualité 2)).
Pour cette technologie 2 : le coût d'inspection C^i=25 *um, le c*oût l'intervention pour une inspection $C^{InterRemp}$=110 *um, l*e coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um*, le coût de destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um.*

En plus, Le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um,* le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=500 *um,* le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S1$ est CU^s=3 *um/pièce/ut.* Les cadences de production des machines sont : u_{M1}=4, u_{M2}=3, u_{M3}=2, u_{M4}=3 et u_{M5}=2. Les états des stocks $S3$ et $S4$ au début de la mission t=0 sont présentés dans tableau 6:5.

	a^{Min}_{r0}	a^{Max}_{r0}	a^{Min}_{r1}	a^{Max}_{r1}	a^{Min}_{r2}	a^{Max}_{r2}	a^{Min}_{r3}	a^{Max}_{r3}
Machine 1	0.1	1	0.5	2	0.9	3	1.3	4
Machine 2	0.1	1	1	1.9	1.9	2.8	2.8	3.7
Machine 3	0.1	2	2	4	4	6	6	8
Machine 4	0.1	1	1	3	3	5	5	7
Machine 5	0.1	1	1	2.5	1.9	4	2.8	5.5

Tableau 6:1 Les bornes des variables aléatoire a_{ri} de chaque machine.

	Machine 1	**Machine 2**	**Machine 3**	**Machine 4**	**Machine 5**
d_r	10.9	11.6	10.6	10.1	9.96
d_s	7.87	9.13	7.59	7.16	7.11

Tableau 6:2 Les seuils décisionnels utilisés pour chaque machine.

	3->2	3->1	2->1
Coût de remanufacturation	8	10	7
Temps de remanufacturation	2	2	3

Tableau 6:3 Les temps et les coûts de remanufacturation.

	3->2	3->1	2->1
Coût de remanufacturation	7	9	6
Temps de remanufacturation	1	6	2

Tableau 6:4 Les temps et les coûts de remanufacturation.

	Qualité 1	Qualité 2	Qualité 3
S3	0	1	2
S4	2	1	4

Tableau 6:5 L'état initial des stocks S3 et S4.

Le tableau 6:6 représente les cas de configuration du système de production qui assurent une production qui dépasse le seuil souhaité.
Le cas 1 représente la configuration du système de production qui dépasse le seuil de satisfaction avec le coût le plus bas. Nous remarquons que l'algorithme génétique proposé n'est pas appliqué sur ce cas de configuration, ce qui signifie que la taille suffisante n'a pas été atteinte lors de sa génération de la population initiale. En outre, ce cas de configuration (cas 1) avec M_2 et M_4 comme une machine sélectionnée parmi les cinq machines proposées possède le meilleur rapport en quantité produite/coût total. Si nous comparons le cas 1 avec le cas 8, qui a le second coût le plus bas, nous nous apercevrons que la quantité produite augmente de 13% pour une augmentation du coût total de 30%.

Les résultats trouvés par cette méthode représentent une limite supérieure du coût total pour la meilleure séquence de pièces de rechange installées dans les machines sélectionnées. Ils permettent au décideur d'avoir une idée de conception possible du système de production dans le cas le plus pessimiste capable de garantir les impératifs de la production.

Cas	Machines sélectionnées	AG	Coût total	quantité produite	Séquence de pièces de rechange installée	Niveau des stocks
1	(M_2,M_4)	Non	31355	351	M_2: 1 1 0 0 2 0 0 0 0 M_4: 0 1 2 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 4
2	(M_2,M_4,M_5)	Oui	47149	407	M_2: 2 2 0 0 0 0 0 0 0 M_4: 1 0 0 0 0 0 0 0 0 M_5: 1 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 2 0 3
3	(M_2,M_3,M_4)	Oui	50708	355	M_2: 1 0 0 0 1 0 0 0 M_3: 2 0 1 0 0 0 0 0 0 0 M_4: 1 1 0 3 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 1 S_4: 0 0 0
4	(M_2,M_3,M_4,M_5)	Oui	68350	422	M_2: 3 2 0 0 0 0 0 0 0 M_3: 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 M_4: 2 1 0 1 0 0 0 0 0 M_5: 2 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 0
5	(M_1,M_4,M_5)	Oui	46664	352	M_1: 2 0 0 0 0 0 0 M_4: 0 2 0 0 0 0 1 0 0 0 M_5: 2 0 3 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 1 0 2
6	(M_1,M_3,M_4,M_5)	Oui	66414	357	M_1: 2 2 0 0 0 0 0 0 M_3: 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 M_4: 1 2 0 0 0 0 3 0 0 0 M_5: 3 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 0
7	(M_1,M_2,M_5)	Oui	42822	354	M_1: 0 0 0 0 0 0 0 0 M_2: 1 3 0 0 0 0 0 0 M_5: 3 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 2 1 4
8	(M_1,M_2,M_4)	Oui	42129	403	M_1: 1 0 0 0 0 0 0 0 M_2: 2 0 0 0 0 0 0 M_4: 2 0 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 1 0 4
9	(M_1,M_2,M_4,M_5)	Oui	58636	509	M_1: 1 0 0 0 0 0 0 0 M_2: 3 0 0 0 0 0 0 0 M_4: 2 0 0 0 0 0 0 0 0 M_5: 3 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 2 0 3
10	(M_1,M_2,M_3,M_5)	Oui	64654	389	M_1: 1 0 0 0 0 0 M_2: 0 0 0 0 0 0 0 0 M_3: 1 0 0 0 0 0 0 0 0 M_5: 2 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 4
11	(M_1,M_2,M_3,M_4)	Oui	62843	451	M_1: 1 0 0 0 0 0 0 M_2: 2 0 0 0 0 0 0 M_3: 2 0 0 1 1 0 0 0 0 0 M_4: 1 0 0 2 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 0
12	(M_1,M_2,M_3,M_4,M_5)	Oui	80271	541	M_1: 0 0 0 0 0 0 0 M_2: 2 1 0 0 0 0 0 0 M_3: 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 M_4: 1 1 1 0 2 0 2 0 0 0 0 M_5: 2 0 0 0 0 0 0 0	S_3: 0 0 0 S_4: 0 0 0

Tableau 6:6 Les configurations du système de productions proposées.

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de sélection des machines pour la conception d'un système de production. Le système de production doit satisfaire un seuil de production durant un horizon fini. Les machines sont soumises à des défaillances dues à une détérioration monotone et stochastique, ce qui pourra provoquer leur panne. Une maintenance conditionnelle a été adoptée pour la gestion de la maintenance. Les pièces sont fournies à partir de deux sources : un atelier de remanufacturation (des pièces de rechange usées) ou un fournisseur (nouvelles pièces de rechange). Nous proposons un outil d'aide à la décision basé sur un algorithme géné-

tique, afin de faciliter le choix des machines pour le décideur. Les résultats trouvés représentent une limite supérieure pour le coût total. Ces résultats seront présentés au décideur, sous la forme d'une liste de configurations possibles du système et le choix final lui revient pour choisir la configuration à implémenter.

Chapitre 7 Optimisation de la maintenance pour *m* machines

7.1 Introduction

Pour un système de production soumis à une dégradation stochastique, il est important de connaître son niveau de dégradation, afin d'éviter la panne et ses effets négatifs. Pour cette raison, une politique de maintenance connue sous le nom de maintenance conditionnelle a été développée [13] [22]. Cette maintenance est basée sur la connaissance du niveau du système de dégradation afin de prendre des décisions vis-à-vis des actions de maintenance à réaliser. La connaissance du niveau de dégradation est réalisée par l'intermédiaire d'un système de surveillance. Cette dernière est réalisée de différentes manières : surveillance continue, inspection périodique ou inspection séquentielle. Le type de surveillance choisi dépend de la nature du système étudié. La surveillance continue [20] est utilisée dans le cas où elle peut être mise en œuvre pour détecter le niveau de dégradation avec un coût faible. Généralement, ce type de surveillance est effectué par des capteurs, qui renvoient automatiquement l'état de système. Les inspections périodiques [2] et séquentielles [23] [25] sont utilisées dans le cas où les capteurs ne peuvent pas être mis en œuvre et ce qui nécessite par conséquent une intervention humaine.

La maintenance conditionnelle est basée sur trois paramètres: la variation de la dégradation, le niveau de dégradation observé et des seuils décisionnels. Selon les seuils de décision, la maintenance conditionnelle peut être appliquée sous deux politiques différentes : la politique dite *"control limite policy*" et la politique dite "*multi-level control limite policy*". La première utilise principalement deux seuils de décision, l'un pour la gestion de la maintenance préventive et l'autre pour la gestion de la maintenance corrective [16]. Une autre version de cette politique peut comprendre un troisième seuil décisionnel qui gère la commande des pièces de rechange utilisée pour la maintenance [21]. La "*multi-level control limite policy*" utilise plusieurs seuils de décision, certains d'entre eux sont utilisés pour la planification des inspections [19].

Dans ce chapitre, nous abordons le problème de la planification des dates d'inspection pour un système soumis à une dégradation stochastique et monotone croissante. Le système est composé de *m* machines indépendantes. La maintenance de ces machines nécessite des pièces de rechange provenant de deux sources: un atelier de remanufacturation ou un fournisseur externe. L'atelier de remanufacturation utilise les pièces récupérées des machines aux remplacements précédents. Notre objectif est de proposer une heuristique afin de calculer les dates d'intervention sur les machines. L'approche est basée sur l'heuristique proposée à la section 3.3 dans le cas d'une seule machine.

Le reste du chapitre est organisé comme suit. La section 7.2 est consacrée à la description du système étudié en détail. Dans la section 7.3 nous présentons une formulation mathématique du problème. L'heuristique proposée est présentée dans la section 7.4. La section 7.5 est consacrée à la présentation d'un exemple numérique. Enfin, quelques remarques finales sont présentées à la section 7.6.

7.2 Description du problème

Dans ce chapitre, nous traitons le problème de planification des dates d'inspection réalisées sur un ensemble de machines. Cette étude est une généralisation de ce qui a été proposé dans la section 2.3. Le système étudié dans le présent chapitre est composé d'un atelier de production constitué de m machines (M_r, r=1…m) indépendantes (figure 7:1). Chaque machine est sujette à des défaillances dues à une dégradation aléatoire continue et monotone.

La planification de l'inspection rentre dans le cadre du plan de maintenance conditionnelle adoptée pour l'ensemble des machines, dont nous connaissons les seuils (d_s et d_r)$_r$, (r=1…m). Cette maintenance nécessite l'utilisation des pièces de rechange d'un seul type pour réaliser le remplacement, sachant que la gestion d'acquisition est considérée comme une donnée d'entrée pour le problème étudié. Les pièces utilisées pour le remplacement arrivent de deux sources possibles : commandées chez le fournisseur ou par la remanufacturation de pièces du stock $S2$. Dans ce cadre, notre objectif est d'optimiser le plan d'inspection de l'ensemble des machines en minimisation le coût total engendré.

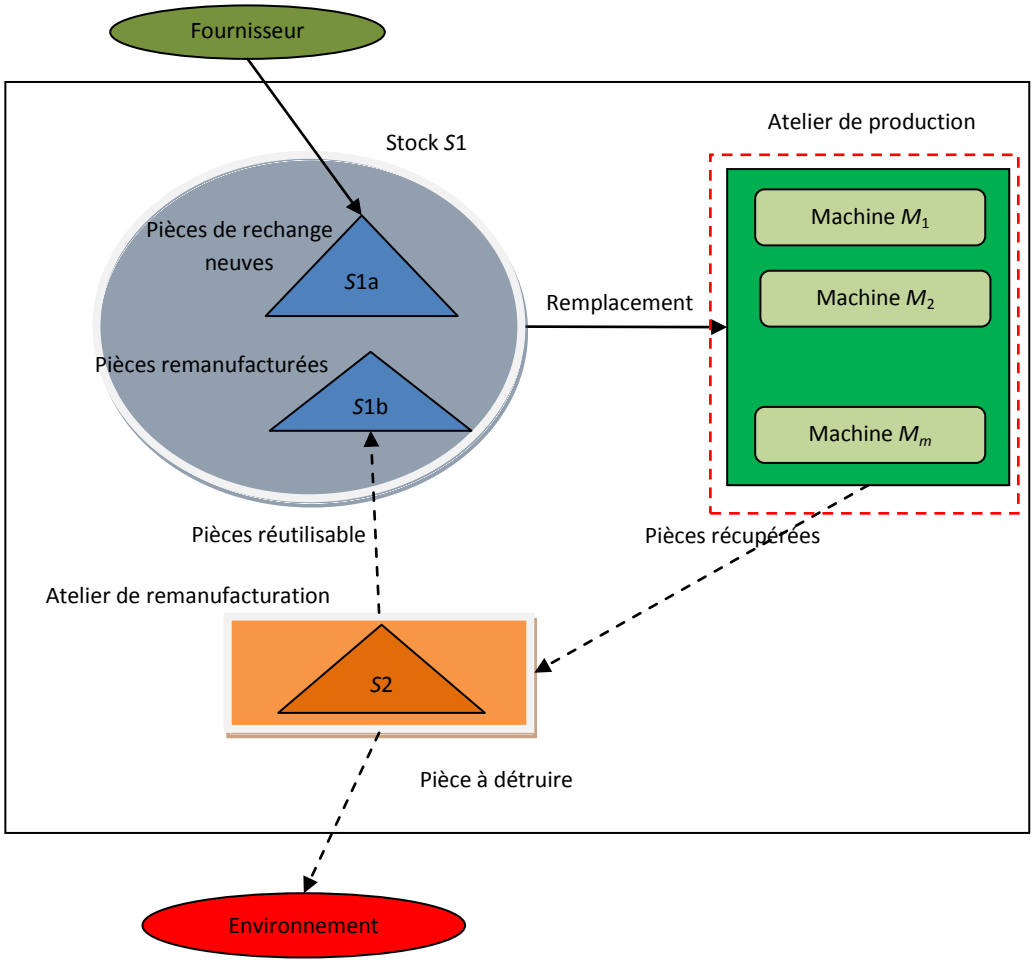


Figure 7:1 Système étudié

Les hypothèses de base de ce chapitre sont comme suit :

1. La dégradation $d_r(t)$ de chaque machine r est monotone croissante, et elle a pour incrément a_{ri}, qui dépend de la qualité de pièce de rechange installée dans la machine. Ainsi, le processus de dégradation évolue selon l'équation suivante :

$$d_r(t)=d_r(t-1)+ a_{ri} \qquad (7:1)$$

a_{ri} est une variable aléatoire uniforme qui dépend la qualité i de pièce de rechange installée dans la machine r (i = 0…n ; r=1,…,m) ; $a^{min}_{ri} \leq a_{ri} \leq a^{max}_{ri}$ et $0< a^{max}_{ri} \leq a^{min}_{ri+1}$.

2. Les décisions relatives aux commandes des pièces de rechange (commander une pièce de rechange neuve ou remanufacturer une pièce du stock $S2$) sont considérées comme des données d'entrée du problème.

3. La remanufacturation dépend seulement de la qualité de la pièce de rechange à installer dans la machine.

4. L'inspection des machines est réalisée selon un plan séquentiel, où les dates d'inspection sont calculées en utilisant une approche basée sur l'heuristique proposée dans la section 2.3 (cf. Section 7.4).

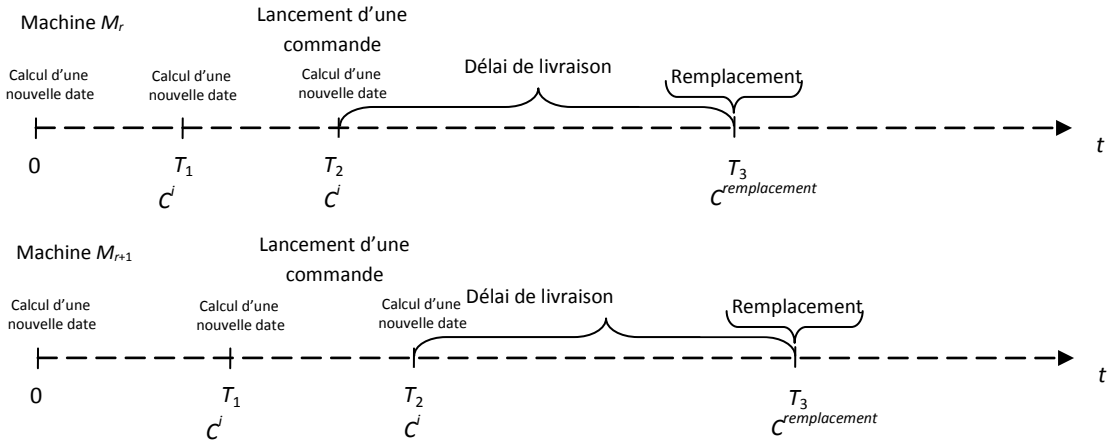


Figure 7:2 Politique séquentielle d'inspection adoptée

7.3 Modèle mathématique

L'objectif de ce chapitre est l'optimisation de la politique de maintenance, afin de minimiser le coût total engendré par les différentes actions engendrées. Il s'agit de l'optimisation du plan d'inspection constitué des dates T_i d'intervention et l'ensemble IM_{Ti} de machines concernées par chaque intervention.

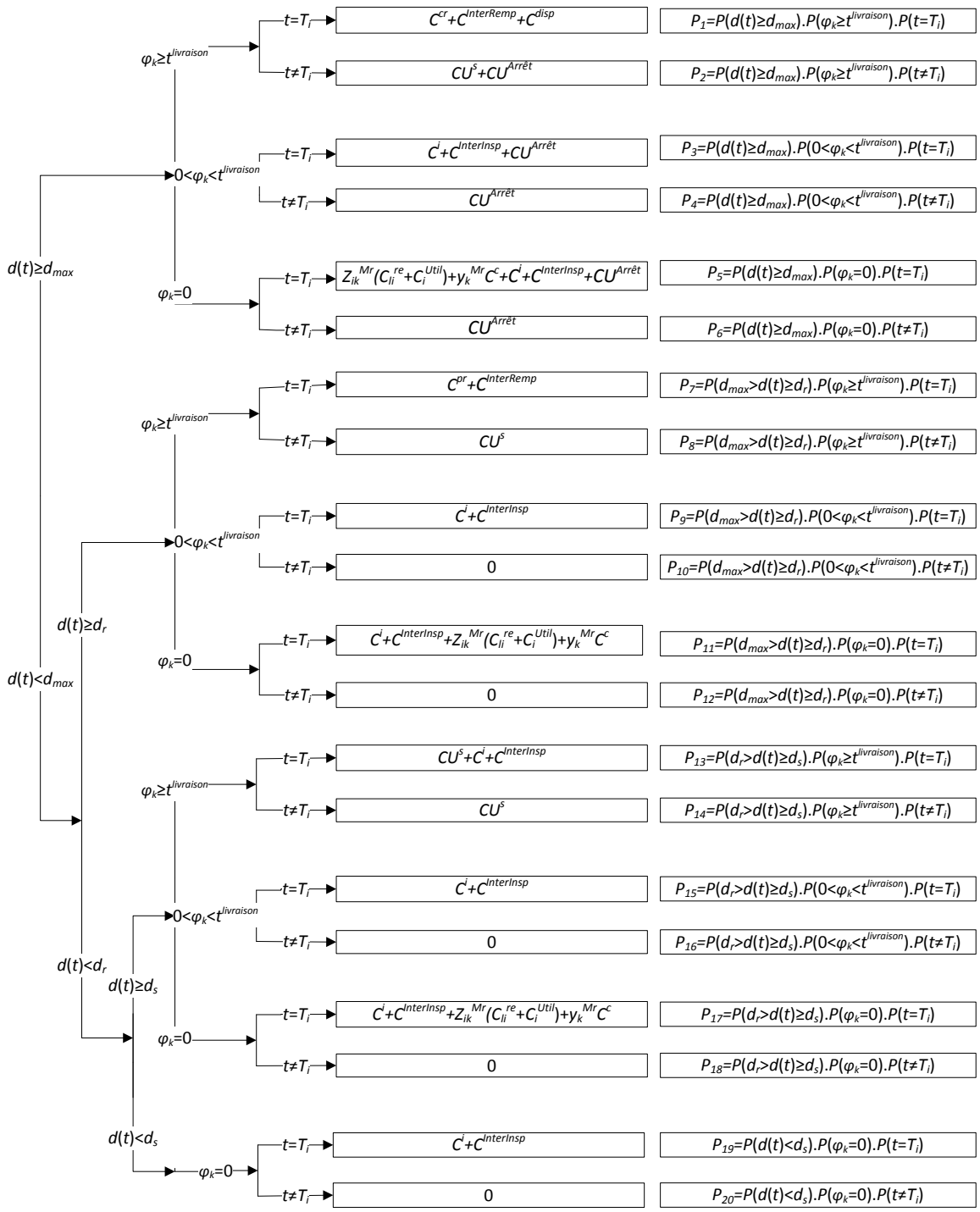


Figure 7:3 Arbre de probabilité associé.

Avec :

$C^{InterInsp}$: Coût d'intervention pour une inspection

C^{disp}: Coût de destruction d'une pièce de qualité *n*

$C^{InterRemp}$: Coût d'intervention pour un remplacement

C_{li}^{re}: Le coût de remanufacturation d'une pièce de qualité *l*, afin d'obtenir une pièce de rechange de qualité *i*

C_i^{Util}: Le coût d'utilisation d'une pièce de rechange de qualité *i*

$$z_{ik}^{M_r} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; remanufacturée \; de \; qualité \; i \; est \; placée \; dans \; la \; machine \; r \\ \qquad au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$$y_k^{M_r} = \begin{cases} 1 \; si \; une \; pièce \; neuve \; est \; commandée \; durant \; le \; cycle \; k-1 \; pour \; etre \; placée \; dans \\ \qquad la \; machine \; r \; au \; début \; du \; cycle \; k \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

$i \in \{1, \dots, n-1\}, \; l \in \{1, \dots, n-1\}, \; h \in \{1, \dots, n\}, \; M_r \in M, \; k \in \{1, \dots, CN_r\}$

En suivant la même approche que précédemment, les coûts engendrés sont déterminés en utilisant l'arbre de probabilité (figure 6:3). Dans cet arbre, la probabilité que la série d'événements d'une branche surviennent est égale au produit de tous ses nœuds (probabilités). Ainsi, la fonction de coût associée à l'instant *t* de la machine *r*, s'écrit comme suit :

$$CT_t^{M_r} = \begin{pmatrix} P_1\left(C^{InterRempl} + C^{cr} + C^{disp}\right) + P_2\left(CU^s + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_3\left(CU^{Arrêt} + C^{InterInsp} + C^i\right) + P_4\left(CU^{Arrêt}\right) \\ +P_5\left(y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util}) + C^{InterInsp} + C^i + CU^{Arrêt}\right) \\ +P_6\left(CU^{Arrêt}\right) + P_7\left(C^{InterRempl} + C^{pr}\right) + P_8(CU^s) + P_9\left(C^{InterInsp} + C^i\right) \\ +P_{11}\left(C^i + C^{InterInsp} + y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}\left(C_{li}^{re} + C_i^{Util}\right)\right) \\ +P_{13}\left(CU^s + C^{InterInsp} + C^i\right) + P_{14}(CU^s) + P_{15}\left(C^{InterInsp} + C^i\right) \\ + P_{17}\left(C^i + C^{InterInsp} + y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util})\right) + P_{19}\left(C^{InterInsp} + C^i\right) \end{pmatrix}$$

Donc :

$$CT_t^{M_r} = \begin{pmatrix} (C^{InterRempl} + C^{cr})(P_1) + C^{disp}(P_1) + CU^s(P_2 + P_8 + P_{13} + P_{14}) \\ +CU^{Arrêt}(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \\ +(C^{InterInsp} + C^i)(P_3 + P_5 + P_9 + P_{11} + P_{13} + P_{15} + P_{17} + P_{19}) \\ +(C^{InterRempl} + C^{pr})(P_7) + \left(y_k^{M_r} C^{or} + z_{ik}^{M_r}(C_{li}^{re} + C_i^{Util})\right)(P_5 + P_{11} + P_{17}) \end{pmatrix}$$

Cependant, les coûts liés aux interventions (pour remplacement ou inspection) seront réduits à un seul coût d'intervention pour l'ensemble de machines concernées par la même intervention (remplacement ou inspection).

La fonction coût associée au cycle *k* de la machine *r* est :

$$CT_k^{M_r} = \sum_{t=1}^{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ik}^{M_r} z_{ik}^{M_r} + D_{0k}^{M_r} y_k^{M_r}} CT_t$$

Ainsi, la fonction objectif est :

$$\boldsymbol{Min \; f = \sum_{r=1}^{m} \sum_{k=1}^{CN_r} CT_k} \qquad \textbf{(7:2)}$$

CN_r: Nombre de cycles durant la mission T_{miss} pour la machine *r*.
$D_{ik}^{M_r}$: Le durée d'utilisation de la pièce de rechange de qualité *i* sur la machine *r* durant le cycle *k*, jusqu'à son remplacement.

7.4 Approche proposée

Avant d'entamer la présentation de l'approche proposée, nous tenons à rappeler que les interventions réalisées sur une machine se divisent en deux catégories, selon le niveau de dégradation observé : des interventions pour la détermination du niveau de dégradation et des interventions pour réaliser les remplacements (correctifs ou préventifs). En outre, la planification du remplacement dépend directement de la disponibilité de la pièce de rechange, ce qui implique que ce type d'intervention ne pourra pas être anticipé ni retardé, puisque tout retard impliquera la non disponibilité de la machine en question. Cependant, les interventions réalisées pour inspecter le niveau de dégradation de la machine sont flexibles. A partir de cette constatation, nous avons proposé une approche de regroupement des dates d'inspection afin de réduire le nombre d'intervention de ce type, dans le but de réduire le coût total engendré. Cette approche heuristique (Heuristique_Inspection_2) est proposée en deux versions, selon les règles utilisées pour regrouper les dates d'inspection (Règles-V1 et Règles-V2). Le tableau 7:1 résume les étapes de cette heuristique.

1. À l'aide Heuristique_Inspection_1 : Calculer les dates d'intervention pour chaque machine.
2. Divisez les dates proposées par heuristique H1 en deux catégories: des dates d'interventions pour inspection et des dates d'intervention pour remplacement.
3. Planifier les interventions de remplacement à la date donnée par heuristique H1.
4. Planifier une intervention pour une inspection à la date qui correspond à la date au plus tôt (ou au plus tard), parmi celles proposées par heuristique H1.
5. Appliquer les règles Règles-V1 (ou règle-V2) sur les machines à inspecter.
6. Répétez les étapes 1 à 5.

Tableau 7:1 Les étapes de Heuristique_Inspection_2.

Le regroupement des inspections est réalisé selon les Règles-V1 ou Règles-V2, basées sur les deux scénarios de dégradation qui bornent la dégradation réelle de la machine, à savoir, le pire et le meilleur scénarios de dégradation donnés par les équations 7:3 et 7:4 :

$$d^{min}_r(t)-d^{min}_r(t-1)= a^{min}_{ri} \qquad (7:3)$$

$$d^{max}_r(t)-d^{max}_r(t-1)= a^{max}_{ri} \qquad (7:4)$$

$a^{min}_{ri} \leq a_{ri} \leq a^{max}_{ri}$ et $0 < a^{max}_{ri} \leq a^{min}_{ri+1}$; $i = 0\ldots n-1$, $r=1\ldots m$.

Avant de présenter les Règles-V1 et Règles-V2, il est nécessaire de poser les définitions suivantes :

- Soit $\underline{T_I} := T^P_{M_r}$ la date au plus tôt, parmi celles proposées par Heuristique_Inspection_1.
- Soit $\overline{T_I} := T^P_{M_r}$ la date au plus tard, parmi celles proposées par Heuristique_Inspection_1.

- $\{r_1,...,r_{mr}\}$ est l'ensemble des machines susceptibles à être inspecter et IM_{TI} l'ensemble des machines à inspecter à la date T_I.
- Soit $T_{M_h}^M$ l'instant où le meilleur scénario de dégradation de la machine $M_h \in \{r_1,...,r_{mr}\}$ dépasse le seuil d_s ou d_r.
- Soit $T_{M_h}^P$ l'instant où le pire scénario de dégradation de la machine $M_h \in \{r_1,...,r_{mr}\}$ dépasse le seuil d_s ou d_r.

Les Règles-V1 et Règles-V2 sont présentées comme suit :

La première règle consiste à anticiper toutes les interventions qui servent à inspecter la machine et qui vérifient la condition 1.

<u>Règles-V1</u> :

Pour tout $h \in \{r_1, \dots, r_{m_r}\}$

Si $(T_{M_r}^M > T_{M_h} > \underline{T_I})$ ***alors*** **// Condition 1**

La machine M_h est ajoutée à l'ensemble IM_{TI} avec une probabilité de

$$P_{M_h}^I = \left(\left((T_{M_h} - \underline{T_I}) \middle/ (T_{M_r}^M - \underline{T_I}) \right) \right)$$

FinSi

FinPour

La deuxième règle consiste à retarder toutes les interventions qui servent à inspecter la machine et qui vérifient la condition 2.

<u>Règles-V2</u> :

Pour tout $h \in \{r_1, \dots, r_{m_r}\}$

Si $(T_{M_h}^M > \overline{T_I} > T_{M_h}^P)$ ***alors*** **// Condition 2**

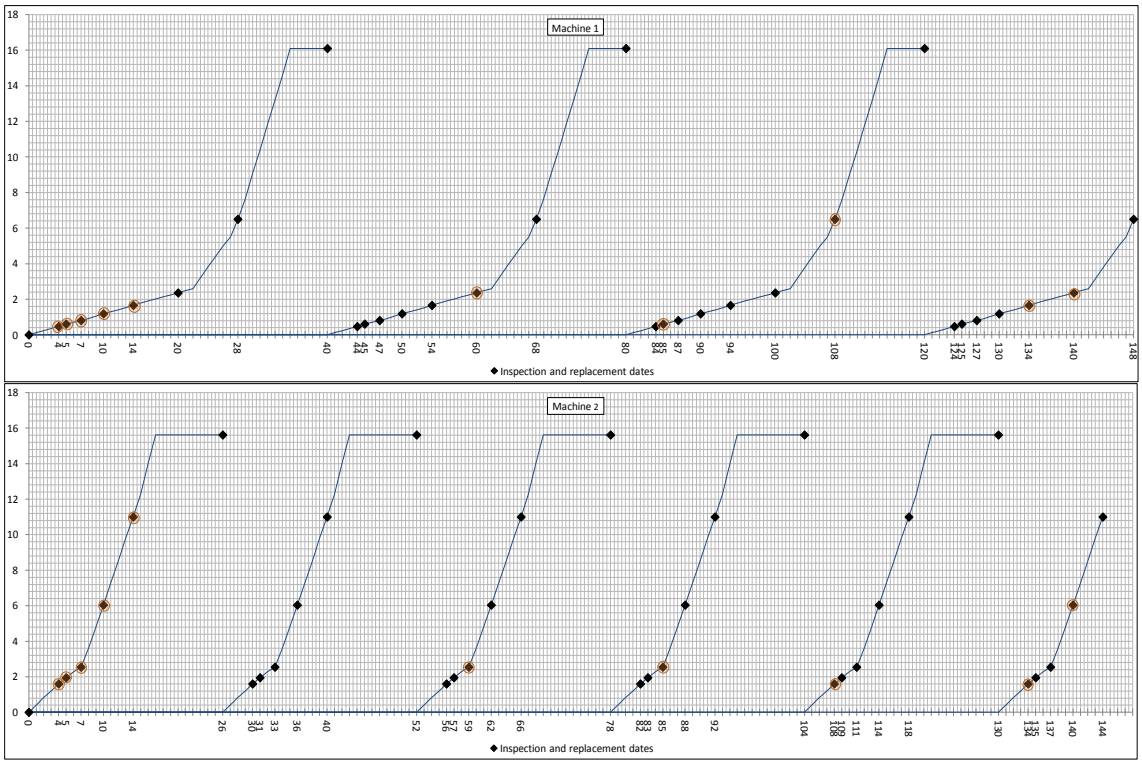
La machine M_h est ajoutée à l'ensemble IM_{TI} avec une probabilité de

$$P_{M_h}^I = \left(\left((\overline{T_I} - T_{M_h}^P) \middle/ (T_{M_h}^M - T_{M_h}^P) \right) \right)$$

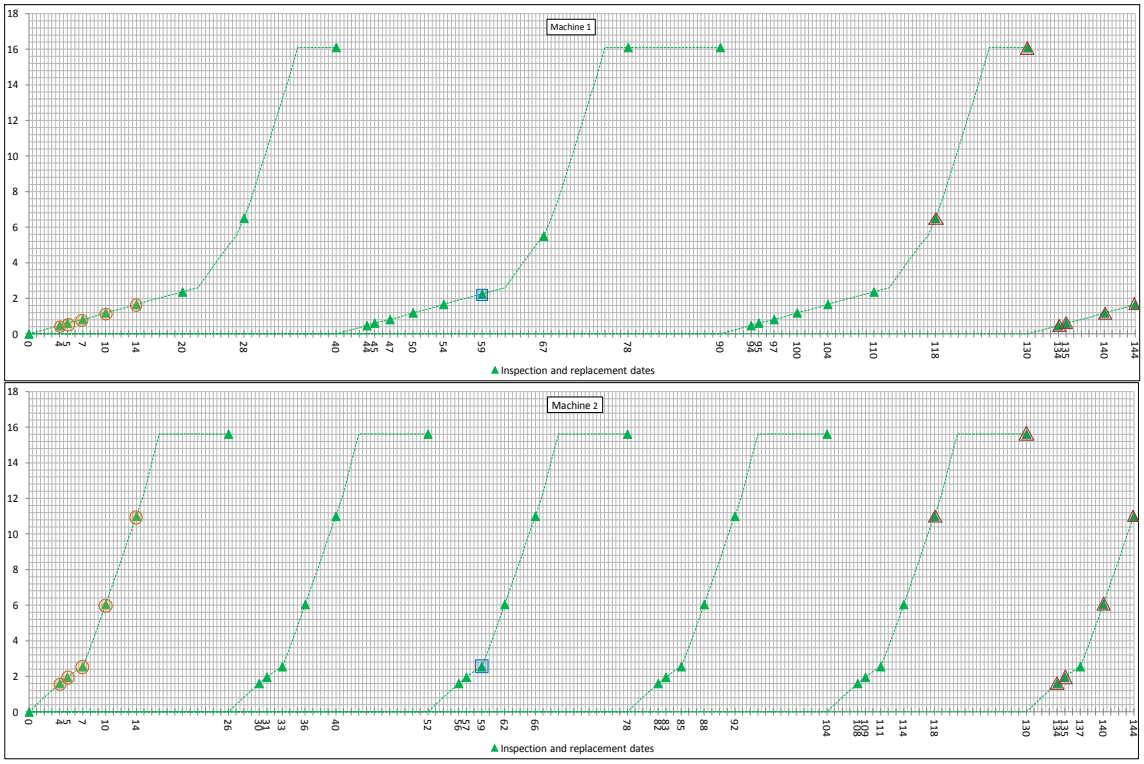
FinSi

FinPour

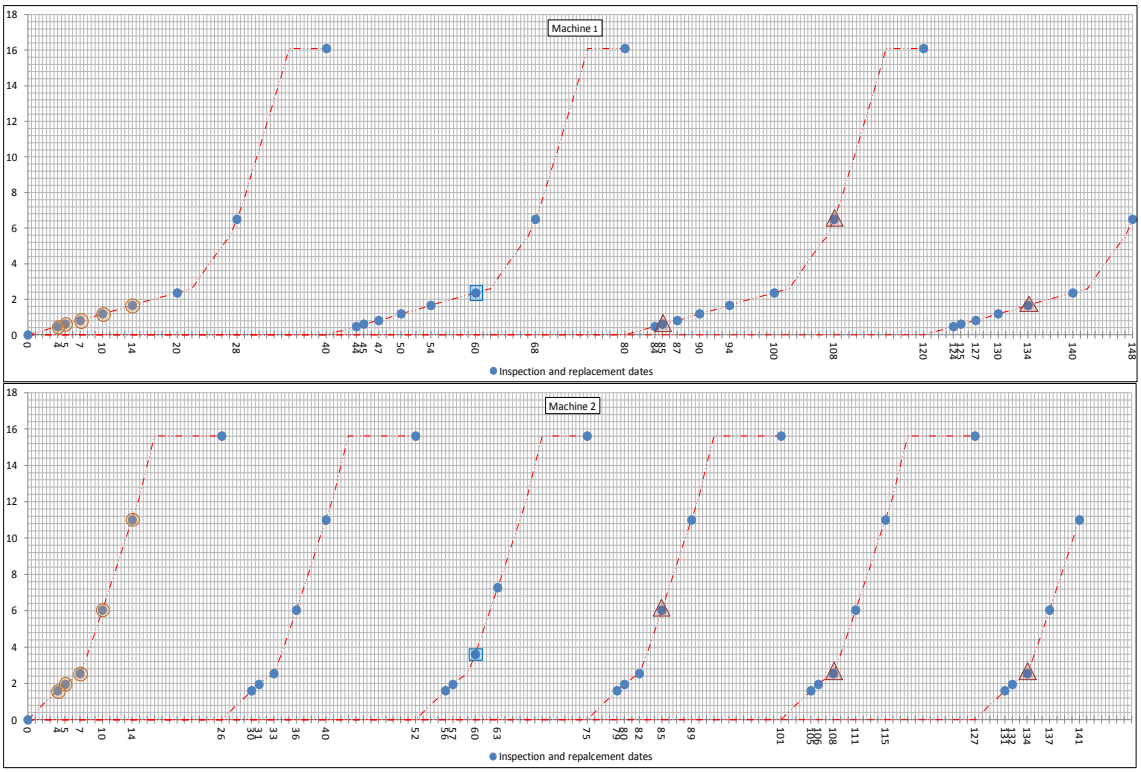
Prenons un exemple illustratif permettant de comparer les résultats obtenus par l'application de l'Heuristique_Inspection_2, dans ses deux versions (Règles-V1 et Règles-V2) et ceux trouver sans regroupement. La figure 7:4 donne une illustration des résultats des trois méthodes sur le même exemple de dégradation, appliquées sur un système composé de deux machines :



(a) Sans Heuristique_Inspection_2



(b) Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1)



(c) Heuristique_Inspection_2 (Règles-V2)

Figure 7:4 Dates d'inspection et de remplacement

- Les dates Inspections et remplacements qui se coïncident sans utilisation de l'Heuristique_Inspection_2
- Inspections regroupées en utilisant l'Heuristique_Inspection_2
- Les dates Inspections et remplacements qui se coïncident après utilisation de l'Heuristique_Inspection_2

La figure 7:4 représente les dégradations réelles de deux machines sur un horizon T_{miss}=150, et les dates d'inspection et de remplacement proposées par les trois méthodes. Dans la figure 7:4 (a), les dates d'inspection qui coïncident sont distinguées par des cercles. Sur les figures 7:4 (b) et 7:4 (c) les dates d'inspection qui coïncident sont distinguées par des cercles et les dates obtenues par le regroupement en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 sont distinguées par des carrés.

En comparant les résultats illustrés à travers les trois parties de la figure 7:4, nous remarquons que sans l'application de l'Heuristique_Inspection_2, nous devons intervenir à T = 59 sur la machine 2, et à T = 60 sur la machine 1. En appliquant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1), nous intervenons seulement à T = 59 pour les deux machines. En appliquant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V2), nous intervenons uniquement à T = 60 pour les deux machines. Remarquons aussi que l'application de l'Heuristique_Inspection_2 a un impact sur les dates interventions ultérieures au regroupement, ce qui affecte certainement le coût total généré.

Les dates qui coïncident après le regroupement en utilisant l' Heuristique_Inspection_2, sont distinguées par des triangles dans les figures 7:4 (b) et 7:4 (c). L'impact des trois méthodes sur le coût total sera étudié dans la section suivante.

7.5 Expériences numériques et analyse

Afin de comparer les trois méthodes, nous avons appliqué plusieurs séquences de pièces de rechange installées dans les machines. Les qualités installées dans une machine sont identiques, mais les scénarios de dégradation sont différents. En plus, nous avons examiné les différentes possibilités de remanufacturation de pièces de rechange installées dans une machine, par exemple, la pièce de rechange de qualité 1 peut être le résultat de remanufacturation de pièce de qualité 2, 3 ou peut être une pièce de qualité 1 sans remanufacturation. Soit (x, y) le couple de pièces, telle que la pièce de rechange de qualité x est le résultat d'une remanufacturation d'une pièce de rechange de qualité y. Pour chaque qualité apte à être installée dans la machine, nous générons sept scénarios de dégradation. Les scénarios sont numérotés de 1 à 7, où le scénario 1 ($S1$) représente le scénario de dégradation la plus lente et le scénario 7 ($S7$) représente le scénario de la dégradation la plus rapide.

Le système étudié est composé de deux machines fonctionnant sur un horizon de durée finie T_{miss}= 150. Les données restantes sont détaillées comme suit :

Nous disposons de cinq qualités de pièce de rechange (n=5), dont une qualité neuve, une qualité destinée à la destruction et trois qualités de pièces de rechange remanufacturées. Les variables a_i sont bornées par les valeurs suivantes : a^{min}_{r0} =0.5, a^{max}_{r0} =1, a^{min}_{r1}=0.5, a^{max}_{r1} =5, a^{min}_{r2}=0.9, a^{max}_{r2} =9, a^{min}_{r3}=1.3, a^{max}_{r3} =13. Le seuil de panne d_{max}=15. Les niveaux dégradations initiaux des pièces remanufacturées sont L_1=2.5, L_2=5 est L_3=7.5. Le délai de livraison d'une pièce de rechange de qualité 0 (neuve) est t^c=12 *ut* avec un coût de C^c=200 *um*. Les temps et les coûts de remanufacturation sont présentés dans le tableau 7:2. L'utilisation d'une pièce de rechange remanufacturée implique un coût fixe C_1^{Util}=60 (Pour qualité 1), C_2^{Util}=30 (Pour qualité 2). Le coût unitaire de stockage d'une pièce de rechange dans $S2$ est CU^s=3 *um/pièce/ut*. Le coût d'inspection C^i=25 *um*. Coût d'intervention pour une inspection $C^{InterInsp}$=100 *um*. Le coût d'une maintenance préventive est C^{pr}=50 *um*. Le coût d'une maintenance corrective est C^{cr}=500 *um*. Le coût d'intervention pour un remplacement $C^{InterRemp}$=200 *um*. Le coût unitaire dû à l'arrêt de la machine est $CU^{Arrêt}$=20 *um/ut*. Le coût de destruction d'une pièce de rechange est CU^{disp}=20 *um*.

	3->2	**3->1**	**2->1**
Coût de remanufacturation	8	10	7
Temps de remanufacturation	2	7	3

Tableau 7:2 Les temps et les coûts de remanufacturation.

Les seuils décisionnels d_s et d_r dépendent de la qualité de pièce de rechange installée dans la machine ainsi que la qualité de la pièce de rechange qui sera installée par la suite et son niveau de remanufacturation. Les tableaux 7:3 et 7:4 représentent les différents seuils utilisés respectivement d_s et d_r.

		Pièce de rechange à installer et sa qualité de départ						
Pièce de rechange installée		(0,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,2)	(2,3)	(3,3)
	0	6.33	2.34	6.53	6.73	2.43	7.35	2.47
	1	10.83	4.37	11.88	11.35	4.37	10.83	4.87
	2	10.08	7.35	10.58	11.61	8.21	11.35	7.77
	3	10.41	10.83	8.21	10.83	3.45	11.09	5.76

Tableau 7:3 Les Seuils d_s.

		Pièce de rechange à installer et sa qualité de départ						
Pièce de rechange installée		(0,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,2)	(2,3)	(3,3)
	0	9.75	7.8	9.9	10.05	8.1	10.5	8.25
	1	12.75	8.1	13.35	13.05	8.1	12.75	8.55
	2	12.3	10.5	12.6	13.2	11.1	13.05	10.8
	3	13.35	12.75	11.1	12.75	7.2	12.9	9.3

Tableau 7:4 Les Seuils d_r.

Comme nous l'avons remarqué plus haut, les règles de regroupement sont basées sur une probabilité dite de regroupement $P_{regroup}$. Ainsi, nous présentons tout d'abord une recherche de la meilleure probabilité de regroupement à utiliser pour chacune des deux versions de l'Heuristique_Inspection_2. Nous avons appliqué les deux versions de l'heuristique avec une probabilité de regroupement $P_{regroupe}$= 1, 0.9, 0.5 et 0.1. Les tableaux 7:5 et 7:6 présentent une liste non exhaustive des résultats obtenus en appliquant l'Heuristique_Inspection_2 avec ses deux versions.

(x,y)	$P_{grouping}$	Coût total (10^3 mu)							
(0,0)	1	15.40	23.17	15.64	26.54	26.89	25.63	20.30	29.42
	0.9	15.40	23.17	15.64	26.54	26.89	25.63	20.30	29.42
	0.5	15.40	23.17	15.64	26.54	26.89	25.63	20.30	29.42
	0.1	15.40	22.07	15.64	26.54	26.89	25.30	20.30	29.42
(1,1)	1	53.91	55.54	57.77	84.17	88.82	56.26	63.15	70.92
	0.9	53.91	55.54	57.77	84.17	88.82	56.26	63.15	70.92
	0.5	53.91	55.54	57.77	84.17	88.82	56.26	63.15	70.92
	0.1	53.91	55.54	57.77	84.17	88.82	56.31	63.15	70.92
(1,2)	1	57.42	61.99	57.44	63.96	57.92	62.48	62.45	50.78
	0.9	57.42	61.99	57.44	63.96	57.92	62.48	62.45	50.78
	0.5	57.42	61.99	57.44	63.96	57.92	62.48	62.45	50.78
	0.1	57.37	61.99	57.39	63.96	57.92	62.48	62.45	50.78
(1,3)	1	47.88	47.49	46.46	46.75	44.70	43.86	41.91	33.14
	0.9	47.88	47.49	46.46	46.75	44.70	43.86	41.91	33.14
	0.5	47.88	47.49	46.46	46.75	44.70	43.86	41.91	33.14
	0.1	47.83	47.49	46.41	46.75	44.70	42.76	41.86	33.14
(2,2)	1	51.81	57.60	58.97	69.86	67.87	77.86	67.86	90.16
	0.9	51.81	57.60	58.97	69.86	67.87	77.86	67.86	90.16
	0.5	51.81	57.60	58.97	69.86	67.87	77.86	67.86	90.16
	0.1	51.81	57.60	58.97	69.86	67.87	77.86	67.86	90.16
(2,3)	1	64.53	60.37	74.76	74.26	83.07	80.47	66.86	84.91
	0.9	64.53	60.37	74.76	74.26	83.07	80.47	66.86	84.91
	0.5	64.53	60.37	74.76	74.26	83.07	80.47	66.86	84.91
	0.1	64.53	60.37	74.76	74.26	83.07	80.52	66.86	84.91
		(S1, S3)	*(S1, S5)*	*(S2, S3)*	*(S2, S7)*	*(S3, S7)*	*(S4, S6)*	*(S5, S6)*	*(S6, S7)*

Tableau 7:5 La variation du coût total en fonction de la probabilité $P_{regroup}$, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1).

(x,y)	$P_{grouping}$	Coût total (10^3 mu)							
(0,0)	1	15.40	22.91	15.64	26.70	26.82	25.63	20.30	29.64
	0.9	15.40	22.91	15.64	26.70	26.82	25.63	20.30	29.64
	0.5	15.40	22.91	15.64	26.70	26.82	25.63	20.30	29.64
	0.1	15.40	23.54	15.64	26.70	26.82	25.30	20.30	29.64
(1,1)	1	53.66	55.29	57.72	84.17	88.57	56.26	62.90	70.92
	0.9	53.66	55.29	57.72	84.17	88.57	56.26	62.90	70.92
	0.5	53.66	55.29	57.72	84.17	88.57	56.26	62.90	70.92
	0.1	53.91	55.54	57.77	84.17	88.82	56.31	63.15	70.92
(1,2)	1	57.12	61.89	57.14	63.86	64.42	62.48	62.10	50.78
	0.9	57.12	61.89	57.14	63.86	64.42	62.48	62.10	50.78
	0.5	57.12	61.89	57.14	63.86	64.42	62.48	62.10	50.78
	0.1	57.32	61.89	57.34	63.86	64.42	62.48	62.10	50.78
(1,3)	1	47.58	47.44	46.16	46.05	44.40	43.86	41.36	33.14
	0.9	47.58	47.44	46.16	46.05	44.40	43.86	41.36	33.14
	0.5	47.58	47.44	46.16	46.05	44.40	43.86	41.36	33.14
	0.1	47.83	47.49	46.41	46.75	44.70	42.76	41.86	33.14
(2,2)	1	51.76	57.55	58.92	69.87	68.48	77.86	67.86	90.37
	0.9	51.76	57.55	58.92	69.87	68.48	77.86	67.86	90.37
	0.5	51.76	57.55	58.92	69.87	68.48	77.86	67.86	90.37
	0.1	51.81	57.60	58.97	69.86	67.87	77.86	67.86	90.16
(2,3)	1	64.48	60.32	74.71	84.66	83.07	80.47	66.86	84.31
	0.9	64.48	60.32	74.71	84.66	83.07	80.47	66.86	84.31
	0.5	64.48	60.32	74.71	84.66	83.07	80.47	66.86	84.31
	0.1	64.53	60.37	74.76	74.26	83.07	80.52	66.86	84.91
		(S1, S3)	*(S1, S5)*	*(S2, S3)*	*(S2, S7)*	*(S3, S7)*	*(S4, S6)*	*(S5, S6)*	*(S6, S7)*

Tableau 7:6 La variation du coût total en fonction de la probabilité $P_{regroup}$, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V2).

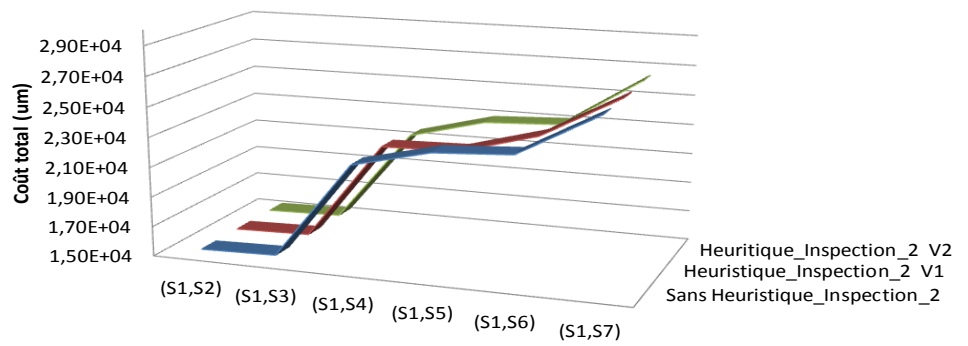
D'après les tableaux 7:5 et 7:6, nous pouvons constater que l'influence de la probabilité de regroupement sur le coût total ne suit pas une tendance linéaire, à savoir la diminution de la probabilité peut entraîner une augmentation ou une diminution du coût total, et dans certains cas aucune dépendance ne peut être relevée.

Après une analyse approfondie des résultats obtenus, nous avons été amenés à dire que l'influence du $P_{regroup}$ dépend de plusieurs facteurs : (i) les couples (x, y) (i.e. la qualité de la pièce de rechange installée dans la machine et sa qualité initiale), (ii) le scénario de dégradation de chaque machine et (iii) la version de l'Heuristique_Inspection_2. Par exemple : pour les couples (1,1) et (2,2), la probabilité de regroupement n'a pas eu d'influence sur le coût total, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1), en revanche, en utilisant l'Heuristique_Inspection_2 (Règles-V2), la diminution de la probabilité de regroupement peut augmenter le coût total (voir le tableau 8:6: (S1, S3), (S1, S5), (S2, S3)).

La conclusion qui peut être tirée de ce constat est que le groupement direct et automatique de plusieurs actions d'inspections n'est pas bénéfique à chaque fois.

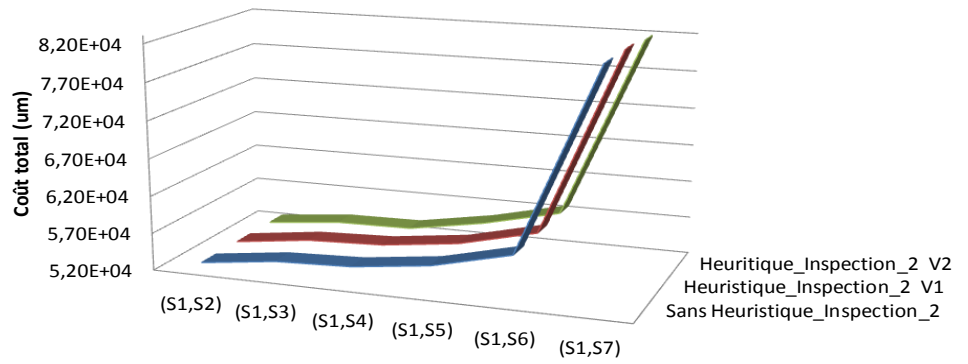
Passons maintenant à la comparaison des trois méthodes, à savoir, Heuristique_Inspection_2 (Règles-V1), (Règles-V2) et sans regroupement. Pour réaliser cette comparaison, nous utilisons la meilleure probabilité de regroupement obtenu pour chacune des deux versions de l'Heuristique_Inspection_2. Si $P_{regroup}$ n'a pas d'influence sur le coût total, nous utilisons la plus petite probabilité, à savoir, $P_{regroup} = 0.1$.

La comparaison est basée sur la règle suivante : pour chaque séquence de qualité de pièces de rechange installées dans les deux machines, nous fixons le scénario de dégradation de la machine 1 et nous faisons varier les scénarios de dégradation de la machine 2. Les résultats obtenus sont présentés par les figures 7:5, 7:6, 7:7, 7:8 et 7:9 (Les résultats présentés ne sont pas exhaustifs) :



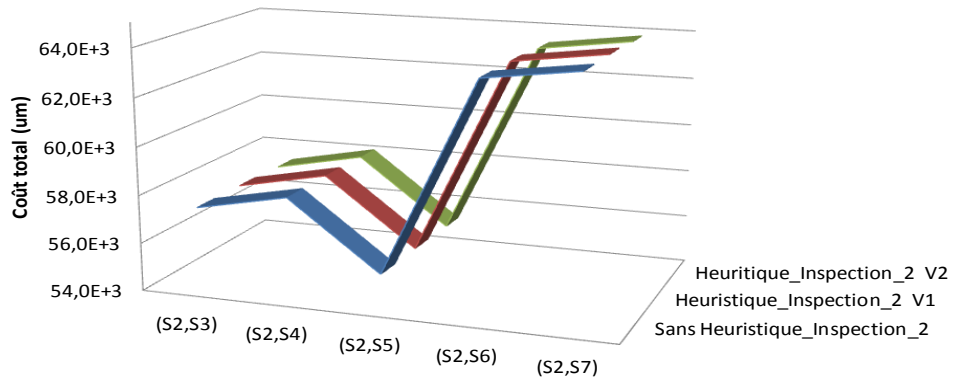
	(S1,S2)	(S1,S3)	(S1,S4)	(S1,S5)	(S1,S6)	(S1,S7)
Sans Heuristique_Inspection_2	15,3E+3	15,4E+3	21,9E+3	23,1E+3	23,4E+3	26,3E+3
Heuristique_Inspection_2 V1	15,3E+3	15,4E+3	22,0E+3	22,1E+3	23,5E+3	26,3E+3
Heuritique_Inspection_2 V2	15,3E+3	15,4E+3	21,6E+3	22,9E+3	23,2E+3	26,5E+3

Figure 7:5 Coût total en fonction du scénario de dégradation (Séquence de pièce de rechange de type (0,0))



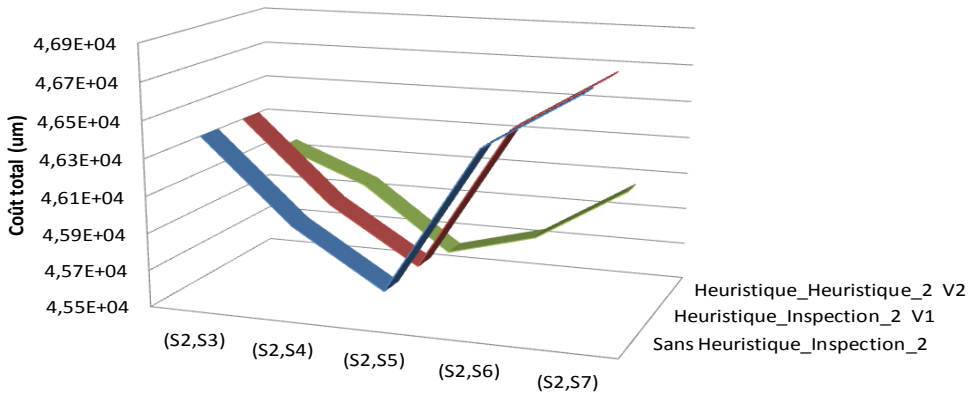
	(S1,S2)	(S1,S3)	(S1,S4)	(S1,S5)	(S1,S6)	(S1,S7)
Sans Heuristique_Inspection_2	52,7E+3	53,9E+3	54,3E+3	55,5E+3	58,0E+3	82,5E+3
Heuristique_Inspection_2 V1	52,7E+3	53,9E+3	54,3E+3	55,5E+3	58,0E+3	82,5E+3
Heuritique_Inspection_2 V2	52,7E+3	53,7E+3	53,8E+3	55,5E+3	57,9E+3	82,0E+3

Figure 7:6 Coût total en fonction du scénario de dégradation (Séquence de pièce de rechange de type (1,1))



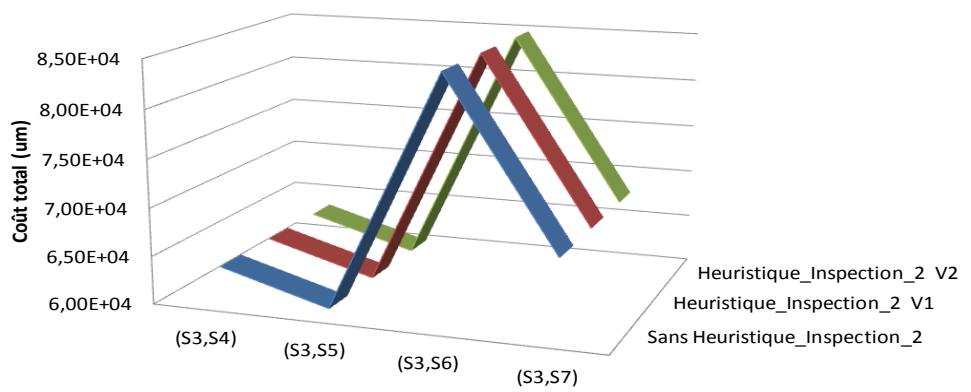
	(S2,S3)	(S2,S4)	(S2,S5)	(S2,S6)	(S2,S7)
Sans Heuristique_Inspection_2	57,4E+3	58,2E+3	55,4E+3	63,5E+3	64,0E+3
Heuristique_Inspection_2 V1	57,4E+3	58,2E+3	55,4E+3	63,5E+3	64,0E+3
Heuritique_Inspection_2 V2	57,3E+3	58,1E+3	55,3E+3	63,4E+3	63,9E+3

Figure 7:7 Coût total en fonction du scénario de dégradation (Séquence de pièce de rechange de type (1,2))



	(S2,S3)	(S2,S4)	(S2,S5)	(S2,S6)	(S2,S7)
Sans Heuristique_Inspection_2	46,4E+3	46,0E+3	45,7E+3	46,5E+3	46,8E+3
Heuristique_Inspection_2 V1	46,4E+3	46,0E+3	45,7E+3	46,5E+3	46,8E+3
Heuristique_Heuristique_2 V2	46,2E+3	46,0E+3	45,6E+3	45,8E+3	46,1E+3

Figure 7:8 Coût total en fonction du scénario de dégradation (Séquence de pièce de rechange de type (1,3))



	(S3,S4)	(S3,S5)	(S3,S6)	(S3,S7)
Sans Heuristique_Inspection_2	63,6E+3	60,4E+3	84,9E+3	67,9E+3
Heuristique_Inspection_2 V1	63,6E+3	60,4E+3	84,9E+3	67,9E+3
Heuristique_Inspection_2 V2	63,5E+3	60,3E+3	84,8E+3	67,9E+3

Figure 7:9 Coût total en fonction du scénario de dégradation (Séquence de pièce de rechange de type (2,2))

A partir des figures 7:5-7:9, nous pouvons constater que l'Heuristique_Inspection_2 V2 peut apporter une amélioration du coût total obtenu. L'amélioration peut être significative (figure 7:7) ou moyenne (figure 7:5, 7:6, 7:8 et 7:9). L'Heuristique_Inspection_2 V1 n'améliore pas le coût total, sauf pour le cas présenté dans la figure 7:5, où la machine 1 se dégrade selon le scénario *S*1 et la machine 2 se dégrade selon le scénario *S*5. Le reste des résultats démontrent que l'Heuristique_Inspection_2 peut fournir un coût total plus élevé que celui fourni dans le cas où on ne regroupe pas les inspections. Enfin, nous pouvons affirmer que l'heuristique proposée nécessite d'autres améliorations, de sorte que le groupement ne soit pas effectué automatiquement, même si les règles ont été vérifiées. Dans ce cas, des règles supplémentaires doivent être intégrées à la procédure de regroupement permettant ainsi d'avoir des performances plus stables sur l'ensemble des cas possibles.

7.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de la planification des dates d'intervention, pour un système de production composé de *m* machines indépendantes. Les machines sont soumises à des défaillances dues à une détérioration monotone et stochastique, ce qui peut provoquer leur panne. Une maintenance conditionnelle a été adoptée pour la gestion de la maintenance du système. La maintenance des machines est basée sur l'utilisation de pièces de rechange de différentes qualités pour remplacer le composant principal de chaque machine. Les pièces sont fournies à partir de deux sources : un atelier de remanufacturation (des pièces de rechange usées) ou un fournisseur (nouvelles pièces de rechange). Notre contribution a été de proposer une heuristique à deux variantes afin de calculer les dates d'intervention sur les machines. L'heuristique consiste à regrouper des dates d'intervention, pour l'inspection du niveau de dégradation des machines, selon des règles prédéfinies. Les résultats ont montré que l'heuristique peut apporter

des améliorations, par une de ses variantes. Cependant, elle nécessite l'introduction de nouvelles règles de regroupement.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la problématique d'intégration de la chaîne logistique dans la maintenance d'un système de production soumis à une dégradation stochastique. Nous avons adopté une politique de maintenance conditionnelle basée sur l'inspection du niveau de dégradation et sur des seuils décisionnels qui gèrent les actions de maintenance. La maintenance du système nécessitait l'utilisation de pièce de rechange, représentant le composant principal du système de production. Ces pièces de rechange sont classées en plusieurs qualités. Avant de commencer à traiter les sous-problèmes qui en découlent, nous avons présenté une étude bibliographique et une présentation du contexte général qui encadre notre travail. Notre méthodologie était de présenter les hypothèses spécifiques de chaque sous-problème traité, avant de de proposer sa formulation mathématique, et de présenter par la suite, l'approche proposée pour résoudre ce sous-problème et atteindre les objectifs qui ont été fixés. L'étude de chaque sous-problème est conclue par une application numérique qui montre la performance de l'approche proposée. Les approches proposées sont basées sur des méta-heuristiques et des heuristiques constructives (Algorithmes Gloutons). Les problèmes d'optimisation étudiés ont pour objectif de minimiser le coût total engendré par les différentes actions impliquées pour la maintenance du système.

Les problématiques étudiées dans cette thèse ont été réparties en deux parties :

La première partie concernait un système de production à une seule machine. Nous avons commencé cette partie par le chapitre 2, où nous avons étudié la problématique de maintenance sans tenir en compte la gestion des pièces de rechange nécessaires pour la réalisation de l'action de maintenance. Dans ce chapitre, nous avons proposé une approchée basée sur un algorithme génétique pour l'optimisation des seuils décisionnels qui caractérisent la politique de maintenance adoptée. Cette approche a été couplée avec deux heuristiques proposées pour la détermination des dates d'inspection. La première consiste à déterminer la périodicité d'inspection [85] et la deuxième heuristique consiste à calculer les dates d'inspection d'une manière séquentielle[86]. Les résultats ont montré un avantage de la méthode séquentielle pour la détermination des dates d'inspection. Cette méthode a été ensuite utilisée dans les chapitres 4, 5 et 7. Dans un troisième chapitre [87][88], nous avons abordé la deuxième partie du problème d'intégration, à savoir la gestion d'acquisition des pièces de rechange pour une politique de maintenance conditionnelle, dont les paramètres sont définis auparavant. Dans ce chapitre, nous avons proposé un algorithme génétique pour déterminer la séquence optimale des pièces de rechange qui vont être installées dans la machine lors des remplacements. L'approche proposée a été améliorée par la suite dans le chapitre 4 pour la gestion de pièces de rechange en temps réel. Par la suite, nous avons détaillé le chapitre 4, qui traite le problème d'intégration de la chaîne logistique en boucle fermée comme source d'acquisition des pièces de rechange pour la maintenance du système. Une approche heuristique composée de deux étapes permet de construire en

temps réel, une séquence composée de pièces de rechange et des paramètres optimaux utilisés pour la maintenance le système. Les résultats obtenus sont prometteurs pouvant être validés par une comparaison avec d'autres méthodes de résolution. Enfin, nous avons terminé cette partie par le chapitre 5 qui consiste en une extension du chapitre 4. Dans ce dernier chapitre, nous intégrons à la problématique d'intégration du chapitre 4, la gestion de la production sous contrainte de contrôle de qualité. Nous avons proposé une approche constructive exécutée en deux étapes, basée sur un algorithme génétique dans sa première étape, et un algorithme glouton dans sa deuxième étape, et ceci afin de construire une séquence composée, de pièces de rechange, de paramètres de maintenance optimaux utilisés pour la maintenance du système et des cadences appliquées à chaque remplacement.

La deuxième partie de la thèse est composée de deux chapitres. Dans le chapitre 6 [89], nous avons passé à un autre niveau stratégique, afin d'étudier une problématique de sélection de machines pour la conception d'un système de production. Le critère de choix des machines était basé sur le coût d'exploitation engendré par les actions de maintenance et par la satisfaction d'un seuil de production prédéfini. Un algorithme génétique a été proposé, permettant de fournir une liste ordonnée de toutes les configurations (liste de machines) possibles du système. Ensuite, nous avons terminé cette deuxième partie de la thèse par le chapitre 7 [90] dans lequel nous avons proposé une généralisation du chapitre 2, en étudiant un système multi-machines. Nous avons proposé une heuristique de regroupement des dates d'interventions réalisées pour inspecter le niveau de dégradation du système. L'approche proposée a montré des résultats intéressants. Cependant, des améliorations des règles de regroupement seront une bonne extension à ce travail.

Cette thèse nous a permis d'étudier le problème d'intégration de la maintenance d'un système de production dans le cadre d'une chaîne logistique en boucle fermée. Ce travail nous a permis de montrer l'importance du lien qui existe entre les activités de la maintenance, la production et la chaîne logistique en boucle fermée. Les perspectives d'extensions possibles de ce travail peuvent être détaillées comme suit :

A court terme :

1. L'amélioration des résultats obtenus dans le chapitre 5 en incluant une construction en temps réel de la séquence souhaitée.
2. L'amélioration de l'heuristique de calcul des dates d'inspection en réduisant le nombre d'interventions avant que la dégradation ne dépasse le seuil d_s.
3. L'amélioration de l'heuristique proposée dans le chapitre 7 en intégrant de nouvelles règles.

A long terme :

1. Généralisation de la problématique d'intégration pour un système multi-machines.
2. Application des approches proposées sur un cas d'étude réelle (industriel), permettant de valider encore mieux les résultats obtenus.
3. Etendre la problématique de gestion des pièces de rechange à une réutilisation limitée, avec la gestion de la traçabilité des pièces de rechange.

Contributions scientifiques

Revue internationale

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « New dynamic heuristic for the optimization of opportunities to use new and remanufactured spare part in stochastic degradation context », *Journal of Intelligent Manufucaturing.*, nov. 2014, p 1-18. Doi :10.1007/s10845-014-0989-1.

Conférences internationales

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Joint Optimisation of Spare Parts Demand and Remanufacturing Policy under Condition-Based Maintenance for Stochastic Deteriorating Manufacturing System », 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 2013 (IFAC IMS), p. 414‑419. May 22 - 24, 2013. São Paulo, Brazil.

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Spare Part Returns in Stochastic Deteriorating Manufacturing System under a Condition-Based Maintenance Policy: Simulation-Based Genetic Algorithm Approach », IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control MIM 2013 (IFAC MIM), p. 1399‑1404. June 19-21, 2013. Saint Petersburg, Russia.

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Order/remanufacturing policy of spare part with recovery option for stochastic deteriorating system », IEEE 18th Conference on Emerging Technologies Factory Automation 2013 (IEEE ETFA), p. 1‑7. September 10 -13, 2013. Cagliari, Italy.

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « A New Inspection Heuristic for a Condition-Based Maintenance Policy in a Spare Part Returns Context », I*EEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2013 (IEEE SMC)*, p. 1300‑1305. October 14-16, 2013. Manchester, UK.

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Machines selection problem for the production system design under stochastic deterioration and spart parts management context », Joint International Symposium on 'The Social Impacts of the Development in Information, Manufacturing and Service Systems' '44th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE 44)' and '9th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS'14), October 14-16, 2014, Istanbul, Turkey.

H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Optimisation of sequential inspection schema in multi-component deteriorating system context: heuristic based approach », International Conference of Modeling and Simulation MOSIM 2014, November 5-7, 2014, Nancy, France.

Références bibliographiques

[1] M. A. Ilgin et S. M. Gupta, *Remanufacturing Modeling and Analysis*.

[2] L. Wang, J. Chu, et W. Mao, « A condition-based order-replacement policy for a single-unit system », *Appl. Math. Model.*, vol. 32, n° 11, p. 2274‑2289, nov. 2008.

[3] J. Wang, J. Zhao, et X. Wang, « Optimum policy in hybrid manufacturing/remanufacturing system », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 60, n° 3, p. 411‑419, avr. 2011.

[4] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « New dynamic heuristic for the optimization of opportunities to use new and remanufactured spare part in stochastic degradation context », *Journal of Intelligent Manu-fucaturing*., nov. 2014, p 1-18. Doi :10.1007/s10845-014-0989-1.

[5] « NF-EN-13306-X-60-319. Terminologie de la maintenance. Norme AFNOR, 2010. » .

[6] E. Deloux, « Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant », Université de Nantes, 2008.

[7] M. Rausand et A. Høyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.

[8] K. M. Blache et A. B. Shrivastava, « Defining failure of manufacturing machinery and equipment », in *Reliability and Maintainability Symposium, 1994. Proceedings., Annual*, 1994, p. 69‑75.

[9] R. H. Yeh, « Optimal inspection and replacement policies for multi-state deteriorating systems », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 96, n° 2, p. 248‑259, janv. 1997.

[10] M. S. Moustafa, E. Y. A. Maksoud, et S. Sadek, « Optimal major and minimal maintenance policies for deteriorating systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 83, n° 3, p. 363‑368, mars 2004.

[11] M. L. Neves, L. P. Santiago, et C. A. Maia, « A condition-based maintenance policy and input parameters estimation for deteriorating systems under periodic inspection », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 61, n° 3, p. 503‑511, oct. 2011.

[12] K. S. Park, « Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections », *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 37, n° 1, p. 97‑102, avr. 1988.

[13] A. Grall, C. Bérenguer, et L. Dieulle, « A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 76, n° 2, p. 167‑180, mai 2002.

[14] M. Fouladirad et A. Grall, « Condition-based maintenance for a system subject to a non-homogeneous wear process with a wear rate transition », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, n° 6, p. 611‑618, juin 2011.

[15] M. Fouladirad, A. Grall, et L. Dieulle, « On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 93, n° 12, p. 1814‑1820, déc. 2008.

[16] B. Saassouh, L. Dieulle, et A. Grall, « Online maintenance policy for a deteriorating system with random change of mode », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 92, n° 12, p. 1677‑1685, déc. 2007.

[17] A. Ponchet, M. Fouladirad, et A. Grall, « Assessment of a maintenance model for a multi-deteriorating mode system », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 95, n° 11, p. 1244‑1254, nov. 2010.

[18] L. Dieulle, C. Bérenguer, A. Grall, et M. Roussignol, « Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 150, n° 2, p. 451‑461, oct. 2003.

[19] B. Castanier, A. Grall, et C. Bérenguer, « A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 87, n° 1, p. 109‑120, janv. 2005.

[20] J. Barata, C. G. Soares, M. Marseguerra, et E. Zio, « Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 76, n° 3, p. 255‑264, juin 2002.

[21] L. Wang, J. Chu, et W. Mao, « A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 194, n° 1, p. 184‑205, avr. 2009.

[22] X. Zhao, M. Fouladirad, C. Bérenguer, et L. Bordes, « Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 95, n° 8, p. 921‑934, août 2010.

[23] B. Castanier, C. Bérenguer, et A. Grall, « A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear », *Appl. Stoch. Models Bus. Ind.*, vol. 19, n° 4, p. 327–347, 2003.

[24] M. J. Newby et R. Dagg, « Optimal Inspection and Maintenance for Stochastically Deteriorating Systems: I Average Cost Criteria. », vol. 40, n° 2, p. 169‑198, 2002.

[25] H. R. Golmakani et H. Moakedi, « Optimal nonperiodic inspection scheme for a multicomponent repairable system with failure interaction using A * search algorithm », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, p. 1‑12, mai 2013.

[26] V. D. R. Guide et L. N. Van Wassenhove, « OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research », *Oper. Res.*, vol. 57, n° 1, p. 10‑18, févr. 2009.

[27] Bernard J. La Londe et James M. Masters, « Emerging Logistics Strategies », *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 24, n° 7, p. 35‑47, sept. 1994.

[28] J. T. Mentzer, W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith, et Z. G. Zacharia, « Defining Supply Chain Management », *J. Bus. Logist.*, vol. 22, n° 2, p. 1‑25, sept. 2001.
[29] S. Chopra et P. Meindl, *Supply chain management*. Pearson Prentice-Hall, 2007.
[30] R. Ganeshan et T. . Harrison, « An introduction to supply chain management », *Dep. Manag. Sci. Inf. Syst.*, vol. 303, 1995.
[31] M. Christopher, *Logistics and supply chain management : strategies for reducing costs and improving services*, London Pitman. 1992.
[32] Z. Mouloua, « Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques », Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2007.
[33] S. Lambert et D. Riopel, *Logistique inverse: revue de littérature*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, 2003.
[34] C. R. Carter et L. M. Ellram, « Reverse Logistics: A review of the literature and framework for future investigation », *J. Bus. Logist. - Counc. Logist. Manag.*, vol. 19, n° 1, p. 85‑102, 1998.
[35] J.-P. Rodrigue, B. Slack, et C. Comtois, « Green logistics (the paradoxes of) », *Handb. Logist. Supply-Chain Manag.*, vol. 2, 2001.
[36] Haw-Jan Wu et Steven C. Dunn, « Environmentally responsible logistics systems », *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 25, n° 2, p. 20‑38, mars 1995.
[37] S. L. Hart, « Beyond Greening: Strategies for a Sustainable World », *Harvard Business Review*. [En ligne]. Disponible sur: https://hbr.org/1997/01/beyond-greening-strategies-for-a-sustainable-world. [Consulté le: 18-nov-2014].
[38] Leo Kroon et Gaby Vrijens, « Returnable containers: an example of reverse logistics », *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 25, n° 2, p. 56‑68, mars 1995.
[39] M. Fleischmann, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. van der Laan, J. A. E. E. van Nunen, et L. N. Van Wassenhove, « Quantitative models for reverse logistics: A review », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 103, n° 1, p. 1‑17, nov. 1997.
[40] D. S. Rogers et R. S. Tibben-Lembke, « Going backwards: Reverse logistics trends and practices », Reno, NV, USA.
[41] S. K. Srivastava, « Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review », *Int. J. Manag. Rev.*, vol. 9, n° 1, p. 53–80, 2007.
[42] D. S. Rogers et R. Tibben-Lembke, « An Examination of Reverse Logistics Practices », *J. Bus. Logist.*, vol. 22, n° 2, p. 129‑148, sept. 2001.
[43] M. Thierry, M. Salomon, J. van Nunen, et L. van Wassenhove, « Strategic Issues in Product Recovery Management », *Calif. Manage. Rev.*, vol. 37, n° 2, p. 114‑135, janv. 1995.
[44] B. Lebreton, *Strategic Closed-Loop Supply Chain Management*. .
[45] D. Parker, « An Analysis of the Spectrum of Re-use », OAKDENE HOLLINS, A Component of the Remanufacturing Pilot for Defra, BREW Programme, 2007.
[46] D. Parker et P. Butler, *An Introduction to remanufacturing*, Mialiravina. mialiravina, 2007.
[47] T. HOSHINO, K. YURA, et K. HITOMI, « Optimization analysis for recycle-oriented manufacturing systems », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 33, n° 8, p. 2069‑2078, août 1995.
[48] C.-C. Huang, W.-Y. Liang, T.-L. Tseng, et P.-H. Chen, « The rough set based approach to generic routing problems: case of reverse logistics supplier selection », *J. Intell. Manuf.*, avr. 2014.
[49] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard, et L. N. Van Wassenhove, « The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design », *Prod. Oper. Manag.*, vol. 10, n° 2, p. 156–173, 2001.
[50] Z. Lu et N. Bostel, « A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities », *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, n° 2, p. 299‑323, févr. 2007.
[51] J. C. P. Su, Y. C. Lin, et V. Lee, « Component commonality in closed-loop manufacturing systems », *J. Intell. Manuf.*, vol. 23, n° 6, p. 2383‑2396, déc. 2012.
[52] C.-H. Wu, « OEM product design in a price competition with remanufactured product », *Omega*, vol. 41, n° 2, p. 287‑298, avr. 2013.
[53] P. Zwolinski, M.-A. Lopez-Ontiveros, et D. Brissaud, « Integrated design of remanufacturable products based on product profiles », *J. Clean. Prod.*, vol. 14, n° 15‑16, p. 1333‑1345, 2006.
[54] W. K. Biswas, V. Duong, P. Frey, et M. N. Islam, « A comparison of repaired, remanufactured and new compressors used in Western Australian small- and medium-sized enterprises in terms of global warming », *J. Remanufacturing*, vol. 3, n° 1, p. 4, avr. 2013.
[55] G. Ferrer et R. U. Ayres, « The impact of remanufacturing in the economy », *Ecol. Econ.*, vol. 32, n° 3, p. 413‑429, mars 2000.
[56] E. A. van der Laan et R. H. Teunter, « Simple heuristics for push and pull remanufacturing policies », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 175, n° 2, p. 1084‑1102, déc. 2006.
[57] M. A. Naeem, D. J. Dias, R. Tibrewal, P. C. Chang, et M. K. Tiwari, « Production planning optimization for manufacturing and remanufacturing system in stochastic environment », *J. Intell. Manuf.*, vol. 24, n° 4, p. 717‑728, août 2013.
[58] K. Inderfurth, A. G. de Kok, et S. D. P. Flapper, « Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 133, n° 1, p. 130‑152, août 2001.

[59] E. H. Aghezzaf, M. A. Jamali, et D. Ait-Kadi, « An integrated production and preventive maintenance planning model », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 181, n° 2, p. 679‑685, sept. 2007.

[60] E.-H. Aghezzaf et N. M. Najid, « Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems », *Inf. Sci.*, vol. 178, n° 17, p. 3382‑3392, sept. 2008.

[61] J. P. Kenne et L. J. Nkeungoue, « Simultaneous control of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system », *Appl. Numer. Math.*, vol. 58, n° 2, p. 180‑194, févr. 2008.

[62] A. Yalaoui, K. Chaabi, et F. Yalaoui, « Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems », *Inf. Sci.*, vol. 278, p. 841‑861, sept. 2014.

[63] M.-C. Fitouhi et M. Nourelfath, « Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for a single machine », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 136, n° 2, p. 344‑351, avr. 2012.

[64] M.-C. Fitouhi et M. Nourelfath, « Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 121, p. 175‑186, janv. 2014.

[65] J.-P. Kenné, P. Dejax, et A. Gharbi, « Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 135, n° 1, p. 81‑93, janv. 2012.

[66] S. H. Yoo, D. Kim, et M.-S. Park, « Lot sizing and quality investment with quality cost analyses for imperfect production and inspection processes with commercial return », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 140, n° 2, p. 922‑933, déc. 2012.

[67] M. Colledani et T. Tolio, « Impact of Quality Control on Production System Performance », *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, n° 1, p. 453‑456, 2006.

[68] M. Colledani et T. Tolio, « Joint design of quality and production control in manufacturing systems », *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 4, n° 3, p. 281‑289, 2011.

[69] M. Colledani et T. Tolio, « Integrated analysis of quality and production logistics performance in manufacturing lines », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, n° 2, p. 485‑518, févr. 2010.

[70] M. Colledani et T. Tolio, « Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines », *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, n° 1, p. 455‑458, 2012.

[71] B. Bouslah, A. Gharbi, et R. Pellerin, « Joint production and quality control of unreliable batch manufacturing systems with rectifying inspection », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, n° 14, p. 4103‑4117, janv. 2013.

[72] H. Rivera-Gomez, A. Gharbi, et J. P. Kenné, « Joint control of production, overhaul, and preventive maintenance for a production system subject to quality and reliability deteriorations », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, n° 9‑12, p. 2111‑2130, déc. 2013.

[73] H. Rivera-Gómez, A. Gharbi, et J. P. Kenné, « Joint production and major maintenance planning policy of a manufacturing system with deteriorating quality », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 146, n° 2, p. 575‑587, déc. 2013.

[74] W. Wang, « A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, n° 11, p. 1535‑1541, nov. 2011.

[75] S. Panagiotidou, « Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, n° 1, p. 300‑314, mai 2014.

[76] K. Inderfurth et R. Kleber, « An Advanced Heuristic for Multiple-Option Spare Parts Procurement after End-of-Production », *Prod. Oper. Manag.*, vol. 22, n° 1, p. 54‑70, janv. 2013.

[77] N. Chari, C. Diallo, et and U. Venkatadri, « Optimal Unlimited Free-Replacement Warranty Strategy using Reconditioned Products », *Int. J. Perform. Eng.*, vol. 9, n° 2, p. 191, mars 2013.

[78] N. Chari, C. Diallo, U. Venkatadri, et D. Aït-Kadi, « 7.2 Manufacturing strategy using new and reconditioned rotable spare parts ».

[79] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, 2009.

[80] S. Shokohyar, S. Mansour, et B. Karimi, « A model for integrating services and product EOL management in sustainable product service system (S-PSS) », *J. Intell. Manuf.*, vol. 25, n° 3, p. 427‑440, juin 2014.

[81] A. F. Marques, A. C. Alves, et J. P. Sousa, « An Approach for Integrated Design of Flexible Production Systems », *Procedia CIRP*, vol. 7, p. 586‑591, 2013.

[82] G. Quintana et J. Ciurana, « Cost estimation support tool for vertical high speed machines based on product characteristics and productivity requirements », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 134, n° 1, p. 188‑195, nov. 2011.

[83] N. Huang, « Mean station reliabilities cause throughput overestimates in production system design », *J. Manuf. Syst.*, vol. 31, n° 2, p. 184‑194, avr. 2012.

[84] N. Nahas, M. Nourelfath, et M. Gendreau, « Selecting machines and buffers in unreliable assembly/disassembly manufacturing networks », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 154, p. 113‑126, août 2014.

[85] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Spare Part Returns in Stochastic Deteriorating Manufacturing System under a Condition-Based Maintenance Policy: Simulation-Based Genetic Algorithm Approach », IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control MIM 2013 (IFAC MIM), p. 1399‑1404. June 19-21, 2013. Saint Petersburg, Russia.

[86] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « A New Inspection Heuristic for a Condition-Based Maintenance Policy in a Spare Part Returns Context », IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2013 (IEEE SMC), p. 1300‑1305. October 14-16, 2013. Manchester, UK.

[87] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Joint Optimisation of Spare Parts Demand and Remanufacturing Policy under Condition-Based Maintenance for Stochastic Deteriorating Manufacturing System », 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 2013 (IFAC IMS), p. 414‑419. May 22 - 24, 2013. São Paulo, Brazil.

[88] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Order/remanufacturing policy of spare part with recovery option for stochastic deteriorating system », IEEE 18th Conference on Emerging Technologies Factory Automation 2013 (IEEE ETFA), p. 1‑7. September 10 -13, 2013. Cagliari, Italy.

[89] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Machines selection problem for the production system design under stochastic deterioration and spart parts management context », Joint International Symposium on 'The Social Impacts of the Development in Information, Manufacturing and Service Systems' '44th In-ternational Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE 44)' and '9th International Sym-posium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS'14), October 14-16, 2014, Istanbul, Turkey.

[90] H. Boudhar, M. Dahane, et N. Rezg, « Optimisation of sequential inspection schema in multi-component deteriorating system context: heuristic based approach », International Conference of Modeling and Simulation MOSIM 2014, November 5-7, 2014, Nancy, France.