ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
Morad ASSID

CONTRÔLE DE LA PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS IMPARFAITS

MONTRÉAL, LE 05 FÉVRIER 2013

©Tous droits réservés, Morad Assid, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ali Gharbi, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Adnène Hajji, membre du jury
Département des opérations et systèmes de décision à la Faculté des sciences de l'administration, Université Laval

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 JANVIER 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEUR

REMERCIEMENTS

Je désire adresser ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, le docteur Ali Gharbi, pour sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son support financier grâce auquel j'ai pu me concentrer sur mes études.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de noter mon travail.

Je désire offrir mes remerciements aux anciens et présents membres de l'équipe du Laboratoire de Conception et Contrôle des Systèmes de Production (LC2SP) à l'École de Technologie Supérieure qui, par leurs conseils, m'ont bien aidé à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à ma famille et mes amis, vont mes sincères remerciements pour leurs irremplaçables et inconditionnels soutiens et leurs supports moraux.

CONTRÔLE DE LA PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS IMPARFAITS

Morad ASSID

RÉSUMÉ

Le travail présenté dans ce mémoire traite le problème de commande optimale. Il est développé en deux grandes parties et se rapporte à deux différents systèmes manufacturiers imparfaits et complexes. D'une part, la première partie de ce projet porte sur l'optimisation des politiques de commande de production et de sous-traitance, pour un système manufacturier représentant une problématique commune dans l'industrie pharmaceutique. Il est question de développer une nouvelle politique de commande et d'optimiser ses paramètres qui minimisent le coût total tout en respectant la contrainte de la satisfaction des clients. D'autre part, une étude comparative est menée sur l'interaction entre des politiques de commande de la production, du Setup (la mise en course) et de la maintenance. L'introduction du concept de la maintenance opportuniste dans les modèles étudiés permet de réaliser encore plus d'économie et d'augmenter le niveau de service à la clientèle. Ce concept vise à mieux synchroniser les interventions de maintenance préventive avec les opérations de Setup qui nécessitent l'arrêt de l'activité de production pendant une durée non-négligeable.

En raison de la complexité des problèmes considérés et des limites des modèles analytiques, une approche expérimentale qui combine des méthodes statistiques d'optimisation avec l'outil de simulation est utilisée dans le but d'optimiser les paramètres de commande de chaque système étudié. Elle intègre les plans d'expérience, l'analyse de variance, la méthodologie de surface de réponse et la simulation. Cette dernière permet de reproduire fidèlement le comportement du système manufacturier sous les conditions réelles d'opération, et ainsi d'estimer ses caractéristiques. Tous les modèles de simulation sont conçus en combinant une approche à événements discrets et continus en vue de tenir compte de la continuité des flux de production et de la nature impulsive de la dynamique des systèmes. Des analyses de sensibilité sont également effectuées pour confirmer la pertinence et la robustesse de l'approche adoptée.

Mots-clés : systèmes manufacturiers non-fiables, planification de la production, politique à seuil critique, sous-traitance, mise en course, maintenance préventive, maintenance opportuniste, simulation, plans d'expérience, méthodologie de surface de réponse.

PRODUCTION AND MAINTENANCE CONTROL OF FAILURE-PRONE MANUFACTURING SYSTEMS

Morad ASSID

ABSTRACT

This master addresses the problem of optimal control. It consists of two parts and refers to two different complex and unreliable manufacturing systems. On one hand, the first part of this project focuses on the optimization of production and subcontracting control policies for a manufacturing system, representing a common problem in the pharmaceutical industry. It focuses on the development of a new control policy and parameters optimization targeting cost reduction, while fulfilling the constraint of customer satisfaction. On the other hand, a comparative study was conducted, focusing on the interaction between the production, the setup and the maintenance control policies. The introduction of the concept of the opportunistic maintenance in the studied models allows achieving even more cost savings and increasing the level of customer service. This concept permits a better synchronization of the preventive maintenance interventions with the setup actions, which requires discontinuation of production activity during a non-negligible period of time.

Due to the complexity of the considered manufacturing systems and the limitations of analytical models, we decided to use an experimental approach that combines statistical methods of optimization with simulation tool, in order to optimize the control parameters of each studied system. It integrates the design of experiment, the variance analysis, the methodology response surface and the simulation. The latter allows faithfully replicating the behavior of the manufacturing system under the actual operating conditions and this way estimating its characteristics. All simulation models are designed by combining an approach of discrete and continuous events, in order to take into account the continuity of the production flow and the impulsive nature of the system dynamics. Sensitivity analyzes are also made to confirm the relevance and the robustness of the selected approach.

Keywords: unreliable manufacturing systems, production planning, hedging point policy, subcontracting, setup, preventive maintenance, opportunistic maintenance, simulation, experimental design, response surface methodology.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET DE LA SOUS-TRAITANCE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL DU DOMAINE PHARMACEUTIQUE : UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE 5

1.1 Notation et formulation du problème : 11

1.1.1 Notation 11

1.1.2 Formulation du problème 11

1.1.3 Politique de commande 16

1.2 Approche de résolution heuristique et politique de commande proposées par Dror et al. (2009) (HEU_P) pour un cas particulier 18

1.3 Approche de résolution expérimentale proposée (EXP_P) 21

1.3.1 Modèle de simulation 23

1.3.2 Validation du modèle de simulation 26

1.3.3 Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse 28

1.3.4 Analyse de sensibilité 33

1.4 Politique de commande générale (EXP_G) : $\boldsymbol{UstR}$ est une variable de décision 34

1.4.1 Effet du niveau de service à la clientèle sur les paramètres de commande 39

1.4.2 Effet du coût de pénurie du produit $\mathbf{P2}$ ($\boldsymbol{c2}-$) sur les paramètres de commande 42

1.4.3 Analyse de sensibilité 44

CHAPITRE 2 ÉTUDE COMPARATIVE DE POLITIQUES DE COMMANDE POUR UN SYSTÈME MANUFACTURIER IMPARFAIT AVEC SETUP 51

2.1.1 Notation 53

2.1.2 Description des politiques de commande 54

2.1.2.1 Politique du Corridor classique (HCP) 54

2.1.2.2 Politique du Corridor modifiée (MHCP) 56

2.2 Approche de résolution 59

2.2.1 Modèles de simulation 61

2.2.2 Validation du modèle de simulation 64

2.2.3 Optimisation 65

2.3 Analyse de Sensibilité 69

2.4 Influence des paramètres de coût et de temps sur les politiques de commande 71

2.4.1 Influence des paramètres de coût 71

2.4.2 Influence de la durée de maintenance corrective et de la durée de Setup 73

2.4.3 Influence du taux de production maximal 74

CHAPITRE 3 POLITIQUES DE COMMANDE COMBINÉE DE PRODUCTION, DE SETUP ET DE MAINTENANCE DANS UN CONTEXTE MANUFACTURIER IMPARFAIT 77
3.1 Formulation et état du problème de commande 81
3.1.1 Notation 82
3.1.2 Formulation du problème 82
3.2 Approche de résolution 88
3.2.1 Modèle de Simulation 89
3.2.2 Validation des modèles de simulation 92
3.2.3 Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse 94
3.3 Analyse de sensibilité 100
3.4 Influence des paramètres du coût et de temps sur les politiques de commande 104
3.4.1 Influence des paramètres de coût 104
3.4.2 Influence de la durée de maintenance corrective (CM) et de la maintenance préventive (PM) 108
3.4.3 Influence de la durée de mise en course (Setup) 110

CHAPITRE 4 POLITIQUES DE SYSTÈME DE PRODUCTION NON FIABLE COMBINANT LA PRODUCTION, LE SETUP ET LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE AVEC OU SANS OPPORTUNISME 115
4.1 Définition du problème et présentation des politiques avec ou sans opportunisme 120
4.1.1 Notation 121
4.1.2 Formulation du problème 121
4.1.3 Politiques de commande sans opportunisme 126
4.1.4 Politiques de commande avec opportunisme 130
4.2 Approche de résolution 133
4.2.1 Simulation 134
4.2.2 Validation des modèles de simulation 138
4.2.3 Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse 139
4.3 Analyse des politiques de commande sans opportunisme 148
4.3.1 Analyse de sensibilité générale 148
4.3.2 Effets des paramètres de coût et de temps sur les politiques sans opportunisme 152
4.3.2.1 Effets des paramètres de coût 153
4.3.2.2 Effets de la durée de maintenance corrective et de la durée de mise en course 156
4.3.2.3 Résumé 159
4.4 Analyse des politiques de commande avec opportunisme 160
4.4.1 Analyse de sensibilité générale 160
4.4.2 Influence des paramètres de coût et de temps sur les politiques avec opportunisme 164
4.4.2.1 Influence des paramètres de coût 165
4.4.2.2 Influence de la durée de PM et de la durée de mise en course 167
4.4.2.3 Résumé 169

4.5 Comparaison entre la politique sans opportunisme HCP_B et son équivalente avec opportunisme HCP_BO 170
4.5.1 Influence des paramètres de coût 170
4.5.2 Influence de la durée de PM et de la durée de Setup 172
4.5.3 Résumé 174

CONCLUSION 177

ANNEXE I MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M_2P_2 IMPARFAITS AVEC SOUS-TRAITANCE 181

ANNEXE II MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M_1P_2 NON-FLEXIBLE UTILISANT LES STRATÉGIES DE SETUP HCP ET MHCP 187

ANNEXE III MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M_1P_2 NON-FLEXIBLE ET IMPARFAITS AVEC STRATÉGIE DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE DE TYPE BLOC MODIFIÉ BASÉE SUR LES STOCKS 195

BIBLIOGRAPHIE 203

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Paramètres de la demande et de la capacité de production du système..... 19

Tableau 1.2 Paramètres de coût du système..... 28

Tableau 1.3 Niveaux des variables indépendantes..... 29

Tableau 1.4 Solutions des deux modèles..... 32

Tableau 1.5 Analyse de sensibilité du modèle EXP_P pour un niveau de service de 99,5 % et comparaison des améliorations du coût..... 35

Tableau 1.6 Solutions des trois modèles étudiés pour un niveau de service supérieur ou égal à 99,5 %..... 38

Tableau 1.7 Analyse de sensibilité du modèle EXP_G pour un niveau de service de 99,5 % et comparaison des améliorations du coût..... 47

Tableau 2.1 Paramètres de simulation..... 66

Tableau 2.2 Niveaux des variables indépendantes..... 67

Tableau 2.3 Analyse de variance pour le coût total généré par la politique $MHCP_2$..... 67

Tableau 2.4 Solutions des deux politiques HCP et $MHCP_2$..... 69

Tableau 2.5 Analyse de sensibilité pour différents paramètres du coût..... 70

Tableau 3.1 Abréviation des politiques de commande combinées..... 87

Tableau 3.2 Paramètres de simulation..... 95

Tableau 3.3 Niveaux des variables indépendantes pour les différentes politiques..... 96

Tableau 3.4 Résultats d'optimisation des politiques de commande..... 99

Tableau 3.5 Analyse de sensibilité pour les politiques avec la stratégie HCP..... 102

Tableau 3.6 Analyse de sensibilité pour les politiques avec la stratégie MHCP..... 102

Tableau 4.1 Abréviation des politiques de commande étudiées..... 132

Tableau 4.2 Paramètres de simulation 141

Tableau 4.3 Niveaux des variables indépendantes pour les politiques sans opportunisme 142

Tableau 4.4 Niveaux des variables indépendantes pour les politiques avec opportunisme 143

Tableau 4.5 Résultats d'optimisation des politiques de commande 145

Tableau 4.6 Combinaison des paramètres de coût pour l'analyse de sensibilité 148

Tableau 4.7 Analyse de sensibilité pour les politiques sans opportunisme et une stratégie de Setup classique (HCP) 149

Tableau 4.8 Analyse de sensibilité pour les politiques sans opportunisme et une stratégie de Setup modifiée (MHCP) 149

Tableau 4.9 Analyse de sensibilité pour les politiques avec opportunisme et une stratégie de Setup classique (HCP) 161

Tableau 4.10 Analyse de sensibilité pour les politiques avec opportunisme et une stratégie de Setup modifié (MHCP) 162

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 0.1 Structure d'un système manufacturier 02

Figure 0.2 Diagramme représentant les étapes de l'approche de résolution utilisée 03

Figure 1.1 Système manufacturier étudié 12

Figure 1.2 Diagramme du modèle de simulation 24

Figure 1.3 Variation des inventaires, des taux de la sous-traitance et des taux de production des deux produits finis (Z_1=12000 et Z_2=10000) 27

Figure 1.4 Diagramme de Pareto pour les deux variables dépendantes du système 30

Figure 1.5 Variation des paramètres optimaux de la politique de commande en fonction de la satisfaction des clients (modèle EXP_P) 31

Figure 1.6 Variation du coût total optimal en fonction de la satisfaction des clients (EXP_P) 31

Figure 1.7 Diagramme de Pareto pour la politique EXP_G avec cinq paramètres de commande 37

Figure 1.8 Variation des paramètres optimaux de la politique EXP_G en fonction de la satisfaction des clients 39

Figure 1.9 Variation du coût total optimal en fonction de la satisfaction des clients (EXP_G) 40

Figure 1.10 Variation des paramètres optimaux du modèle EXP_G.2 en fonction de la satisfaction des clients lorsque $\mathrm{UstR} \leq 2046$ 41

Figure 1.11 Différence de coût total entre les politiques EXP_G et EXP_G.2 en fonction de la satisfaction des clients 42

Figure 1.12 Variation de la valeur optimale de la capacité de stockage des produits finis $P1$ et $P2$ en fonction du $\mathrm{c2}-$ pour un niveau de service de 99,5 % 43

Figure 1.13 Variation de la sous-traitance régulière et du pourcentage d'utilisation de la capacité (U.C.) des installations en fonction du c2 – pour un niveau de service de 99,5 % 44

Figure 2.1 Système manufacturier étudié 53

Figure 2.2 Exemple de la trajectoire des inventaires avec la politique HCP 55

Figure 2.3 Organigramme de décision de la politique HCP 56

Figure 2.4 Exemple de la trajectoire des inventaires avec la politique $MHCP_2$ 57

Figure 2.5 Organigramme de décision de la politique $MHCP_2$ 58

Figure 2.6 Schéma-bloc des modèles de simulation 62

Figure 2.7 Variation des inventaires des deux produits finis (Z_1=Z_2=30) et (a_1=a_2=15) 64

Figure 2.8 Surface de réponse du coût total 68

Figure 2.9 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP et $MHCP_2$ pour différents coûts de pénurie et de Setup 72

Figure 2.10 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP et MHCP2 pour différents durée d'exécution de CM et de Setup 74

Figure 2.11 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP et MHCP2 pour différents taux maximal de production (U_{max}) 75

Figure 3.1 Système manufacturier étudié 81

Figure 3.2 Schéma-bloc des modèles de simulation 90

Figure 3.3 Variation de la somme des inventaires des deux produits finis (Z_1=Z_2=200, a_1=a_2=100, Z_{PM}=80 et T_{PM}=100) 93

Figure 3.4 Diagramme de Pareto pour les quatre politiques de commande 97

Figure 3.5 Surface de réponse du coût total 99

Figure 3.6 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts d'inventaire et de pénurie 106

Figure 3.7 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts de CM et PM 107

Figure 3.8 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts de SETUP 108

Figure 3.9 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents temps moyen d'opération de CM et PM 109

Figure 3.10 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents écart-types des temps d'opération de CM et PM 110

Figure 3.11 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents temps moyen de mise en course (SETUP) 111

Figure 4.1 Système manufacturier étudié 122

Figure 4.2 Trajectoires du stock tampon sous les commandes de la stratégie de PM de type âge combinées à la stratégie de Setup HCP. 128

Figure 4.3 Trajectoires du stock tampon sous les commandes des stratégies de PM de type bloc classique et avec sauts combinées à la stratégie HCP. 129

Figure 4.4 Variation des inventaires pour deux modèles M1P2 : avec et sans opportunisme, intégrant la stratégie de PM de type bloc classique et la stratégie de Setup HCP. 131

Figure 4.5 Schéma-bloc des modèles de simulation 135

Figure 4.6 Variation des inventaires des deux produits finis de leur somme pour $Z_1=Z_2=100$, $T_A=50$, et $T_O=1,25$ sous les commande de la politique HCP_AO 138

Figure 4.7 Diagramme de Pareto pour les politiques MCHP_BJ et MCHP_BJO 143

Figure 4.8 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents coûts de pénurie 154

Figure 4.9 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents C_{CM} 154

Figure 4.10 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents C_S 155

Figure 4.11 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents MTCM 157

Figure 4.12 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents SDC 158

Figure 4.13 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents T_S 159

Figure 4.14 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents coûts de pénurie 165

Figure 4.15 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents C_{PM}..... 166

Figure 4.16 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents C_S 166

Figure 4.17 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents MTPM 168

Figure 4.18 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents SDP..... 168

Figure 4.19 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents T_S 169

Figure 4.20 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP_B et HCP_BO pour différents coûts de pénurie et de PM 171

Figure 4.21 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP_B et HCP_BO pour différents coûts de Setup (C_S)..... 172

Figure 4.22 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP_B et HCP_BO pour différents durée d'exécution de PM (MTPM) et de son écart-type (SDP) 172

Figure 4.23 Évolution de la différence de coût entre les politiques de commande HCP_B et HCP_BO pour différents durée d'exécution de Setup (T_S).... 173

Figure-A I-1 Tableau de bord du modèle de simulation développé 181

Figure-A I-2 Modélisation des pannes, des réparations et de la demande..... 181

Figure-A I-3 Modélisation de la production et de la sous-traitance 182

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

$\mathbf{P_i}$	Type du produit i, $\mathbf{i} \in \{\mathbf{1}, \mathbf{2}\}$
$\mathbf{x_i(t)}$	Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit $\boldsymbol{P_i}$ au temps t
$\mathbf{d_i}$	Taux de la demande du produit $\boldsymbol{P_i}$
$\mathbf{u^{ij}}$	Taux de fabrication du produit $\boldsymbol{P_i}$ sur l'installation $\boldsymbol{M_j}$
$\mathbf{U_{max}^{ij}}$	Taux maximal de fabrication du produit $\boldsymbol{P_i}$ sur l'installation $\boldsymbol{M_j}$
$\mathbf{U_{st}^{R}}$	Taux de sous-traitance régulière du produit $\boldsymbol{P_2}$ (taux constant)
$\mathbf{U_{st}^{U}}(.)$	Taux de sous-traitance urgente du produit $\boldsymbol{P_2}$
$\mathbf{Z_i}$	Capacité de l'espace de stockage du produit $\boldsymbol{P_i}$
$\boldsymbol{a_i}$	Niveau de seuil de Setup (ou Borne du Corridor) du produit $\boldsymbol{P_i}$
PM	Maintenance préventive
$\boldsymbol{T_A}$	Seuil d'âge des actions préventives pour la stratégie de PM de type âge
$\boldsymbol{T_B}$	Temps d'intervention pour la stratégie de PM de type bloc classique
$\boldsymbol{T_{BS1}}$	Temps d'intervention pour la stratégie de PM de type bloc avec sauts
T_{BS2}	Seuil de temps permettant de sauter les interventions de PM
$\boldsymbol{T_O}$	Seuil de temps permettant l'avancement des interventions de PM
$\boldsymbol{T_{ij}^{s}}$	Temps nécessaire de setup pour passer de la production de $\mathbf{P_i}$ à $\mathbf{P_j}$ ($\mathbf{i \neq j}$)
$\boldsymbol{N_{ij}^{s}}$	Nombre d'actions de setup exécutées pour passer de $\boldsymbol{P_i}$ à $\boldsymbol{P_j}$ ($\mathbf{i \neq j}$)
$\mathbf{MTBF_j}$	Moyenne des temps de bon fonctionnement de l'installation $\boldsymbol{M_j}$, $\mathbf{j} \in \{\mathbf{1}, \mathbf{2}\}$
$\mathbf{MTTR_j}$	Moyenne des temps de réparation de l'installation $\boldsymbol{M_j}$, $\mathbf{j} \in \{\mathbf{1}, \mathbf{2}\}$
$\mathbf{c_i^+}$	Coût de mise en inventaire par unité de temps par unité de produit $\boldsymbol{i}$
$\mathbf{c_i^-}$	Coût de rupture de stock par unité de temps par unité de produit $\boldsymbol{i}$

$\mathbf{c^e}$	Coût d'espace de stockage
$\mathbf{c_j^p}$	Coût de production de l'installation $\mathbf{M_j}$ par unité de temps par unité de produit
$\mathbf{c_{st}^R}$	Coût de la sous-traitance régulière par unité de temps par unité de produit $\boldsymbol{P_2}$
$\mathbf{c_{st}^u}$	Coût de la sous-traitance urgente par unité de temps par unité de produit $\boldsymbol{P_2}$
$\boldsymbol{c_{ij}^s}$	Coût d'une opération de setup pour passer de la production de $\mathbf{P_i}$ à $\mathbf{P_j}$ $\mathbf{i \neq j}$
$\boldsymbol{c_{pm}}$	Coût d'une opération de maintenance préventive
$\boldsymbol{c_{cm}}$	Coût d'une opération de maintenance corrective
DL	Délai de livraison aléatoire de la sous-traitance urgente du produit $\boldsymbol{P_2}$

INTRODUCTION

Les systèmes industriels sont en évolution continue et sont en effet devenus de plus en plus complexes avec le progrès des technologies et l'augmentation des exigences des clients en termes de coût, qualité et délais. Pour pallier à ces difficultés, les entreprises doivent être capables de se configurer en fonction de leur environnement instable (Koren et al, 1999). Effectivement, les systèmes de production ont besoin de surveillance continue et de contrôle (Whittle, 1996) et nécessitent l'exécution d'un ensemble précis d'actions en vue d'atteindre la performance optimale. Dans ce contexte, toutes les exigences des clients doivent être satisfaites et ce qu'une entreprise ne peut pas produire, un concurrent le vendra. Par conséquent, les dirigeants des entreprises s'engagent incessamment à augmenter l'efficacité de leurs systèmes et acquérir un système de production performant. Dans le domaine industriel, ce principe exige une maitrise du système de production dans le but d'être assujetti à la demande des clients et d'autres parts, de réduire la difficulté de maintien des encours et des produits finis et de minimiser les coûts.

Un système est défini comme étant un processus ou un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux dans le but de produire des biens ou des services. Ces derniers doivent répondre à des objectifs de prix, de délai, de quantité et de qualité. La figure 0.1 représente la structure générale des systèmes manufacturiers traités dans ce mémoire. Ils sont souvent sujets à plusieurs fluctuations aléatoires qui perturbent le fonctionnement normal de la production. L'évolution de ces systèmes dans le temps a toujours été un défi pour les industriels qui doivent maintenir la survie et la compétitivité de leurs entreprises. Ainsi, la gestion des systèmes manufacturiers est assimilée à la maîtrise de l'ensemble des politiques de commande de leurs fonctions. En effet, le principe est de garder les équipements dans un bon état de fonctionnement et d'améliorer les actions adoptées pour agir sur les moyens de production et de Setup (mise en course) et les paramètres des stocks tampons tout en minimisant les coûts. Notre projet de recherche s'inscrit dans ce cadre général. Il a pour but de traiter les interactions entre les politiques de commande de la production, de la sous-traitance, du Setup et de la maintenance.

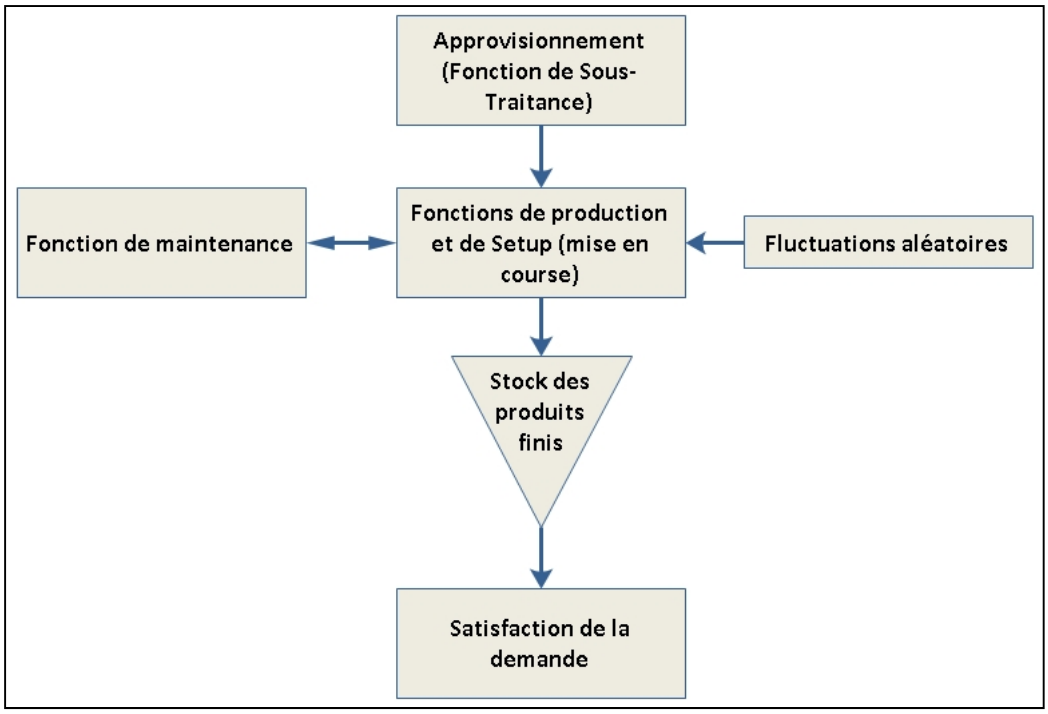


Figure 0.1 Structure d'un système manufacturier

En tenant compte des limites mathématiques des approches de résolution analytique (Boukas et Haurie, 1990), le développement des méthodes empiriques devient nécessaire. La méthodologie adoptée pour optimiser les paramètres des politiques de commandes est inspirée de celle proposée par Gharbi et al. (2011). Elle est basée sur la combinaison des méthodes statistiques et de l'outil de la simulation. Le choix de cette approche expérimentale est dû essentiellement à sa capacité d'optimiser les paramètres de commande concernant des systèmes manufacturiers complexes qui sont difficiles à traiter analytiquement. Effectivement, l'outil de simulation est un moyen efficace de modélisation qui permet d'imiter fidèlement le comportement du système de production, et de réduire considérablement le nombre des approximations simplificatrices qui ont un effet nuisible sur la qualité des résultats. Polyvalent et puissant, cet outil est parmi les plus utilisés dans les sciences et les sciences appliquées, sa popularité réside dans sa capacité à traiter des systèmes très complexes (Kelton et al., 2007).

La figure 0.2 représente les étapes de l'approche de résolution utilisée dans ce projet pour déterminer expérimentalement la valeur optimale des paramètres des différentes politiques de commande étudiées. Il s'agit tout d'abord de définir le contexte du système de production et de présenter analytiquement le problème de commande optimale considérée. Ensuite, le besoin d'utilisation d'une approche expérimentale est mis en cause en se basant sur le fait que les démarches d'optimisation des systèmes industriels deviennent très complexes dès que ceux-ci ne sont plus élémentaires. Il est pertinents de noter qu'en raison de la complexité de nos systèmes manufacturiers, les politiques de commande proposées dans ce mémoire sont des heuristiques, mais sont toutes basées sur les résultats obtenus par d'autres travaux de recherche. L'étape suivante consiste à définir tous les paramètres de commande à optimiser après les avoir organisés sous forme d'un plan d'expérience. Ensuite, nous modéliserons la dynamique du système en utilisant le logiciel ARENA via une approche combinée par événements continus/discrets (Kelton et al., 2007). Nous utilisons par la suite, l'analyse de la variance (ANOVA) en vue de définir la relation entre tous les paramètres de commande du système. Ainsi, nous déterminerons les facteurs et leurs interactions qui ont un effet significatif sur les variables de réponse (le coût total et/ou la satisfaction des clients). La méthodologie de surface de réponse sera également employée afin d'optimiser les paramètres de commande considérés. Par la suite, pour chaque modèle de simulation conçu, nous procédons à une analyse de sensibilité où les paramètres de coût du système sont variés. Cette dernière a pour but de confirmer la robustesse et l'efficacité de l'approche utilisée. Finalement, nous analysons et interprétons les résultats obtenus ainsi que les phénomènes observées.

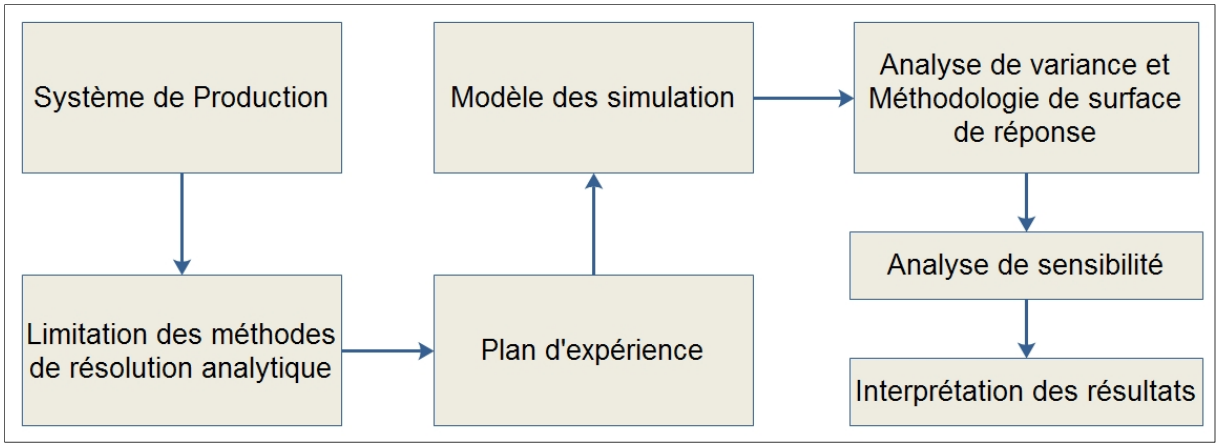


Figure 0.2 Diagramme représentant les étapes de l'approche de résolution utilisée

La suite de ce mémoire est organisée sous forme de quatre chapitres et une conclusion générale. Le chapitre 1 traite le problème d'optimisation des politiques de commande de production et de sous-traitance pour une problématique commune de l'industrie pharmaceutique. Deux variables de réponse sont considérées simultanément : le coût total et la satisfaction des clients, pour un système manufacturier M2P2 fonctionnant dans un environnement imparfait où les durées de Setup sont considérées négligeables. Afin d'introduire des stratégies de Setup et de maintenance préventive (PM), nous avons choisis un système moins complexe M1P2. Le but est de trouver une politique de commande sous-optimale qui traite simultanément la production, le Setup et la maintenance. Notons qu'aucun autre travail de recherche n'a traité ce genre de problème. Ainsi, dans le chapitre 2, une étude comparative des interactions entre des politiques de commande de la production et du Setup est réalisée en vue de proposer une structure de loi de commande qui minimise le coût total encouru. Les chapitres 3 et 4 se définissent comme une suite des travaux présentés dans le chapitre 2 : le chapitre 3 intègre plusieurs stratégies de PM basées sur le niveau des stocks tampons tandis que le chapitre 4 tient compte des stratégies de PM basées sur l'âge de la machine. Le concept de la maintenance opportuniste sera également introduit à la fin du chapitre 4. Il consiste à tirer profit des arrêts de l'activité de production lors des actions de Setup afin d'accomplir les interventions de PM.

CHAPITRE 1

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET DE LA SOUS-TRAITANCE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL DU DOMAINE PHARMACEUTIQUE : UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre traite un problème d'optimisation des politiques de commande de la production et de la sous-traitance d'un système manufacturier fonctionnant dans un environnement incertain. Le système manufacturier considéré représente une problématique commune dans l'industrie pharmaceutique. Il est composé de deux installations de fabrication de capacité différentes dont chacune est capable de produire deux types de produits finis. Ces installations sont sujettes à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent engendrer des ruptures de stock. Le recourt à la sous-traitance est nécessaire pour compenser le manque de capacité de production des installations par rapport à la demande des clients et aussi pour faire face à l'occurrence de pannes. La sous-traitance se compose d'une quantité reçue de façon régulière et d'autres commandes urgentes lancées si nécessaire pour réduire le risque de pénurie. Ces commandes urgentes ont un délai de livraison non-négligeable et aléatoire. L'objectif visé est de proposer une politique de commande pour le système considéré, et d'obtenir la valeur optimale des paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru pour un niveau de service à la clientèle donné. Compte tenu de la complexité du problème, nous nous sommes basés sur des politiques existantes dans la littérature scientifique en adoptant une approche expérimentale. Cette approche se compose de l'outil de la simulation et des méthodes statistiques telles que les plans d'expérience, l'analyse de variance et la méthodologie de surface de réponse. Elle a pour but de représenter fidèlement le comportement du système et d'optimiser les paramètres de la politique de commande qui minimisent le coût tout en respectant la contrainte de la satisfaction des clients. Pour un cas particulier du domaine pharmaceutique, les résultats obtenus montrent une réduction allant jusqu'à 37 % en terme de coût par rapport au modèle déjà existant dans la littérature proposé par Dror et al. (2009), qui ont utilisé une politique de commande simplifié et une approche de résolution heuristique. Des exemples numériques et des analyses de sensibilité sont

également présentés afin démontrer la robustesse de la politique de commande et de l'approche de résolution proposée.

Les systèmes de production ont besoin de contrôle et de surveillance continue (Whittle, 1996) et leur maitrise est devenue indispensable en raison d'un contexte économique plus compétitif et un contexte manufacturier plus complexe, où les composants du système de production sont souvent sujets à des fluctuations aléatoires tels que la variation de la demande, des pannes, des actions de réparation, etc. Ainsi, l'utilisation des stocks tampons entre les postes de travail et à la fin du cycle de fabrication s'est avéré être un moyen efficace pour se protéger contre les perturbations aléatoires, et qui se manifestent souvent par des arrêts de production. Malgré son utilité dans le maintien de la satisfaction des clients, disposer d'un haut niveau des stocks de sécurité a plusieurs inconvénients comme l'augmentation du coût d'exploitation et de possession des inventaires. Par ailleurs, les niveaux bas des stocks de sécurité augmentent le risque de pénurie et la non-satisfaction des clients. Quel est donc le niveau optimal des stocks tampons à adopter qui permet une réduction du coût total encouru et une satisfaction des clients importante?

Le domaine pharmaceutique est caractérisé par une compétition de plus en plus féroce, une montée des médicaments génériques et de nouvelles découvertes en biotechnologie. Face à cette évolution, les entreprises pharmaceutiques sont continuellement en quête d'efficacité de leurs procédés de fabrication afin de minimiser les coûts et de bien adapter l'activité de la production au besoin du marché. En se référant au USA Bureau of Labor Statistics (BLS), les entreprises pharmaceutiques se divisent en trois grandes catégories : 1) Les producteurs de produits grand public dont les activités de recherche et développement se concentrent essentiellement sur le développement de nouvelles formules. 2) les producteurs des produits génériques qui se spécialisent dans les préparations dérivées des médicaments de marque qui ne sont plus protégés par des brevets et finalement, 3) les concepteurs de molécules nouvelles qui fabriquent les deux types de médicaments et sont généralement engagés à tous les niveaux de la chaîne d'activités pharmaceutiques (recherche et développement, production, commercialisation). Les médicaments génériques se vendent à des prix plus

faibles, ce qui explique le recours fréquent de la sous-traitance pour ce type de produit dans le but de réduire les coûts et d'augmenter la capacité de production. Ce n'est pas le cas des médicaments de marque pour lesquels un brevet a été délivré.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au cas des entreprise pharmaceutique qui; en plus de fabriquer des médicaments génériques et ceux de marque, doit recourir à la sous-traitance pour satisfaire tous ses clients et assurer sa compétitivité. Le but est de trouver la capacité de stockage requise pour chaque type de produit finis et le taux de la sous-traitance qui minimisent les coûts et maintiennent un certain niveau de service à la clientèle. Plus explicitement, il s'agit d'un problème de commande optimale de la production et de la sous-traitance. Selon Kaplan and Laing (2005), il est question d'une problématique commune dans l'industrie pharmaceutique. En effet, Booth (1996) explique que parmi les priorités manufacturières des entreprises pharmaceutiques : l'adéquation entre l'offre et la demande et l'utilisation accrue de la sous-traitance dans le but de réduire les coûts.

Dans la littérature, plusieurs études de recherche ont été menées visant à traiter le problème de commande optimale de la production pour différentes classes de systèmes manufacturiers sujets à des pannes aléatoires. La plupart d'entre elles, ont mis l'accent sur les systèmes dont leurs états sont décrits par le processus de Markov. Olsder et Suri (1980) ont exploité le formalisme de Richel (Richel, 1975) et ont réussi à développer l'équation de programmation dynamique de la politique de commande optimale, pour un système manufacturier qui fonctionne dans un environnement incertain selon le processus de Markov homogène. Pour la planification de la production d'un système manufacturier; composé d'une seule machine produisant un seul type de produit et dont la dynamique est décrite par une chaîne de Markov homogène (taux de transition constants), les travaux de Kimemia et Gershwin (1983) et Akella et Kumar (1986) ont montré que la politique de commande, connue sous le nom politique à seuil critique (Hedging point policy (HPP)) est optimale. Il s'agit de bâtir un niveau optimal (seuil critique) non négatif du stock de sécurité durant les périodes d'excès de capacité des machines, afin de prévenir les défaillances futures du système et continuer à satisfaire les clients. Sharifnia (1988) a traité le même problème que Akella et Kumar (1986)

en considérant plusieurs états de la machine, il a démontré que la politique de production optimale a une structure de multiples seuils critiques (MHPP). Le concept de la politique à seuil critique (HPP) est la base sur laquelle plusieurs extensions ont été développées. Feng et Yan (2000) ont démontré l'optimalité de la politique à seuil critique pour un système manufacturier stochastique discret avec une demande aléatoire.

En ce qui concerne les systèmes avec plusieurs types de produits, Caramanis et Sharifnia (1991) ont exploité les résultats de Sharifnia (1988) et ont utilisé une méthode de décomposition afin de concevoir une politique sous-optimale de planification de la production. Ainsi, ils ont transformé un problème de commande complexe à plusieurs types de produits (M_1P_n) en plusieurs problèmes de commande plus simples avec un seul type de produit (M_1P_1) qu'on peut traiter analytiquement. Sethi and Zhang (1999) ont présenté une formulation explicite du problème de commande optimale d'un système de production composé d'une seule machine capable de produire plusieurs types de produits, en négligeant le temps et le coût de Setup (mise en course). La même hypothèse a été posée par Gharbi et Kenné (2003) lorsqu'ils ont étudié le problème de commande de la production pour un système manufacturier avec de multiple machines et multiple produits. Bai et Elhafsi (1997) ont élaboré les conditions d'optimalité décrites par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB) pour un système manufacturier composé d'une seule machine non-flexible capable de produire deux types de produits, avec des durées et des coûts de mise en course (Setup) non négligeables. Ensuite, ils ont présenté une structure adaptée de la politique de commande, connu sous le nom de Hedging Corridor Policy (HCP). Gharbi et al. (2006) ont étendu les résultats de Bai et Elhafsi (1997) et ont obtenu une politique de commande sous-optimale améliorée appelée MHCP (Modified Hedging Corridor Policy).

Le manque de la capacité de production par rapport à la demande clientèle, poussent les entreprises industrielles de différents domaines (pharmaceutiques, automobiles, Astronautiques, etc.) à chercher d'autres alternatives comme la sous-traitance ou l'acquisition de nouvelles machines de fabrication, dans le but d'augmenter la capacité de production et de satisfaire tous ses clients en termes de quantité, qualité et délai. Parmi les auteurs qui ont

abordé cette classe de systèmes de production, Dellagi et al. (2007) ont étudié les stratégies de production et de maintenance en considérant le contexte d'un sous-traitant. Ils ont considéré un système de production représenté par une machine produisant un seul type de produit pour satisfaire une demande constante. Cette machine appelle la sous-traitance afin de remplir toute la demande clientèle. Dans le même contexte, Ayed et al. (2011) ont traité un système de fabrication qui fonctionne dans un environnement imparfait dont le taux de panne dépend à la fois de l'âge de la machine et du taux de production. Pour aider à répondre à une demande aléatoire, la sous-traitance est utilisée en tant qu'un système de production indépendant. Gharbi et al. (2011) ont étudié une cellule de fabrication capable de produire un seul type de produit. Sa capacité totale change suivant l'utilisation ou non d'une machine réserve (stand-by) dont le coût de production est plus élevé. La politique trouvée est présentée sous le nom de « State dependent hedging point policy » (SDHPP) et se caractérise par deux seuils critiques.

Il est intéressant de noter qu'aucun autre travail de recherche n'a abordé le problème de commande présenté dans ce travail. Le système considéré se compose de deux installations sujettes à des pannes et des réparations aléatoires. Ces installations sont de capacité différente et sont capables de produire deux types de produits finis distincts. L'un des produits finis (médicament de marque) doit être fabriqué à l'interne et l'autre (médicaments générique) peut être fabriqué à l'interne ou être procuré à partir de la sous-traitance. Le but de la sous-traitance est de compenser le manque de capacité de production par rapport à la demande clientèle et de faire face aux occurrences de pannes. La sous-traitance se compose d'une quantité reçue de façon régulière avec un délai de livraison non-négligeable, et d'autres commandes urgentes lancées si nécessaire pour réduire le risque de pénurie. Ces commandes urgentes ont un délai de livraison non-négligeable et aléatoire. Un cas particulier de ce problème a été traité par Dror et al. (2009). Leurs objectifs consistent à proposer une politique de commande qui contribuera à la minimisation des stocks de sécurité et des besoins de stockage, et atteindre un niveau de service à la clientèle de 99,5 %. Ces auteurs ont utilisé plusieurs restrictions et hypothèses qui peuvent nuire à la qualité des résultats calculées. Ils ont également procédé par une approche heuristique en ignorant l'aspect

dynamique et aléatoire des délais de livraison et de l'occurrence des pannes ainsi que le facteur coût. Toutefois, en se référant à la majorité des travaux de la littérature scientifique, il est important de prendre en considération le paramètre coût comme un facteur primordial de décision et de rejoindre les préoccupations des décideurs des entreprises. Notre travail consiste à proposer une approche de résolution et une politique de commande en considérant simultanément le coût et la satisfaction des clients comme deux critères de décision afin de rejoindre les préoccupations des décideurs. Nous expliquant également; dans ce chapitre, la relation entre le niveau de service à la clientèle, le coût total encouru et les paramètres de commande du système. L'approche expérimentale utilisée combine des méthodes statistiques d'optimisation avec la simulation dans le but d'optimiser les paramètres de commande, qui minimisent le coût total encouru en respectant la contrainte de la satisfaction des clients. Elle s'appuie sur les plans d'expérience, l'analyse de variance et la méthodologie de surface de réponse ainsi que sur l'outil de la simulation (Gharbi et al., 2011). Ce dernier un est moyen efficace qui permet de prendre en considération la nature dynamique et stochastique du problème considéré, d'éliminer les hypothèses simplificatrices et non-réalistes et de reproduire fidèlement le comportement du système manufacturier. Notons que la performance de notre politique de commande et/ou notre approche de résolution sera évaluée en comparant ses résultats à ceux obtenus avec celles proposées par Dror et al. (2009), sur le cas particulier qu'ils ont traité.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. Dans la section 1.1, le problème de commande du système manufacturier et la politique proposée sont formulés analytiquement. La section 1.2 résume l'approche de résolution proposée par Dror et al. (2009) et les données de leur système. La section 1.3 définit notre approche expérimentale utilisée pour déterminer les paramètres optimaux de la politique de commande adoptée. Une analyse de sensibilité et une étude comparative des approches de résolution sont également effectuées. La section 1.6 présente une comparaison entre la politique de commande de Dror et al. (2009) et la notre.

1.1 Notation et formulation du problème

1.1.1 Notation

Soit I = {1,2}. La notation suivante sera utilisée tout au long de ce chapitre.

$\boldsymbol{P_i}$: Type du produit i, i ∈ {1: Innovateur , 2: Générique}

$\boldsymbol{x_i(t)}$: Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit P_i au temps t

$\boldsymbol{d_i}$: Taux de la demande du produit P_i

$\boldsymbol{u^{ij}}$: Taux de fabrication du produit P_i sur l'installation M_j

$\boldsymbol{U_{max}^{ij}}$: Taux maximal de fabrication du produit P_i sur l'installation M_j

$\boldsymbol{U_{st}^{R}}$: Taux de sous-traitance régulière du produit P_2 (taux constant)

$\boldsymbol{U_{st}^{U}(.)}$: Taux de sous-traitance urgente du produit P_2

$\boldsymbol{Z_i}$: Capacité de l'espace de stockage du produit P_i

$\boldsymbol{MTBF_j}$: Moyenne des temps de bon fonctionnement de l'installation M_j, j ∈ I

$\boldsymbol{MTTR_j}$: Moyenne des temps de réparation de l'installation M_j, j ∈ I

$\boldsymbol{c_i^+}$: Coût de mise en inventaire par unité de temps par unité de produit i

$\boldsymbol{c_i^-}$: Coût de rupture de stock par unité de temps par unité de produit i

$\boldsymbol{c^e}$: Coût d'espace de stockage

$\boldsymbol{c_j^p}$: Coût de production de l'installation M_j par unité de temps par unité de produit

$\boldsymbol{c_{st}^R}$: Coût de la sous-traitance régulière par unité de temps par unité de produit P_2

$\boldsymbol{c_{st}^u}$: Coût de la sous-traitance urgente par unité de temps par unité de produit P_2

$\boldsymbol{DL}$: Délai de livraison aléatoire de la sous-traitance urgente du produit P_2

1.1.2 Formulation du problème

Dans ce chapitre, nous traitons un système manufacturier qui représente une problématique commune dans l'industrie pharmaceutique. Il est composé de deux installations de fabrication de capacité différente, chacune d'elles est capable de produire deux types de produits finis distincts, le produit Innovateur P_1 (médicament de marque) dont la compagnie

est le seul fabricant et le produit Générique P_2 (médicaments générique). Avant d'être livré aux clients, chaque type de produit finis est conservé dans un espace de stockage sous des conditions idéales pour préserver sa qualité. Les deux installations de fabrication sont sujettes à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent engendrer des ruptures de stock. L'entreprise peut se procurer le produit P_2 à partir de sources externes afin de faire face à l'occurrence de pannes ou d'augmenter la capacité de production des installations. La sous-traitance se compose d'une quantité reçue de façon régulière (U_{st}^R) et d'autres commandes urgentes ($U_{st}^U(.)$) lancées si nécessaire pour réduire le risque de pénurie. Notons que la sous-traitance urgente se caractérise par un délai de livraison de DL unités de temps; avec DL est une variable aléatoire. Cela implique que les commandes urgente lancées à l'instant t arrivent à l'inventaire du produit fini P_2 au temps $t + DL$. La figure 1.1 décrit la structure du système manufacturier étudié.

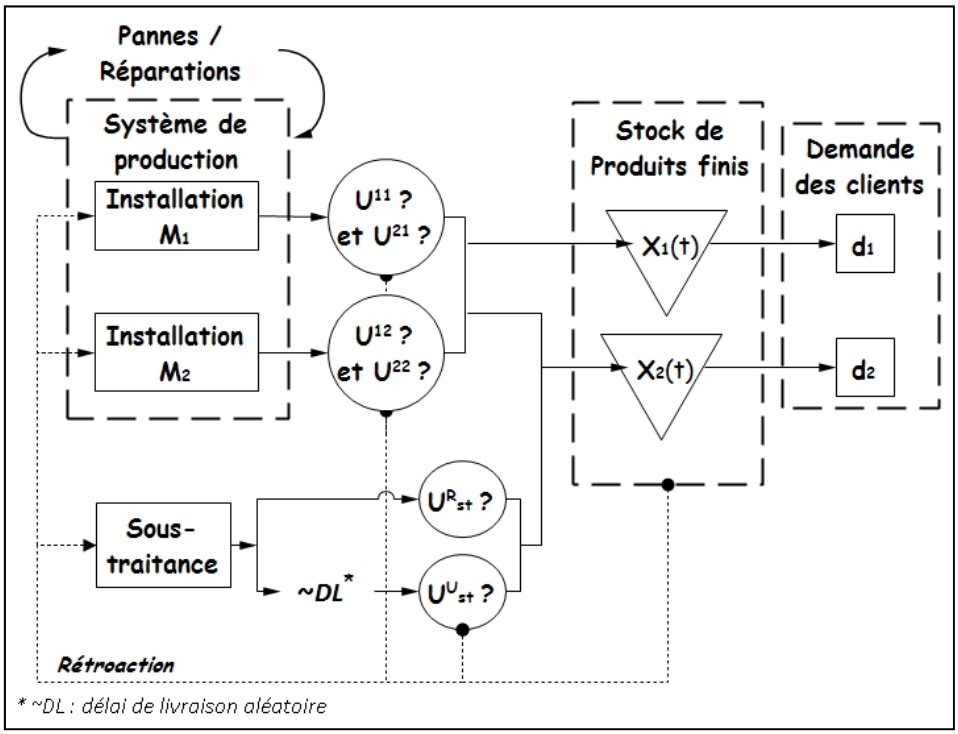


Figure 1.1 Système manufacturier étudié

Dû à l'aspect aléatoire des occurrences des pannes et des activités de réparations, l'état du système est modélisé par deux composantes, d'une part, le niveau d'inventaire cumulatif des

deux produits $X = (x_1, x_2) \in R^2$ ayant une nature continue dans le temps et d'autre part, l'état discret des installations $\alpha(t)$ tel que :

$$\alpha(t) = \begin{cases} 0 : si\ M_1 M_2\ (les\ deux\ machines\ sont\ opérationnelles) \\ 1 : si\ \overline{M_1} M_2\ (M_1\ est\ en\ panne\ et\ M_2\ est\ opérationnelle) \\ 2 : si\ M_1 \overline{M_2}\ (M_1\ est\ opérationnelle\ et\ M_2\ est\ en\ panne) \\ 3 : si\ \overline{M_1 M_2}\ (M_1\ et\ M_2\ sont\ en\ panne) \end{cases}$$

Le comportement dynamique du système est décrit par la variable d'état $X(t)$ avec $X(t) = (x_1, x_2) \in R^2$. Pour tout $\alpha(t) \in M$, avec $M = \{0, 1, 2, 3\}$, l'équation différentielle suivante représente la dynamique des stocks des produits finis :

$$\begin{cases} \dot{x_1}(t) = u^{11}(t, \alpha) + u^{12}(t, \alpha) - d_1\ , & x_1(0) = x_1^0 \\ \dot{x_2}(t) = u^{21}(t, \alpha) + u^{22}(t, \alpha) + U_{st}^R + U_{st}^U(t + DL) - d_2\ , & x_2(0) = x_2^0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Où $x_1^0\ et\ x_2^0$ désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire des produit P_1 et P_2. Soit, $\zeta^j(t)$ $(j = \{1,2\})$, le processus stochastique qui décrit le mode opérationnel de l'installation M_j. Une telle installation est disponible quand elle est opérationnelle $\left(\zeta^j(t) = 1\right)$ et non-disponible quand elle est en réparation $\left(\zeta^j(t) = 2\right)$. Les taux de production à chaque instant doit satisfaire la contrainte de capacité du système donnée par :

$$0 \leq u^{ij}(t, \alpha) \leq U_{max}^{ij} * Ind\{\zeta^j(t) = 1\}, \forall i, j \in \{1,2\}^2 \quad (1.2)$$

Avec,

$$Ind\{\zeta^j(t) = \delta\} = \begin{cases} 1\ \ si\ \zeta^j(t) = \delta, & j = 1,2 \\ 0\ \ sinon \end{cases}$$

Compte tenu de la sous-traitance du produit P_2 (Générique), la capacité du système de production augmente pour être capable de répondre à toute la demande. La contrainte de faisabilité globale au mode $\alpha \in \{0,1,2,3\}$ se formule comme suit :

$$\sum_{j=1}^{2}\left(U_{max}^{.j} * \frac{MTBF_j}{MTBF_j + MTTR_j}\right) + U_{st}^{R} + U_{st}^{U} \geq \sum_{i=1}^{2} d_i \qquad (1.3)$$

Nos variables de décision sont les taux de production $\left(\mathrm{u}^{\mathrm{i1}}(t,\alpha), \mathrm{u}^{\mathrm{i2}}(t,\alpha)\right)$ des installations M_1 et M_2, les taux de la sous-traitance régulière (U_{st}^{R}) et urgente ($U_{st}^{U}(t)$). Rappelons que U_{st}^{U} est utilisé en vu de restaurer le niveau des stocks de sécurité au cas du besoin. En tenant compte de (1.2) et (1.3) et pour chaque mode $\alpha \in M$ et $i = \{1,2\}$, l'ensemble des décisions admissibles est présenté comme suivant :

$$\Gamma = \left\{ \begin{array}{l} \left(\mathrm{u}^{\mathrm{i1}}, \mathrm{u}^{\mathrm{i2}}, U_{st}^{R}, U_{st}^{U}\right): 0 \leq \mathrm{u}^{\mathrm{ij}}(t,\alpha) \leq U_{max}^{ij} * Ind\{\zeta^{j}(t) = 1\}, j = \{1,2\}, 0 \leq U_{st}^{R} \leq d_2, \\ \sum_{j=1}^{2}\left(U_{max}^{ij}(t,\alpha) * \frac{MTBF_j}{MTBF_j + MTTR_j}\right) + U_{st}^{R} + U_{st}^{U}(t + DL) \geq d_1 + d_2, \end{array} \right\} \qquad (1.4)$$

Les arrêts de fonctionnement d'une installation peuvent engendrer des coûts supplémentaires à ceux de production, de sous-traitance, d'inventaire et d'espace de stockage. Il s'agit des coûts de non-satisfaction clientèle dont par exemple les pénalités générées par l'insuffisance du stock et même la perte de clients. Le problème d'optimisation consiste à trouver une commande admissible dans le but de minimiser la fonction du coût moyen total actualisé $\mathrm{J}(.)$ (Gharbi et Kenné, 2003) en respectant la contrainte d'un certain niveau de satisfaction des clients.

$$\mathrm{J}(.) = c^{\mathrm{e}}(Z_1, Z_2) + \mathrm{E}\left\{\int_0^{\infty} \mathrm{e}^{-\rho \mathrm{t}} \mathrm{g}(.)\mathrm{dt}\right\} \qquad (1.5)$$

Avec, c^{e} est le coût d'espace de stockage. En effet, le modèle dispose; en plus du coût d'inventaire, d'un coût d'espace de stockage (c^{e}) dépendant de la capacité de stockage nécessaire pour conserver les deux produits finis avant d'être livrés aux clients. Ce coût pénalise l'espace de stockage et non pas les actions de conservation des produits finis

(Lavoie et al., 2010). Il représente l'amortissement de l'équipement considéré (DeGarmo et al., 1989). Il est sous forme d'un coût moyen par unité de temps. Ce coût croît ausi en fonction de la taille de l'espace de stockage.

ρ est le taux d'escompte et g(.) est la fonction du coût instantanée. Cette fonction est définie à l'instant t comme suit :

$$g(X,U) = \sum_{i=1}^{2}(c_i^+ x_i^+ + c_i^- x_i^-) + \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\left(c_i^p . u^{ij}(t,\alpha)\right) + c_{st}^R . U_{st}^R + c_{st}^u . U_{st}^U(t+DL) \quad (1.6)$$

Où U désigne le vecteur des taux de fabrication et de sous-traitance, X est le vecteur des niveaux d'inventaire (ou de pénurie) des produits finis. Ainsi,

$$\begin{cases} x_i^+ = \max(0, x_i) & si\ x_i \geq 0 \\ x_i^- = \max(-x_i, 0) & si\ x_i < 0 \end{cases}$$

Les coûts de production du produit P_2 (c_2^p) et de sous-traitance (c_{st}^R et c_{st}^u) doivent satisfaire l'inégalité suivante :

$$0 < c_2^p \ll c_{st}^R < c_{st}^u$$

Comme mentionné ci-haut, le problème de la planification de production considéré consiste à établir une politique de commande admissible $(U^*) \in \Gamma$ qui minimisera le coût moyen total actualisé (1.5), en respectant la contrainte de la satisfaction des clients et en considérant les équations et les inégalités (1.1)-(1.4). Cette politique est une rétroaction qui détermine le taux de sous-traitance et celui de production de chaque installation en fonction de l'état du système. La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante, $\forall\ i = \{1,2\}$:

$$v(X) = \inf_{(u^{i1},u^{i2},U_{st}^{R},U_{st}^{U})\in\Gamma} J\left(X,\alpha,u^{i1},u^{i2},U_{st}^{R},U_{st}^{U}\right) \tag{1.7}$$

D'après plusieurs travaux de recherche, la détermination des propriétés de la fonction valeur conduit à des conditions d'optimalité décrites par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB). Cependant, la résolution analytique de ces équations n'est possible que dans certains cas spécifiques, où de simples systèmes de production sont analysés à l'aide des chaînes de Markov (Kenné et Gharbi, 1999). Signalons que d'autres approches ont été proposées dans la littérature comme l'approche numérique de Boukas et Haurie (1990) qui se sont basés sur la méthode de Kushner (Kushner et Dupuis, 1992), pour résoudre les équations de HJB dans le cas où les états du système sont décrits par des processus Markoviens non-homogènes. Toutefois, cette approche est limitée à des systèmes de petite taille avec un nombre limité de produits, de machines et d'états, et ne peut pas être appliquée sur les problèmes complexes de commande stochastique. En raison de la complexité du problème, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique afin de proposer une structure de loi de commande combinant simultanément la planification de la production et de la sous-traitance pour le système manufacturier étudié.

1.1.3 Politique de commande

Dans la démarche de résolution du problème de commande optimale étudié, nous nous sommes basés sur les résultats de : 1) Gharbi et Kenné (2003) qui ont développé la structure d'une politique de commande sous-optimale généralisée dans le cas de plusieurs machines et plusieurs types de produits. 2) Mourani et al. (2008) qui ont traité la relation entre la performance des systèmes de production et le délai de transport des produits finis vers le stock final. 3) Ayed et al. (2011) qui ont utilisé la sous-traitance pour répondre à toute la demande clientèle et finalement, 4) Gharbi et al. (2011) qui utilisent une unité de fabrication seulement si le niveau d'inventaire du produit finis considéré est inférieur à un seuil donné. Des adaptations ont été appliquées comme l'introduction de la sous-traitance et la priorité donnée au produit Innovateur (P_1) dont la compagnie est le seul fabricant. Soient U_{st} l'ensemble des variables de décision relatives à la sous-traitance et $\left(u^{1j}(t,\alpha),u^{2j}(t,\alpha)\right)$

celui des variables de décision relatives à la production des produits finis P_1 et P_2 respectivement. La structure de la politique de commande proposée; qui prendra le nom de la politique de commande générale (G), est formulée par les équations (1.8) - (1.10).

- Pour le produit P_1 :

$$u^{1j}(.) : \begin{cases} U_{max}^{11} + U_{max}^{12} & si\ (x_1 < Z_1) \\ d_1 & si\ (x_1 = Z_1) \\ 0 & ailleurs \end{cases} \forall j \in I \qquad (1.8)$$

- Pour le produit P_2 :

$$u^{2j}(.) : \begin{cases} U_{max}^{21} + U_{max}^{22} & si\ (x_1 > Z_1)\ et\ (x_2 < Z_2) \\ (1-\beta) * (U_{max}^{21} + U_{max}^{22}) & si\ (x_1 = Z_1)\ et\ (x_2 < Z_2) \\ [\gamma(t) * (U_{max}^{21} + U_{max}^{22})] & si\ (x_1 \geq Z_1)\ et\ (x_2 = Z_2) \\ 0 & ailleurs \end{cases} \forall j \in I \qquad (1.9)$$

$$U_{st}(.) : \begin{cases} U_{st}^{R} + U_{st}^{U}(t + DL) & si\ \left(x_2 < S_Q\right)\ et\ (\alpha(t) \neq 0) \\ U_{st}^{R} & ailleurs \end{cases} \qquad (1.10)$$

Avec,

$$U_{st}^{R} + U_{st}^{U} + \left[(1-\beta) * (\sum_{j=1}^{2} \left(U_{max}^{2j} * \frac{MTBF_j}{MTBF_j + MTTR_j} \right)) \right] \geq d_2$$

Les variables β et γ représentent la proportion de l'utilisation de la capacité de production des deux installations, permettant de satisfaire les demandes d_1 (Innovateur) et d_2 (Générique) respectivement. Elles se définissent comme suit :

$$\beta = \frac{d_1}{Somme\ des\ capacités\ des\ deux\ installations\ M_1\ et\ M_2}$$

$$\gamma(t) = \frac{d_2 - U_{st}^r - U_{st}^u(t + DL)}{Somme\ des\ capacités\ des\ deux\ installations\ M_1\ et\ M_2}$$

Les commandes de la sous-traitance urgente U_{st}^U considérées dans (1.10) sont activées tant que le niveau d'inventaire du produit P_2 est inférieur à un seuil S_Q ($x_2 < S_Q$). Où, S_Q est le seuil d'activation des commandes urgentes et $S_Q \leq Z_2$.

Pour démontrer l'efficacité de l'approche de résolution adoptée dans un premier temps, et de la politique de commande proposée dans le deuxième temps, nous optons pour l'étude de cas traité par Dror et autres (2009). Ainsi, les résultats obtenus seront comparés avec la solution obtenue par ces auteurs. Il est intéressant de noter que Dror et al. (2009) semblent eux même s'être inspirés de la politique de Gharbi et Kenné (2003) en apportant des ajustements simples selon la particularité de leur système manufacturier. La section suivante présente plus en détail l'approche de résolution, la politique de commande, les hypothèses supportées par Dror et al. (2009) et les données décrivant le système de production étudié.

1.2 Approche de résolution heuristique et politique de commande proposées par Dror et al. (2009) (HEU_P) pour un cas particulier

Pour une étude de cas, Dror et al. (2009) évaluent le système manufacturier adopté dans ce travail comme complexe, et procèdent par une méthode heuristique pour résoudre ce problème de commande. Leur objectif est d'établir une politique de commande qui contribue à minimiser les stocks de sécurité et les besoins de stockage, tout en respectant la contrainte de satisfaction des demandes des clients pour garantir un niveau de service à la clientèle supérieur ou égal à 99,5 %. La satisfaction des clients dépend de la disponibilité des produits finis. Ainsi, un client est considéré satisfait si sa demande est satisfaite sans retard, dans le cas contraire, le client est non-satisfait. Le tableau 1.1 présente la capacité de production des installations et la quantité de la demande clientèle journalière pour chaque type de produit fini.

Tableau 1.1 Paramètres de la demande et de la capacité de production du système

Demande (st*/jr)		**Capacité de production (st*/jr)**		**Portion de la demande satisfaite par la sous-traitance (U_{st}^{R}) (st*/jr)**
d_1	d_2	$U_{max}^{.1}$	$U_{max}^{.2}$	
2710	2540	3200	1500	
5250		4700		550
**st : tonne standard*				

Il est pertinent de remarquer que la politique de commande heuristique proposée par Dror et al. (2009) représente une simplification de la politique de commande générale formulée dans la section 1.1.2. En partant du fait que le coût de la sous-traitance est très élevé par rapport à celui de la production, ces auteurs fixent le taux de sous-traitance régulière à la valeur de 550 st/jr (5250 - 4700) qui représente la portion de la demande satisfaite par la sous-traitance (tableau 1.1). Le système n'étant pas faisable, Dror et al. (2009) ont considéré des quantités urgentes de produit P_2 ($U_{st}^{U}(t + DL)$) qui sont activées durant la durée de panne d'une installation ou plus ($\alpha(t)$). Ces quantités dépendent de la capacité de l'installation (s) défaillante (s) (M_1 et/ou M_2) et de la durée des activités de réparation. Elles ont pour but de remplacer la capacité de production perdue lors des actions de réparations et de restaurer le niveau d'inventaire des stocks tampons puisque dès la fin des actions de réparation, toute la capacité de production est détournée vers la restauration du niveau d'inventaire du produit P_1. Rappelons que la compagnie considérée est le seul fabricant du produit P_1. En tenant compte des données du problème présentées dans la section 1.1 et le tableau 1.1, la politique de commande de la production et de la sous-traitance est formulée par les équations (1.8), (1.11)-(1.13). Elle prendra le nom de la politique de commande particulière (P).

- Pour Produit P_2 :

$$u^{2j}(.) = \begin{cases} U_{max}^{21} + U_{max}^{22} & si\ (x_1 > Z_1) et\ (x_2 \leq Z_2) \\ (1-\beta) * (U_{max}^{21} + U_{max}^{22}) & si\ (x_1 = Z_1)\ et\ (x_2 \leq Z_2) \\ 0 & ailleurs \end{cases} \quad \forall j \in I \qquad (1.11)$$

$$U_{st}^{R} = (d_1 + d_2) - (U_{max}^{21} + U_{max}^{22}) = 550\ st/jr \qquad (1.12)$$

Et,

$$U_{st}^{U}(t+DL) = \begin{cases} U_{max}^{21}\ st/jr & si\ \alpha(t) = 1 \\ U_{max}^{22}\ st/jr & si\ \alpha(t) = 2 \\ U_{max}^{21} + U_{max}^{22}\ st/jr & si\ \alpha(t) = 3 \\ 0\ st/jr & si\ \alpha(t) = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

Compte tenu de la complexité de ce problème, les auteurs ont ainsi adopté quelques approximations et hypothèses pour réduire la difficulté de la modélisation :

- Les temps de bon fonctionnement et de réparation des installations (MTBF) suivent la loi exponentielle (taux de défaillance constant), avec un temps moyen entre deux pannes consécutives égal à 6,4 mois.
- Les deux installations ne peuvent pas être en état de panne au même moment.
- Aucune panne n'est permise lors de la reconstruction des stocks de sécurité.
- Le délai de livraison des commandes de la sous-traitance urgente est constant.
- Les temps et le coût de mise en course (Setup) sont négligeables.

La solution obtenue par Dror et al. (2009) consiste à construire deux espaces de stockage, atteignant une capacité totale de 38.000 st et de 34.000 st pour les produits finis P_1 (Innovateur) et P_2 (Générique) respectivement. Cependant, cette solution est le résultat d'une approche simplifiée et basée sur le bon sens. Elle repose principalement sur le 99^{e} percentile de la distribution des temps de réparation, dans le but de calculer les inventaires des deux produits finis nécessaires pour assurer la satisfaction de la demande des clients si une installation tombe en panne, et jusqu'à l'instant où l'entreprise peut recevoir de l'approvisionnement externe. Une quantité additionnelle de stocks de produits finis équivalente à une journée de fonctionnement, est utilisée pour compenser la situation où les deux installations tomberaient simultanément en panne. Cette situation n'est pas considérée dans leur travail. Ainsi, la solution de Dror et al. (2009); qui ne résulte pas d'un modèle d'optimisation, ne garantit pas la minimisation des stocks de sécurité et des besoins de stockage autant qu'elle maximise le service à la clientèle.

1.3 Approche de résolution expérimentale proposée (EXP_P)

Dans cette section, nous utilisons une approche expérimentale basée sur la simulation et des méthodes statistiques d'optimisation. Elle sera appliquée sur le modèle présenté dans la section précédente. Cette approche; qui s'adapte bien à la complexité et à la nature dynamique et stochastique du problème, englobe la simulation, les plans d'expérience, l'analyse de variance et la méthodologie de surface de réponse. L'objectif principal de cette approche est d'étudier le comportement réel du système manufacturier et d'en déduire les paramètres optimaux de la politique de commande particulière définie dans la section 1.2 (i.e. Z_1 et Z_2). Ces paramètres minimisent le coût total associé (1.5) en tenant compte de la contrainte de la satisfaction clientèle. Ainsi, les décideurs seront en mesure de prendre des décisions plus éclairées qui tiennent compte des facteurs coût et service à la clientèle. L'utilisation de cette approche nous a permis de relaxer plusieurs hypothèses adoptées par Dror et al. (2009) :

- Selon l'historique des occurrences de pannes, le temps de bon fonctionnement des deux installations (MTBF) suit la loi de Weibull dont les paramètres de forme et d'échelle égalent à 1,53 mois et 6,72 mois respectivement. La distribution des temps de réparation s'ajuste aussi à la loi de Weibull avec un paramètre de formes et d'échelles égalent à 2,09 jours et 9,47 jours respectivement.

- Les deux installations de fabrication peuvent tomber en panne simultanément sans aucune restriction.

- Nous considérons également la possibilité qu'une panne survienne avant la fin de la restauration totale du stock tampon.

- Le délai de livraison de la sous-traitance urgente est variable. Nous le représentons par une loi normale de la même moyenne utilisée par Dror et al. (2009) en ajoutant un écart-type de 3 jours.

Nous présentons dans cette partie, une approche expérimentale utilisée afin d'optimiser les paramètres liés à la politique de commande particulière définie dans la section 1.2. Cette approche consiste en l'élaboration d'un modèle de simulation combiné avec de méthodes d'optimisation statistiques. Les étapes de l'approche utilisée sont décrites comme suit :

- Étape 1 : Définition mathématique du problème

Comme indiqué dans la section 1.1.2, le problème est formulé analytiquement afin de comprendre la dynamique du système de production en fonction de ses états et de définir l'expression du coût total moyen prévu. Notons que la satisfaction des clients est considérée comme une contrainte dans la démarche d'optimisation des paramètres de la politique de commande qui minimisent le coût total.

- Étape 2 : Modélisation par Simulation

Le modèle de simulation utilise la politique de commande heuristique; proposée dans la section 1.2, comme une entrée pour conduire des expériences et évaluer la performance du système. Il considère deux variables de réponse à savoir le coût total et le taux de satisfaction des clients. Le modèle est présenté dans la section 1.3.1.

- Étape 3 : Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse

L'approche des plans d'expérience détermine à partir des valeurs des deux facteurs d'entrée Z_1 et Z_2 (variables indépendantes) et ceux des variables de réponse associées (i.e. le Coût et la satisfaction des clients), les principaux facteurs et leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie (analyse de variance ou ANOVA). Par la suite, la méthodologie de surface de réponse sera utilisée pour définir la relation entre chacun des variables de réponse et les facteurs principaux et leurs interactions significatifs donnée précédemment. Le modèle obtenu est ensuite optimisée afin de déterminer la meilleure combinaison des paramètres de la politique de commande (Z_1 et Z_2) qui minimisent le coût en respectant la contrainte de la satisfaction clientèle requise.

1.3.1 Modèle de simulation

Dans ce travail, nous utilisons le module « Flow Process » du simulateur ARENA et des sous-programmes écrits en langage VBA pour modéliser la dynamique du système de production. Le module « Flow Process » est basé sur une approche combinée par des événements continus et discrets du simulateur ARENA. Certes, le choix de l'outil de développement « Flow Process » repose essentiellement sur la quantité volumineuse des produits finis, la continuité des flux de production et la nature impulsive de la dynamique du système manufacturier, mais également sur sa capacité à raccourcir énormément le temps d'exécution par rapport aux modèles purement discret (Lavoie et al., 2010). En effet, le temps d'exécution d'une simulation ayant une durée de 600.000 unités de temps est égal à 12 secondes. Le diagramme du modèle de simulation est présenté dans la figure 1.2. La modélisation de notre système manufacturier est constituée principalement de neuf parties :

- Bloc ① : Initialisation

Il initialise les variables du modèle (les taux de demande, les taux de la sous-traitance, les paramètres des installations comme les taux de production et leur capacité, etc.). La durée de simulation et la fin de la période Warm-Up; à partir de laquelle les données statistiques sont collectées, sont aussi traitées dans cette étape.

- Bloc ② : Arrivée de la demande

Il agit directement sur le niveau d'inventaire des deux types de produits finis à chaque unité de temps. De ce fait, un test de vérification est alors effectué de façon continue afin de déterminer s'il s'agit d'une rupture de stock ou pas.

- Bloc ③ : Politique de commande

Il est utilisé pour but de choisir les taux de production et de sous-traitance correspondant à la loi de commande ((1.8) et (1.11)-(1.13)). Les décisions sont déterminées en fonction des stocks de produits finis (voir bloc Capteurs ⑧) et en agissant sur l'ouverture et la fermeture des valves. Ces dernières sont destinées au contrôle des flux de la production.

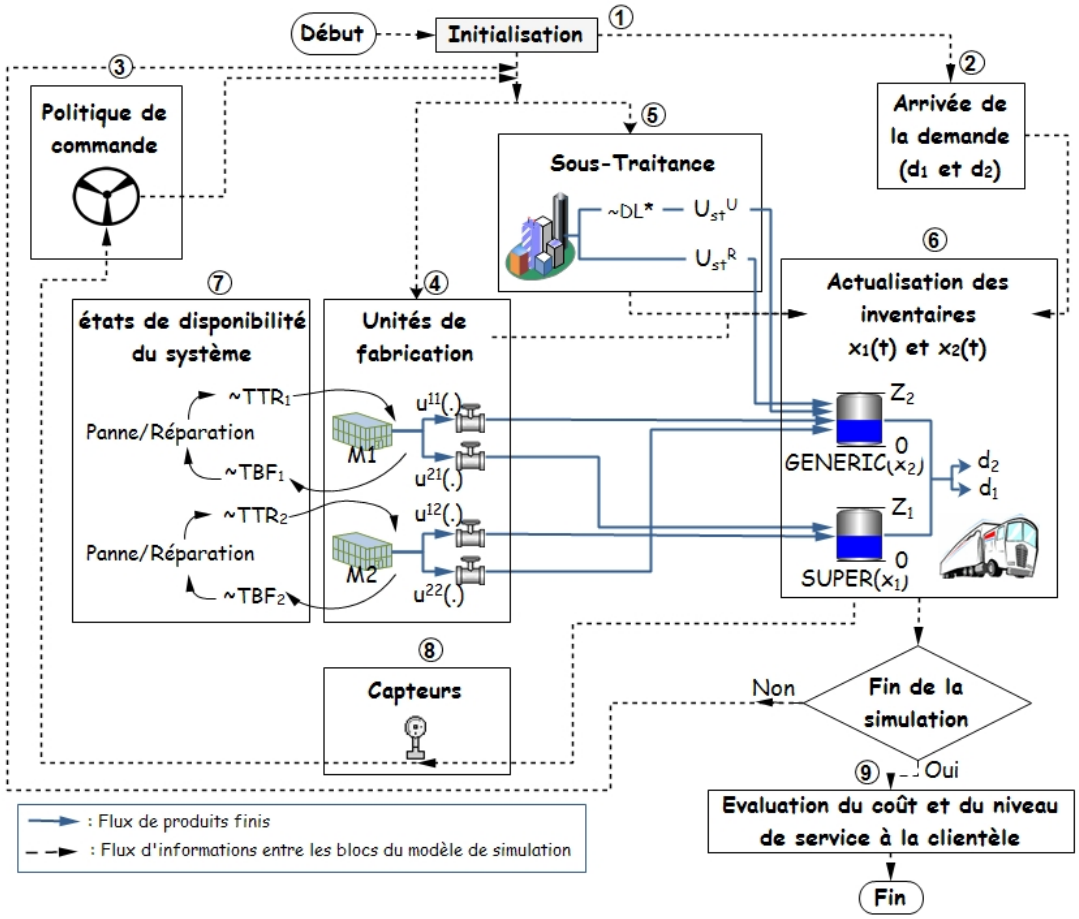


Figure 1.2 Diagramme du modèle de simulation

- Bloc ④ : Unités de fabrication

Il représente l'activité des installations de fabrication selon les décisions de la politique de commande ③. Une telle politique montre que pour chaque installation, l'action d'ouverture et de fermeture des valves influence directement les taux de production des produits finis. Ces derniers représentent la sortie de ce bloc.

- Bloc ⑤ : Sous-traitance

Il applique les directives de la politique de commande ③ en ce qui concerne l'approvisionnement externe. Il s'agit d'une quantité constante que l'entreprise reçoit régulièrement pour satisfaire la demande clientèle (U_{st}^{R}) et d'une quantité supplémentaire (U_{st}^{U}) en cas de panne d'une installation.

- Bloc ⑥ : Actualisation des inventaires

Il met à jour le niveau des inventaires; représentés par des Tanks, à chaque fois qu'une quantité de produits finis est fabriqué, sous-traitée, ou quand une demande clientèle est arrivée. Lorsqu'un type de produit n'est pas en pénurie, sa production augmente son niveau d'inventaire. Dans le cas contraire, elle se contente de satisfaire sa demande en arriérage, c'est-à-dire que la rupture de stock diminue. Chaque Tank est caractérisé par un espace de stockage et est dédié à un seul type de produits finis.

- Bloc ⑦ : États de disponibilité du système

Il définit les temps de pannes et les temps de réparations des installations. Ainsi, au moyen des valves disponibles dans le module « Flow Process », la panne d'une installation est équivalente à la fermeture de la valve associée. Tandis que son état fonctionnel est représenté par l'ouverture de la valve dépendamment de la valeur des taux de production.

- Bloc ⑧ : Capteurs

Il contrôle de façon continue les inventaires des deux types de produits finis et envoie des signaux suite à chaque déclenchement d'une atteinte des seuils 0, Z1 et Z2 au bloc politique de commande ③. Ce dernier décidera; via l'utilisation des valves, de quel type de produit fini à fabriquer et en quelle quantité. Z1 et Z2 représentent la capacité des Tanks.

- Bloc ⑨ : Calcul du coût et de la satisfaction des clients

Il permet d'enregistrer à la fin de la simulation toutes les informations nécessaires pour calculer la valeur moyenne du coût total encouru (1.6), et le pourcentage des commandes satisfaites par types de produits finis à partir des stocks des produits finis sans retard. La satisfaction des clients est liée à la disponibilité des produits finis. Ainsi, pour chaque type de produit finis $P_i,\ i = 1,2$, la satisfaction des clients est calculée comme suit :

$$S(P_i) = 1 - \left[\left(\sum\nolimits_{\mathrm{i}} \mathrm{T_i^{NS}}\right)/\mathrm{T_{Sim}}\right]$$

Avec T_i^{NS} est le temps durant lequel les demandes concernant le produit P_i ne sont pas satisfaites au bon moment, et T_{Sim} représente la durée de la simulation. Nous signalons que l'objectif d'atteindre un niveau de service de 99,5 % est équivalent à :

$$S(P_i) \geq 99{,}5\ \%\ \ \forall i \in \{1,2\} \tag{1.14}$$

1.3.2 Validation du modèle de simulation

Pour valider le modèle de simulation, une représentation graphique de la variation des taux de production et du niveau des stocks des produits finis a été générée (figure 1.3). La simulation du système est réalisée pour Z_1=12000 st et Z_2=9000 st. D'après la figure 1.3, le niveau d'inventaire des deux produits finis augmente jusqu'à leurs seuils critique (Z_1 et Z_2) et se stabilise à ces valeurs ①. Cette stabilité est permise suite à la réception de quantités du produit P_2 de façon régulière (U_{st}^R) ②; à partir de sources externes, pour combler le manque de capacité de production par rapport à la demande des clients. Lors de la panne d'une installation ou plus (③ : panne de l'installation M_1), le niveau des stocks des produits finis diminue jusqu'à la fin des activités de réparations et/ou la réception de la sous-traitance urgente pour l'inventaire du produit P_2 (Générique). En effet, durant la période de réparation d'une installation ($\alpha(t)$), des commandes urgentes sont automatiquement lancées à des fournisseurs pour livrer des quantités supplémentaires du produit P_2 (Générique) ④. Ces quantités dépendent de la capacité de l'installation défaillante (1.13) et bien évidemment de la durée des activités de réparation. Cependant, quand l'installation M_2 tombe en panne ⑤, le stock de sécurité du produit P_2 (Générique) est utilisé pour satisfaire la demande, d'où la diminution de son niveau d'inventaire. D'autre part, le niveau de d'inventaire du produit P_1 reste stable. Cela est expliqué par le fait que l'installation M_1; qui est toujours en fonction, est capable de satisfaire la demande d_1 (Innovateur) ainsi qu'une petite quantité du produit P_2 (Générique). Des commandes urgentes sont également activées afin de restaurer le niveau d'inventaire du produit P_2 après un délai de livraison aléatoire ($U_{st}^U(t + DL)$) ⑥. Notons que puisque l'entreprise est le seul fabricant du produit P_1 (Innovateur), si le niveau d'inventaire du produit P_1 est inférieur à son seuil critique (Z_1), toute installation en état de fonctionnement est utilisée à capacité maximale pour fabriquer ce type de produit ⑦. De tels

comportements ont lieu jusqu'à la fin de la simulation, elles démontrent que le modèle de simulation représente adéquatement la politique de commande décrite dans la section 1.2.

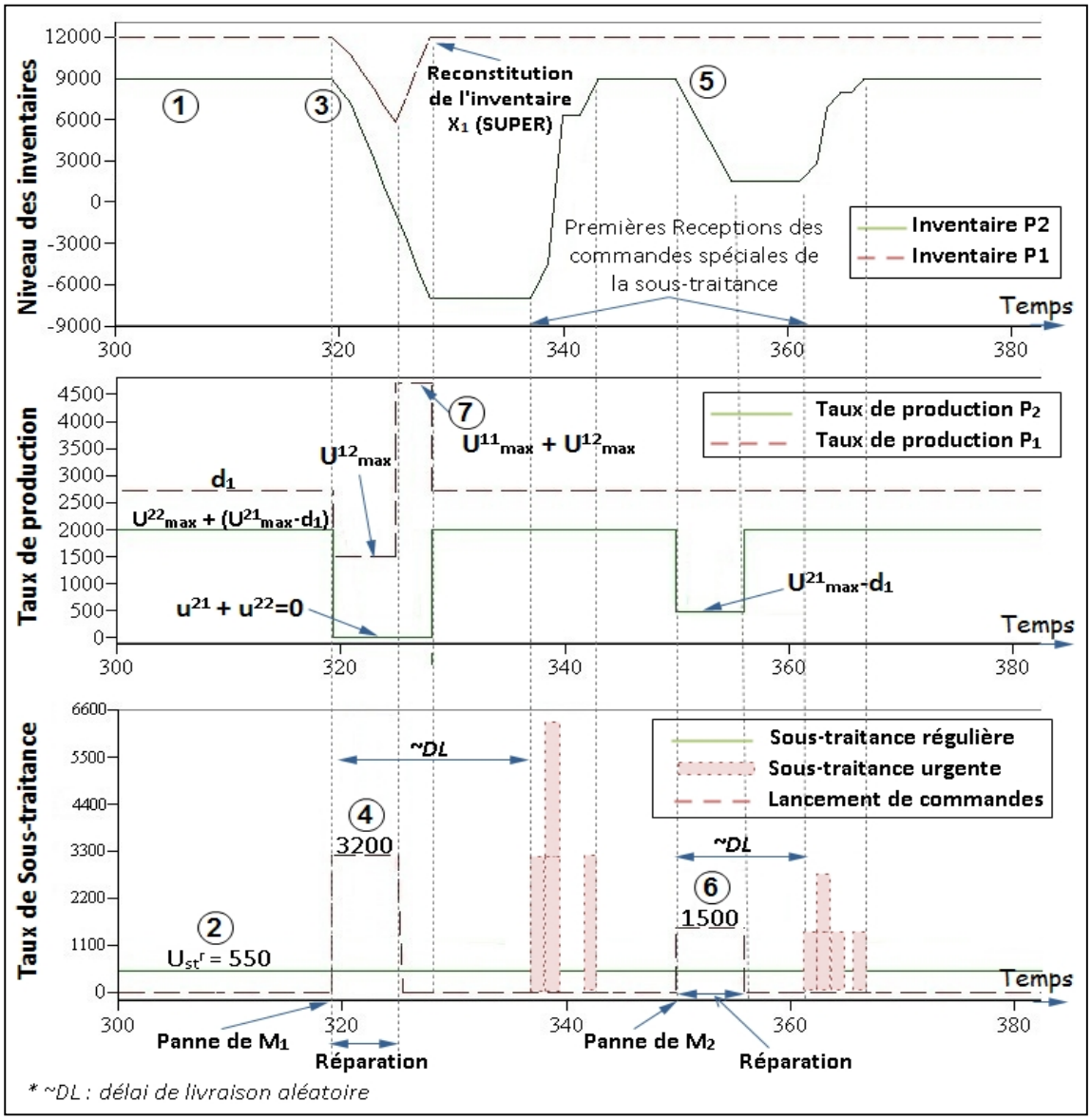


Figure 1.3 Variation des inventaires, des taux de la sous-traitance et des taux de production des deux produits finis (Z_1=12000 et Z_2=10000)

1.3.3 Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse

La section suivante présente la méthodologie adoptée pour optimiser les paramètres de la politique de commande. Les objectifs sont : 1) obtenir la relation entre les variables de réponse du système (i.e. Coût et la satisfaction des clients) et les facteurs (Z_1 et Z_2) ainsi que leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie; 2) calculer les valeurs optimales des paramètres de la politique (facteurs d'entrée) qui minimisent le coût en considérant la contrainte de la satisfaction clientèle pour chaque type de produits finis P_1 et P_2. Nous présentons un exemple numérique afin d'illustrer le concept développé dans ce chapitre. En plus des données du problème (section 1.2), les valeurs des paramètres de la fonction coût (1.5) ont été choisies en s'inspirant de la littérature dans le domaine de la commande optimale et la gestion des stocks. Le tableau 1.2 résume ces paramètres.

Tableau 1.2 Paramètres de coût du système

Paramètres	$(c_1^+; c_2^+)$	$(c_1^-; c_2^-)$	$(c_1^p; c_2^p)$	$(c_{st}^R; c_{st}^u)$
Valeurs	(1; 1)	(100; 120)	(3; 3)	(20; 50)

Notons que le rapport des unités du coût de la pénurie sur celui de l'inventaire ($c_i^- / c_i^+ \geq 100$) traduit la compétition féroce du domaine pharmaceutique et la vision de l'entreprise concernant la maximisation du niveau de service à la clientèle. Comme mentionné dans la section 1.1.2, la relation entre les coûts de production c_2^p et de sous-traitance c_{st}^R et c_{st}^u satisfont bien la contrainte suivante :

$$0 < c_2^p \ll c_{st}^R < c_{st}^u$$

En se basant sur le travail de Gharbi et Kenné (2003), nous supposons que la fonction valeur (1.7) est convexe et nous adoptons le plan factoriels complets 3^2 (Gharbi et al., 2011). Ce type de plans factoriels complets est souvent utilisé pour des modèles ayants une petite quantité de facteurs, il donne des résultats plus précis puisque chaque interaction est estimée séparément. Cinq réplications ont été effectuées pour chaque combinaison de facteurs, et

donc, 45 ($3^2 * 5$) simulations ont été exécutées. La durée de simulation est égale à T_{sim}= 600.000 unités de temps, elle est suffisamment longue pour atteindre le régime permanent. A partir de quelques expériences de simulation préliminaires, les plages du domaine expérimental ont été établies, elles sont présentées dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 Niveaux des variables indépendantes

Facteur	Niveau inférieur	Centre	Niveau supérieur	Descriptions
$\mathbf{Z_1}$	2000	10000	18000	Niveau du stock P_1 (Innovateur)
$\mathbf{Z_2}$	17000	23500	30000	Niveau du stock P_2 (Générique)

En utilisant le logiciel de statistiques STATGRAPHICS, une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) est effectuée sur les données de la simulation. La figure 1.4 présente les effets des variables indépendantes (Z_1 et Z_2), leur interaction et leur effet quadratique sur les variables de réponse (Coût et satisfaction clientèle pour chaque type de produits finis). De plus, les coefficients de corrélation ajustée (R^2) montrent que plus de 99 % de la variabilité observée du coût prévu et de la satisfaction des clients est expliqués par les modèles (1.15), (1.16) et (1.17) de surface de réponse (Montgomery, 2008). Une analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance a été également effectuée pour vérifier la conformité du modèle. Les fonctions de surface de réponse des variables dépendantes du système sont données par les équations suivantes :

$$Coût\ Total = 141837 - 1{,}07706.Z_1 - 4{,}09158.Z_2 + 8{,}18192.10^{-5}.Z_1^2 + 9{,}22334.10^{-5}.Z_2^2 \quad (1.15)$$

$$Satisfaction\ S(P_1) = 96{,}0052 + 4{,}30682.10^{-4}.Z_1 - 1{,}19771.10^{-8}.Z_1^2 \quad (1.16)$$

$$Satisfaction\ S(P_2) = 89{,}0623 + 6{,}99364.10^{-4}.Z_2 - 1{,}13255.10^{-8}.Z_2^2 \quad (1.17)$$

Ces trois fonctions sont utilisées pour calculer les paramètres optimaux de la politique de commande qui minimisent le coût (1.15) en respectant la contrainte de la satisfaction des clients, donnée par les équations (1.16) et (1.17). Les résultats obtenus sont : $Z_1^* = 12370$ st

et $Z_2^* = 25245$ st. Ceci correspond à un coût total minimal égal à 96 522,53 et un niveau de service égal à $S(P_1) = S(P_2) = 99{,}5\ \%$.

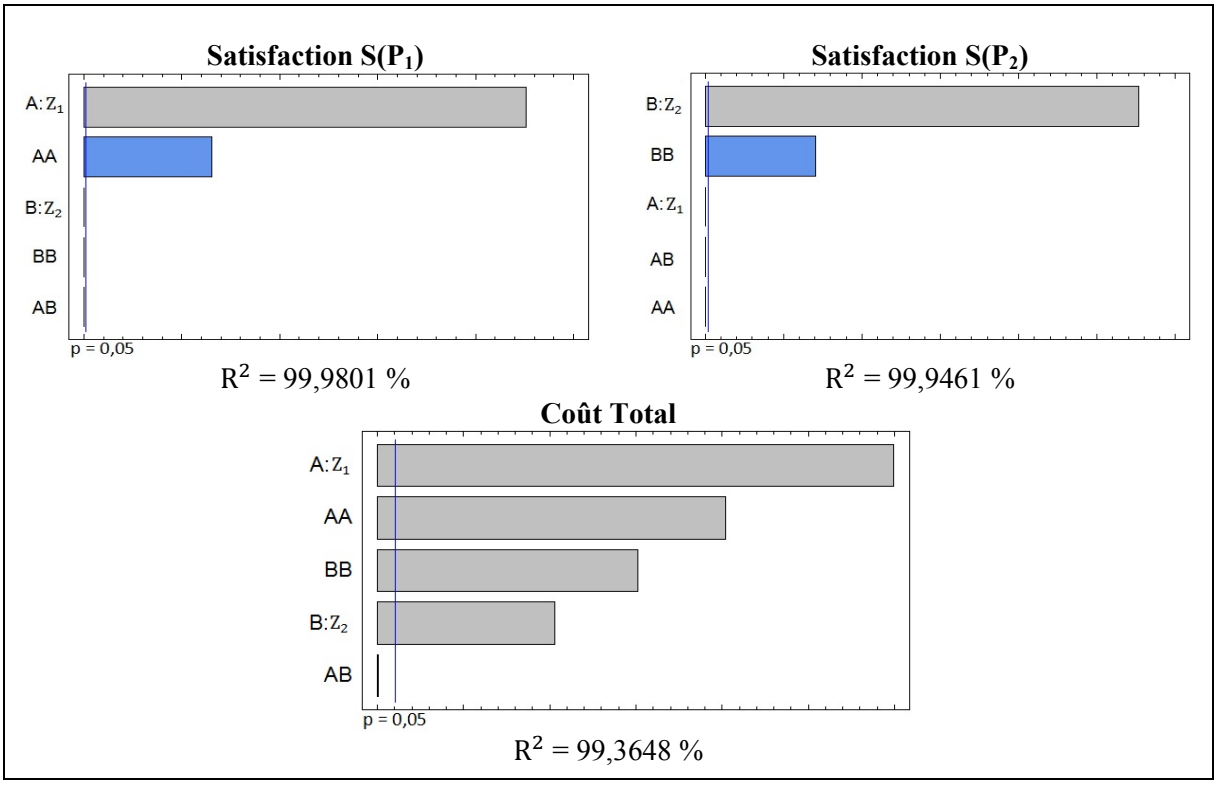


Figure 1.4 Diagramme de Pareto pour les deux variables dépendantes du système

Selon les résultats présentés dans la figure 1.5, nous remarquons que la valeur des paramètres optimaux de la politique de commande reste constante puis augmente en fonction de la croissance de la satisfaction des clients. Cette augmentation est due à la réaction du système qui cherche à réduire le risque de rupture de stock. Cependant, la fourchette pendant laquelle les paramètres de commande sont constants, s'applique aux situations où la valeur de Z_1^* et Z_2^* qui minimisent le coût total encouru, engendre un niveau de service supérieur à celui exigé par la contrainte de la satisfaction des clients (1.14). En effet, lorsque la contrainte de satisfaction clientèle est supprimée, la valeur de Z_1^* et Z_2^* calculée; qui minimise le coût total encouru, génère un niveau de service de 98,3 % et 99 % pour les types de produits P_1 et P_2 respectivement. Ainsi, si on exige un niveau de service de 98 % par exemple, le système ne va pas diminuer la valeur de Z_1^* et Z_2^* afin d'éviter l'augmentation du coût total.

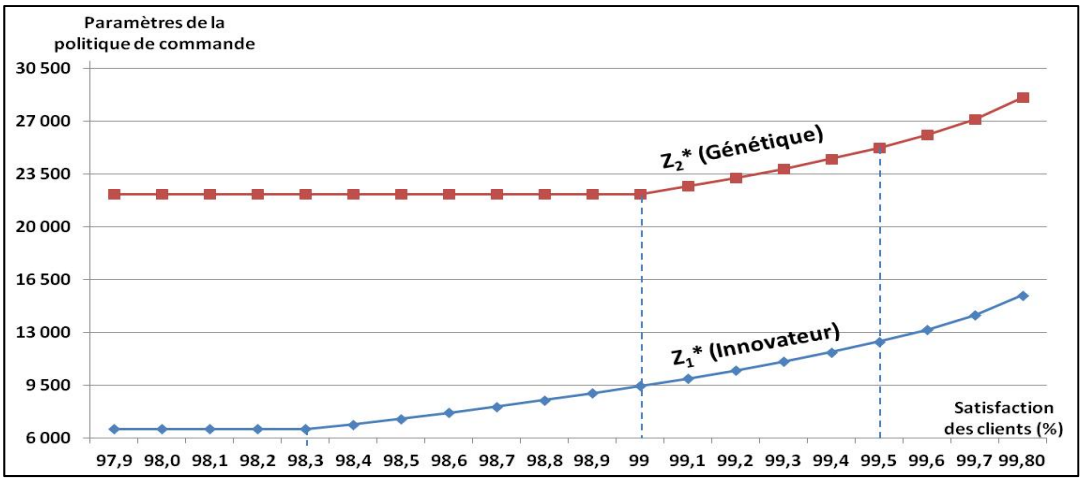


Figure 1.5 Variation des paramètres optimaux de la politique de commande en fonction de la satisfaction des clients (modèle EXP_P)

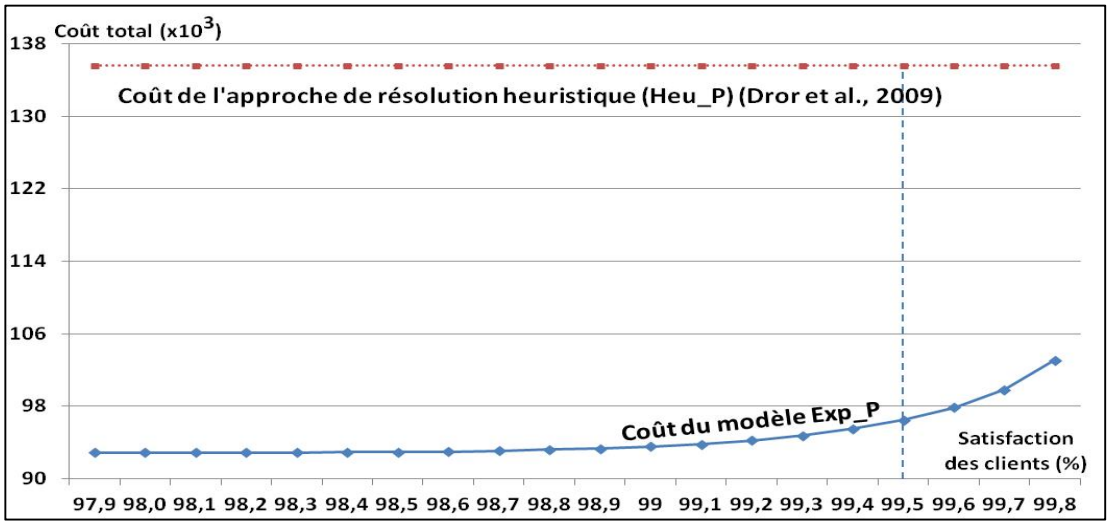


Figure 1.6 Variation du coût total optimal en fonction de la satisfaction des clients (modèle EXP_P)

À l'exception des cas où les valeurs de Z_1^* et Z_2^* sont constantes face à l'augmentation de la satisfaction des clients (figure 1.5), la figure 1.6 montre que la valeur du coût total croît en fonction de la satisfaction des clients, mais reste inférieur à celle obtenue en injectant la valeur de Z_1 et Z_2 proposée par Dror et al. (2009) dans le modèle de simulation. La croissance du coût total est due essentiellement à l'augmentation des paramètres de contrôle Z_1 et Z_2 (figure 1.5) et donc à l'augmentation des coûts d'inventaire et d'espace de stockage.

Nous rappelons que pour atteindre un niveau de service à la clientèle de 99,5 %, le modèle de Dror et al. (2009); appelé ici l'Approche de Résolution Heuristique (HEU_P), propose des capacités de stockage de 38.000 st pour le produit P_1 (Innovateur) et de 34.000 st pour le produit P_2 (Générique). Afin de calculer le coût moyen correspondant à la solution proposée par Dror et al. (2009), dix réplications ont été effectuées avec l'aide de l'outil de simulation. Le tableau 1.4 présente les solutions des deux modèles permettant d'atteindre la valeur de 99,5 % de la satisfaction clientèle.

Tableau 1.4 Solutions des deux modèles

Approche de résolution	$\mathbf{Z_1}$	$\mathbf{Z_2}$	**Coût**	**Satisfaction P_1**	**Satisfaction P_2**
Heuristique (HEU_P)	38 000	34 000	135 585,04	99,99 %	99,83 %
Expérimentale (EXP_P)	12 370	25 245	96 522,53	99,50 %	99,50 %

Il est intéressant de noter que la simulation de la solution proposée par Dror et al. (2009) montrent que le niveau de service à la clientèle atteint une valeur de 99,99 % et 99,83 % pour les produits finis P_1 et P_2 respectivement. C'est-à-dire qu'ils ont dépassé l'objectif de 99,5 % mais sans tenir compte des répercussions possible sur les coûts générés. En plus de permettre aux décideurs de la compagnie de prendre une décision plus éclairée, les résultats présentés dans le tableau 1.4 indiquent que pour une satisfaction de la clientèle de 99,5 % (la cible du niveau de service exigé), l'approche de résolution présentée dans ce chapitre permet de réduire le coût total de la politique de 28,81 % par rapport à la solution proposée par Dror et al. (2009). Toutefois d'autres analyses s'imposent pour évaluer la qualité des résultats obtenus et le comportement du système. Pour vérifier la validité de la solution, nous avons entré les paramètres optimaux (Z_1^*=12 370 et $Z_2^* = 25\ 245$); obtenus par le modèle (1.15) avec (1.16) et (1.17) comme contrainte, dans le modèle de simulation. Après n=100 réplications, la valeur du coût total moyen obtenue est égale à 98 580,50. Nous confirmons que la valeur du coût optimal (tableau 1.4) appartient bien à l'intervalle de confiance à 95 % (1.18).

$$\left(\overline{C.T.} \pm t_{1-(\frac{\alpha}{2})}^{n-1}\sqrt{\frac{S^2}{n}}\right) = [95\ 356{,}65;\ 101\ 804{,}34] \quad (1.18)$$

Où,

$\overline{\boldsymbol{C.T.}}$: Coût total moyen de 100 réplications

$\boldsymbol{n}$: Nombre de réplications

$\boldsymbol{\alpha}$: Probabilité complémentaire au niveau de confiance (fixé à 95 %)

$\boldsymbol{S^2}$: Variance de l'échantillon

$\boldsymbol{t_{1-(\frac{\alpha}{2})}^{n-1}}$: Coefficient de distribution de Student

1.3.4 Analyse de sensibilité

Une série d'exemples numériques a été considérée afin de confirmer la robustesse de l'approche de résolution et l'efficacité de la politique de commande. Effectivement, nous avons étudié l'effet de différentes combinaisons des paramètres du coût; dérivés du scénario de base, sur les paramètres de contrôle du modèle et le coût total encouru. Ainsi, les améliorations apportées sont confirmées dans différents contexte. Ces configurations sont également évaluées par rapport au modèle de base pour étudier le comportement du système. Nous rappelons que pour remplir la contrainte de satisfaction des clients de 99,5 %, le système a dû accroître la valeur des paramètres de commande Z_1^* et Z_2^* jusqu'à 12 370 st et 25 245 st respectivement (figure 1.5). En conséquence, contrairement à la littérature du contrôle optimal ((Gharbi et al., 2011, 2006) et (Lavoie et al., 2010)), la variation des paramètres du coût du système n'a pas d'influence sur la valeur des variables indépendantes du modèle Z_1^* et Z_2^* (tableau 1.5). En effet, face à la variation des paramètres de coût : c_i^+, c_i^- et c^e , $i \in \{1,2\}$), le système; qui cherche à minimiser le coût total encouru, ne pourra pas augmenter de plus la valeur de Z_1^* et Z_2^* pour réduire le risque de pénurie, ni diminuer sa valeur pour éviter des coûts supplémentaires d'inventaire et d'espace de stockage. Ceci n'est pas possible puisque le système doit garder un niveau de service de 99,5 %. Dans ce sens, la variation de la valeur de Z_1^* et Z_2^* est observée lorsque les coûts de pénurie sont très élevés

($c_1^- \geq 240$ et/ou $c_2^- \geq 210$), et/ou les coûts d'inventaire (c_i^+) et d'espace de stockage (c^e) sont négligeables.

Il est pertinent d'ajouter que la variation du coût de production n'affecte pas significativement les paramètres de la politique de commande (Z_1^* et Z_2^*) même si la contrainte de la satisfaction des clients est supprimée. Ce phénomène peut être expliqué par les directives de la politique de commande puisque les installations de fabrication fonctionnent toujours à capacité maximal durant toute la période de leur disponibilité. Par conséquent, la quantité fabriquée des deux types de produits finis ne dépend pas de l'état de l'inventaire. Ainsi, les seuils critiques (Z_1^*, Z_2^*) resterons fixe lors de la variation des coûts de production. Dans ce sens, puisque la sous-traitance urgente ne dépend que de l'état des installations et du délai de réparation, la variation des paramètres de coût du système n'influence pas la valeur moyenne du taux de la sous-traitance urgente (U_{st}^U). Cette valeur représente 5,67 % du coût total.

1.4 Politique de commande générale (EXP_G) : U_{st}^R est une variable de décision

Cette section fera l'objet d'une comparaison entre la politique de commande proposée par Dror et al. (2009) et la notre qui considère les taux de la sous-traitance régulière (U_{st}^R) et urgente (U_{st}^U) ainsi que le seuil de lancement des commandes (S_Q) comme variables de décision. Il est question de la politique de commande générale présentée dans la section 1.1.2. Nous rappelons qu'afin de comparer notre approche expérimentale avec l'approche de résolution heuristique proposée par Dror et al. (2009) (voir section 1.3), nous avons fixé, le taux de sous-traitance régulière à la valeur de 550 st/jr comme dans le cas de Dror et al. (2009), puisque le coût de la sous-traitance est très élevé par rapport à celui de la production. Toutefois, en tenant compte de la disponibilité moyenne des installations de fabrication, la quantité minimale de la sous-traitance requise pour satisfaire toute la demande clientèle est calculée comme montré dans l'équation (1.19).

Tableau 1.5 Analyse de sensibilité du modèle EXP_P pour un niveau de service de 99,5 % et comparaison des améliorations du coût

Scénario	c_i^+		c^e	c_i^-		c_i^p		c_{st}^R	c_{st}^u	Z_1^*	Z_2^*	Coût total		Amélioration du coût (%)	Remarque
	P_1	P_2		P_1	P_2	P_1	P_2					EXP_P	HEU_P		
Base	**1**	**1**		**100**	**120**	**3**	**3**	**20**	**50**	**12370**	**25245**	**96 522,53**	**135 585,04**	**28,81**	**Cas de base**
1	**0,8**	1	±0 %	100	120	3	3	20	50	12370	25245	94 098,07	128 036,62	30,60	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
2	**1,2**	1	±0 %	100	120	3	3	20	50	12370	25245	98 947,43	143 133,46	27,02	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
3	1	**0,8**	±0 %	100	120	3	3	20	50	12370	25245	91 729,05	129 380,13	32,35	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
4	1	**1,2**	±0 %	100	120	3	3	20	50	12370	25245	101 315,95	141 789,95	25,27	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
5	1	1	**-20 %**	100	120	3	3	20	50	12370	25245	91 176,73	128 447,04	32,75	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
6	1	1	**20 %**	100	120	3	3	20	50	12370	25245	101 868,59	142 723,04	24,87	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
7	1	1	±0 %	**80**	120	3	3	20	50	12370	25245	96 230,80	135 584,37	29,03	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
8	1	1	±0 %	**120**	120	3	3	20	50	12370	25245	96 814,58	135 585,71	28,59	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
9	1	1	±0 %	100	**100**	3	3	20	50	12370	25245	96 202,60	135 446,67	29,05	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
10	1	1	±0 %	100	**140**	3	3	20	50	12370	25245	96 841,55	135 723,41	28,58	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
11	1	1	±0 %	100	120	**2**	3	20	50	12370	25245	93 816,00	132 878,78	30,81	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
12	1	1	±0 %	100	120	**4**	3	20	50	12370	25245	99 229,34	138 291,30	26,81	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
13	1	1	±0 %	100	120	3	**2**	20	50	12370	25245	94 639,24	133 701,34	30,20	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
14	1	1	±0 %	100	120	3	**4**	20	50	12370	25245	98 406,15	137 468,74	27,42	$Z_1^* \leftrightarrow, Z_2^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$

Où EXP_P : Approche de résolution expérimentale proposée, HEU_P : Approche de résolution heuristique proposée par Dror et al. (2009).

$$(U_{st}^{R} + U_{st}^{U})_{min} = d_1 + d_2 - \sum_{j=1}^{2}\left(U_{max}^{ij} * \frac{MTBF_j}{MTBF_j + MTTR_j}\right) = 771\ st/jr, \forall i = 1{,}2 \quad (1.19)$$

Avec, $MTBF_j$ représente la moyenne des temps de fonctionnement de la machine M_j et $MTTR_j$ indique la moyenne des temps de réparation de la machine M_j.

En effet, le fait de choisir un taux de sous-traitance régulier égal à 550 st/jr, tend à augmenter le risque de rupture de stock puisqu'en cas de panne, la seule source pour restaurer le niveau des stocks de sécurité; à savoir la sous-traitance urgente, dépend d'un délai de livraison relativement long et aléatoire. De plus, ce moyen coûte beaucoup plus cher ($c_{st}^{R} < c_{st}^{u}$). D'autre part, le système; face aux perturbations aléatoires de son processus de fabrication, est obligé de se protéger en augmentant la valeur des paramètres (Z_1 et Z_2). Cette réaction génère des coûts d'inventaire et d'espace de stockage élevés.

En raison du nombre élevé des paramètres de commande de notre modèle ($Z_1, Z_2, U_{st}^{R}, U_{st}^{U}$ et S_Q), nous traitons cette partie en deux étapes. Premièrement, nous utilisons un plan de tamisage afin d'évaluer l'importance de chacune des variables indépendantes pour le cas d'étude considéré (Montgomery, 2008). Cette étape ne permet pas de déterminer la valeur optimale des paramètres de commande, mais plutôt de mesurer l'importance de ces paramètres et de retenir ceux qui ont un effet significatif sur le coût total encouru. La deuxième étape consiste à trouver les fonctions de surface de réponse des variables dépendantes du système en fonction des facteurs significatifs, puis à déterminer la solution optimale. Le plan de tamisage adopté est un $2\text{^}5$ avec trois points au centre à 35 essais. Trois réplications ont été conduites pour chaque combinaison de facteurs, donc un total de 105 simulations ont été exécutées.

Sachant que S_Q dépend du niveau d'inventaire du produit P_2, la relation suivante est toujours vérifiée $S_Q < Z_2$. Ainsi, une nouvelle variable β est ajoutée aux modèles de simulation afin de remplacer le paramètre S_Q dans les plans d'expérience. Cette variable se définisse par $S_Q = \beta * Z_2$ avec $\beta \in [0,1]$. Une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) est par la

suite effectuée sur les données résultantes de la simulation via l'utilisation du logiciel de statistiques Statgraphics. Cette analyse a pour but d'étudier et de comprendre les effets des paramètres de commande de la politique de commande générale ($Z_1, Z_2, U_{st}^R, U_{st}^U$ et β) sur le coût total encouru. Les effets des principaux facteurs et leurs interactions, ainsi que la valeur R^2 ajustée (les coefficients de corrélation ajustée) sont présentés dans la figure 1.7.

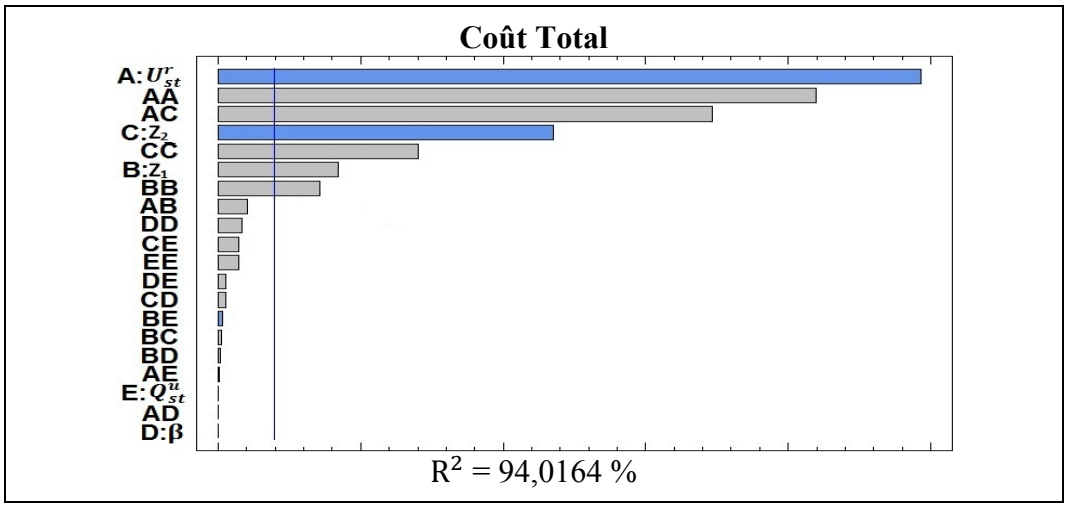


Figure 1.7 Diagramme de Pareto pour la politique EXP_G avec cinq paramètres de commande

D'après la figure 1.7, les modèles de simulation expliquent plus de 94 % de la variabilité observée du coût total prévu (Montgomery, 2008). Elle montre également que les deux facteurs (U_{st}^U et β), leurs interactions doubles et leur effet quadratique sont non-significatifs à un niveau de confiance de 95 %. Ceci est normal vu que la sous-traitance urgente coute plus cher ($c_{st}^R < c_{st}^u$) et dépend d'un délai de livraison aléatoire et long (voir section 4). En conséquence, le taux de la sous-traitance urgente (U_{st}^U) et le seuil de lancement des commandes urgentes (S_Q) ne sont plus considérés dans la politique de commande générale. Notons que l'équation (1.19) devient $U_{st}^R \geq 771\ st/jour$.

Dans la suite du problème, nous adoptons la même approche et les mêmes outils que la section 4, sauf que l'objectif cette fois consiste à déterminer la valeur optimale de trois paramètres de la politique de commande générale définie dans la section 1.1.2

(i.e. Z_1, Z_2 et U_{st}^R). Ces derniers minimisent le coût total encouru (1.5) en fonction de la contrainte de la satisfaction clientèle. Pour le même exemple numérique (voir section 1.3.3), un plan factoriels complets 3^3 est également utilisé et cinq réplications ont été effectuées pour chaque combinaison de facteurs, donc un total de 135 ($3^3 * 5$) simulations ont été exécutées. Le logiciel de statistiques Statgraphics est également utilisé pour effectuer différents analyses statistiques comme : l'analyse de variance multifactorielle (ANOVA), le calcul des coefficients de régression, la génération des surfaces de réponse et l'analyse des résidus et la vérification de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance. D'après les coefficients de corrélation ajustée (R^2) obtenus, notre modèle correspond bien à la forme des données du système (R^2(Coût) = 95,94 %, $R^2(P_1)$ = 99,89 % et $R^2(P_2)$ = 99,43 %). Les fonctions de surface de réponse sont données comme suit :

$$Coût = 225264 - 98{,}1925.Z_1 - 1{,}39053.Z_2 - 9{,}10823.U_{st}^r + 1{,}82307.10^{-2}.Z_1^2 + 3{,}14554.10^{-3}.Z_1.U_{st}^r + 9{,}86961.10^{-5}.Z_2^2 + 1{,}78154.10^{-4}.{U_{st}^r}^2 \quad (1.20)$$

$$S(P_1) = 96{,}0385 + 4{,}28961.10^{-4}.Z_1 + 5{,}62309.10^{-6}.U_{st}^r - 1{,}20904.10^{-8}.Z_1^2 \quad (1.21)$$

$$S(P_2) = 79{,}0008 + 1{,}28159.10^{-3}.Z_2 + 1{,}14436.10^{-2}.U_{st}^r - 1{,}824.10^{-8}.Z_2^2 - 3{,}69338.10^{-7}.Z_2.U_{st}^r - 1{,}4465.10^{-6}.{U_{st}^r}^2 \quad (1.22)$$

Le tableau 1.6 présente les solutions des trois modèles traité dans ce chapitre qui permettent un niveau de service à la clientèle supérieur ou égal à 99,5 %.

Tableau 1.5 Solutions des trois modèles étudiés pour un niveau de service supérieur ou égal à 99,5 %

Approche de Résolution	Politique	Sigle	Z_1^*	Z_2^*	${U_{st}^R}^*$	Coût
Heuristique	Particulière	HEU_P	38 000	34 000	550	135585,04
Expérimentale	Particulière	EXP_P	12 370	25 245	550	96 522,53
Expérimentale	Générale	EXP_G	12 319	7 523	2 128	88 633,39

Les résultats présentés dans le tableau 1.6 montrent que la politique de commande générale EXP_G lorsqu'elle est combinée avec l'approche expérimentale donne un gain économique encore plus important. Ce gain atteint la valeur de 34,63 % par rapport à la solution recommandée par Dror et al. (2009). Il est composé d'une amélioration de 28,81 % apportée par l'approche expérimentale et de 5,82 % obtenue par la politique de commande. Notons que puisque la sous-traitance concerne seulement le produit P_2, la politique de commande générale EXP_G n'affecte pas significativement la valeur de Z_1^*.

1.4.1 Effet du niveau de service à la clientèle sur les paramètres de commande

En utilisant l'équation (1.20) avec les contraintes (1.21) et (1.22), nous avons déterminé la courbe des paramètres optimaux de la politique de commande et le coût associé en fonction de la variation de la satisfaction des clients (figure 1.8 – 1.11). La figure 1.8 présente la variation de la valeur des paramètres de commande selon le niveau de service à la clientèle.

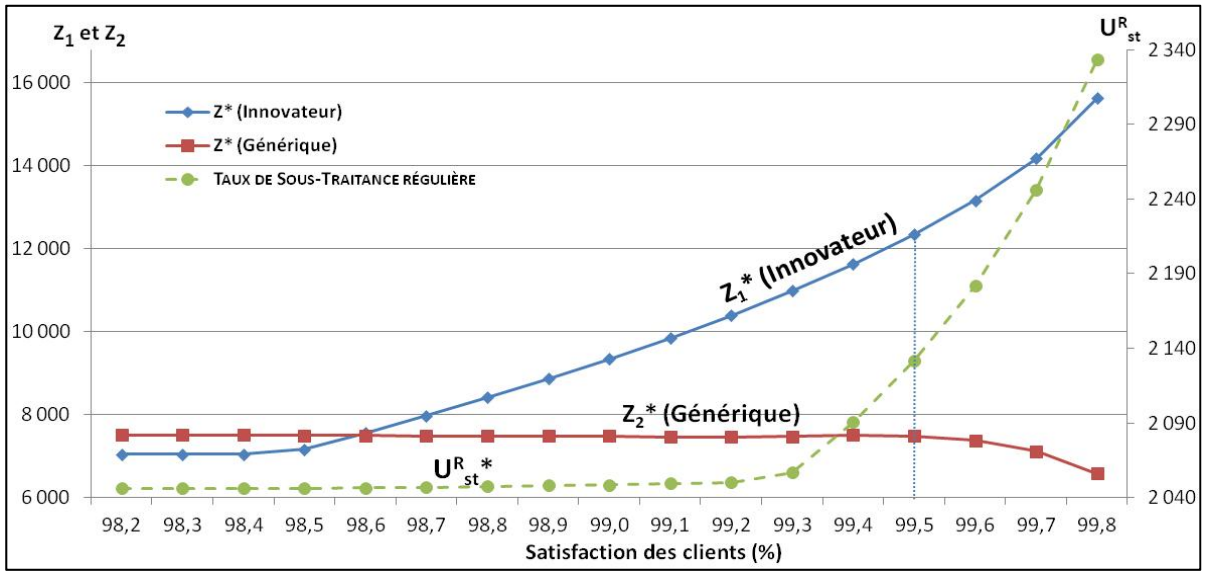


Figure 1.8 Variation des paramètres optimaux de la politique EXP_G en fonction de la satisfaction des clients

Comme déjà observé dans la figure 1.5, les résultats de la figure 1.8 montrent que le paramètre optimal Z_1 augmente en fonction de la satisfaction des clients dans le but de

réduire les ruptures de stock du produit P_1. Par contre, en ce qui concerne le produit P_2, la croissance du niveau de service à la clientèle exigé permet l'augmentation de la valeur de $U_{st}^{R}{}^{*}$; au lieu de celle de Z_2^*. En effet, l'augmentation de $U_{st}^{R}{}^{*}$ dans ce cas devient plus économique que celle de Z_2^* qui génèrera des coûts très élevés surtout ceux de l'espace de stockage. Rappelons que ce dernier pénalise l'espace de stockage sous forme d'un coût moyen par unité de temps et par intervalle dépendamment de la valeur de Z_2 (section 2.2). Les quantités additionnelles de la sous-traitance régulière sont également utilisées pour réduire l'impact des pannes des installations et accélérer la restauration de l'inventaire du produit P_2. Ce choix d'augmenter $U_{st}^{R}{}^{*}$ implique une réduction significativement la valeur de Z_2 (figure 1.8) pour le coût total encouru. Nous signalons que la fourchette durant laquelle les paramètres de commande sont constants correspond aux situations où la valeur de Z_1^*, Z_2^* et $U_{st}^{R}{}^{*}$, engendre un niveau de service supérieur à celui exigé par la contrainte de la satisfaction des clients. Effectivement, quand la contrainte de satisfaction clientèle est supprimée, la valeur de Z_1^* et Z_2^* calculée; qui minimise le coût total encouru, génère un niveau de service de 98,47 % et 99,28 % pour les types de produits P_1 et P_2 respectivement. Par conséquent, pour un niveau de service de 98 % par exemple, le système ne va pas diminuer la valeur de Z_1^* et Z_2^* afin d'éviter l'augmentation du coût total.

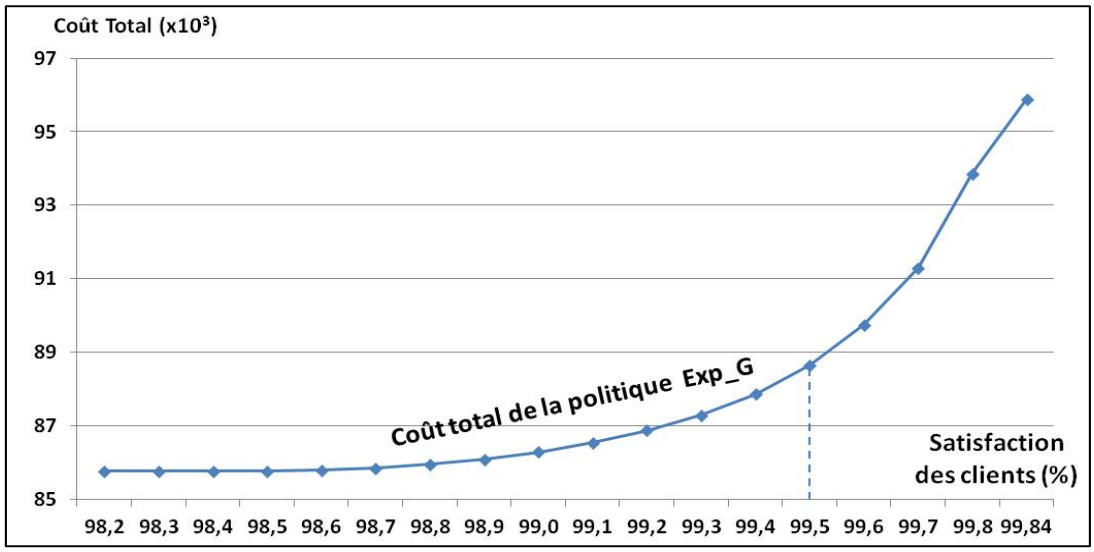


Figure 1.9 Variation du coût total optimal en fonction de la satisfaction des clients (EXP_G)

D'après la figure 1.9, nous constatons que le coût total croît de façon exponentielle en fonction de la satisfaction clientèle sans jamais dépasser celui proposé par Dror et al. (2009). Cette croissance est expliquée par l'augmentation des paramètres de la politique de commande Z_1^* et U_{st}^R et donc par la croissance des coûts d'inventaire et d'espace de stockage pour le produits P_1 ainsi que du coût de la sous-traitance régulière pour P_2 (figure 1.8).

Afin de confirmer le choix de notre modèle, nous effectuons la même analyse mais en adoptant la condition suivante : $U_{st}^R \leq 2046$. Cette condition oblige le système à augmenter la valeur de Z_2^* pour atteindre un niveau de service plus important, puisque U_{st}^R doit resté inférieur ou égal à 2046 (valeur optimal obtenu pour $S(P_1) = S(P_2) = 98{,}2\ \%$). La politique équivalente prendre le nom G.2. La figure 1.10 résume les résultats trouvés.

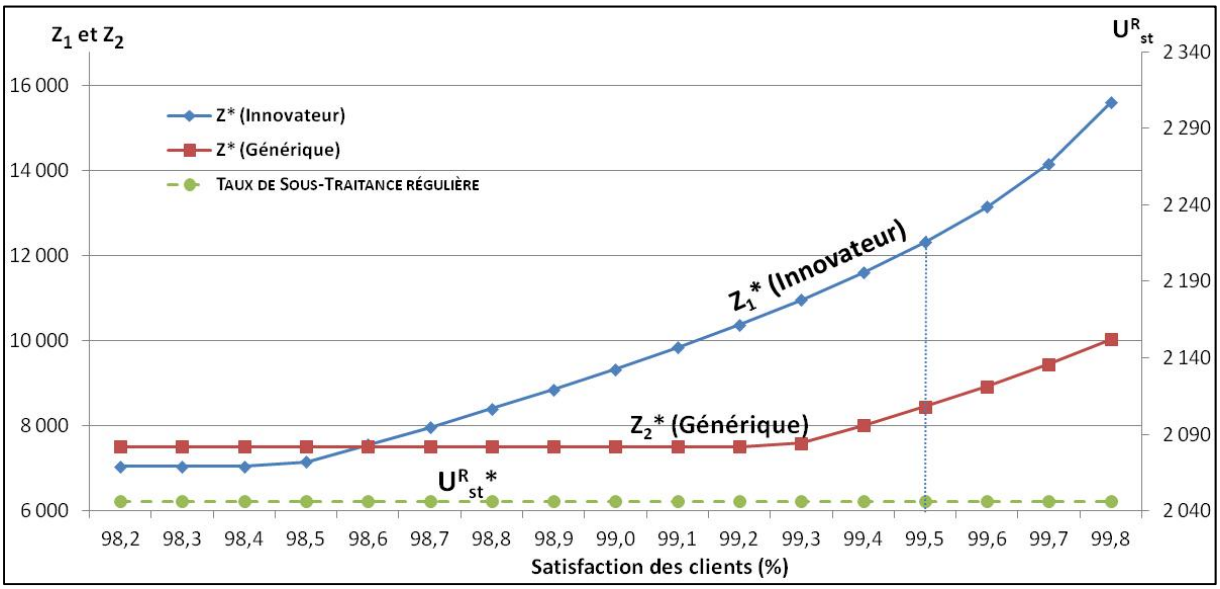


Figure 1.10 Variation des paramètres optimaux du modèle EXP_G.2 en fonction de la satisfaction des clients lorsque $U_{st}^R \leq 2046$

Dans ce sens, la figure 1.11 présente la différence du coût total entre les deux politiques EXP_G et EXP_G.2 selon le niveau de service à la clientèle. Elle démontre l'avantage d'augmenter la valeur du taux la sous-traitance régulière (U_{st}^R) au lieu de celle de Z_2^* pour

atteindre un niveau de service plus important. Cette différence du coût total est exprimé par $D.C.(U_{st}^{R}) = C.T._{\text{EXP_G.2}} - C.T._{\text{EXP_G}}$.

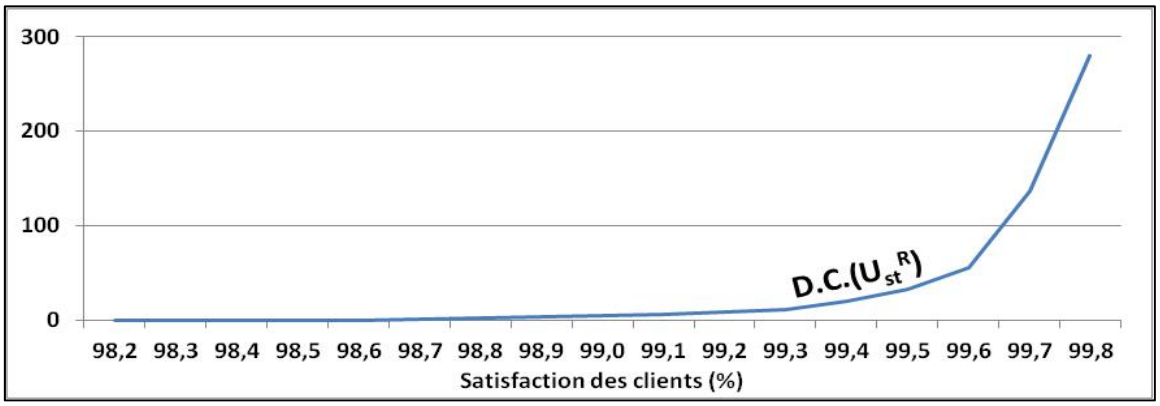


Figure 1.11 Différence de coût total entre les politiques EXP_G et EXP_G.2 en fonction de la satisfaction des clients

1.4.2 Effet du coût de pénurie du produit P_2 (c_2^-) sur les paramètres de commande

D'après le tableau 1.6, la considération du taux de la sous-traitance régulière comme variable de décision dans la politique EXP_G a permis d'augmenter la valeur de U_{st}^{R} et de réduire considérablement le seuil critique Z_2 du produit P_2 (Générique). Le seuil critique Z_1 du produit P_1 (Innovateur) a faiblement diminué puisque la sous-traitance ne concerne que le produit P_2 (Générique). Compte tenu de la valeur de la quantité minimale de la sous-traitance ($U_{st}^{R} \geq 771\ st/jour$), nous remarquons que la valeur optimale du taux de la sous-traitance (tableau 1.6) est supérieure au double de la quantité minimale. En conséquence, 30,34 % de la capacité de production des installations est non-utilisée. Cette valeur n'inclut pas les arrêts de maintenance. Ce phénomène inattendu est dû à la réaction du modèle qui doit simultanément satisfaire la contrainte de la faisabilité du système (1.4) et se protéger contre les fluctuations des événements aléatoires (occurrences des pannes, durées des actions de réparations, etc.). De plus, en raison des coûts élevés des pénuries des produits finis et du niveau de service à la clientèle imposé (99.5 %), le modèle cherche à éviter les ruptures des stocks et donc à minimiser leur impact sur le coût et la satisfaction des clients, en augmentant la valeur de U_{st}^{R} au dépend de l'utilisation des installations de fabrication.

Les figures 1.12 et 1.13 représentent l'attitude du système face à la variation du coût de pénurie du produit P_2 (Générique) et la satisfaction des clients respectivement. Elles montrent que la croissance de c_2^- pour une satisfaction des clients de 99,5 %, n'affecte pas la valeur de Z_1^* mais augmente la capacité de stockage du produit P_2 (Z_2 augmente) afin d'éviter des coûts supplémentaires de pénurie (figure 1.12). Ce comportement; observé par Gharbi et al. (2011, 2006) et Lavoie et al. (2010), a pour effet de réduire le risque de rupture de stock et de croître la valeur de la satisfaction clientèle. En conséquence, le système décide de diminuer la valeur de $U_{st}^{R^*}$ (figure 1.13) dans le but de réduire le coût de la sous-traitance régulière tout en gardant un niveau de service minimal de 99,5 %. De plus, la figure 1.13 montre que la diminution de $U_{st}^{R^*}$ croît le pourcentage d'utilisation de la capacité des deux installations de l'entreprise. En effet, en plus d'utiliser $U_{st}^{R^*}$ pour accélérer la restauration du niveau d'inventaire du produit P_2, $U_{st}^{r^*}$ permet de satisfaire une partie importante de la demande des clients d_2. Ainsi, lorsque la valeur de $U_{st}^{R^*}$ diminue, la capacité utilisée à la fabrication du produit P_2 par les deux installations augmente pour satisfaire toute la demande d_2.

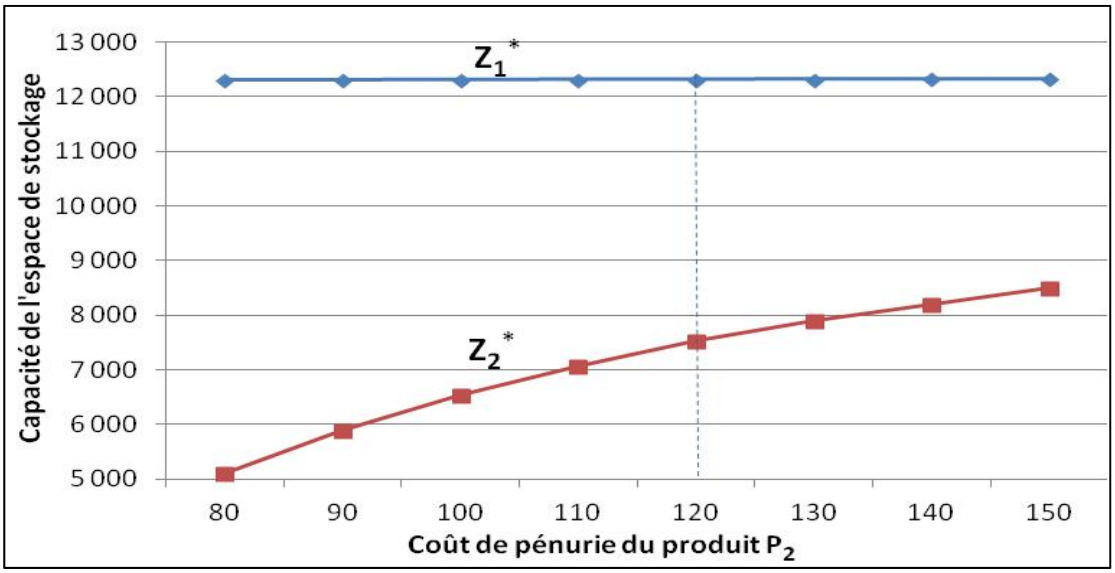


Figure 1.12 Variation de la valeur optimale de la capacité de stockage des produits finis P_1 et P_2 en fonction du c_2^- pour un niveau de service de 99,5 %

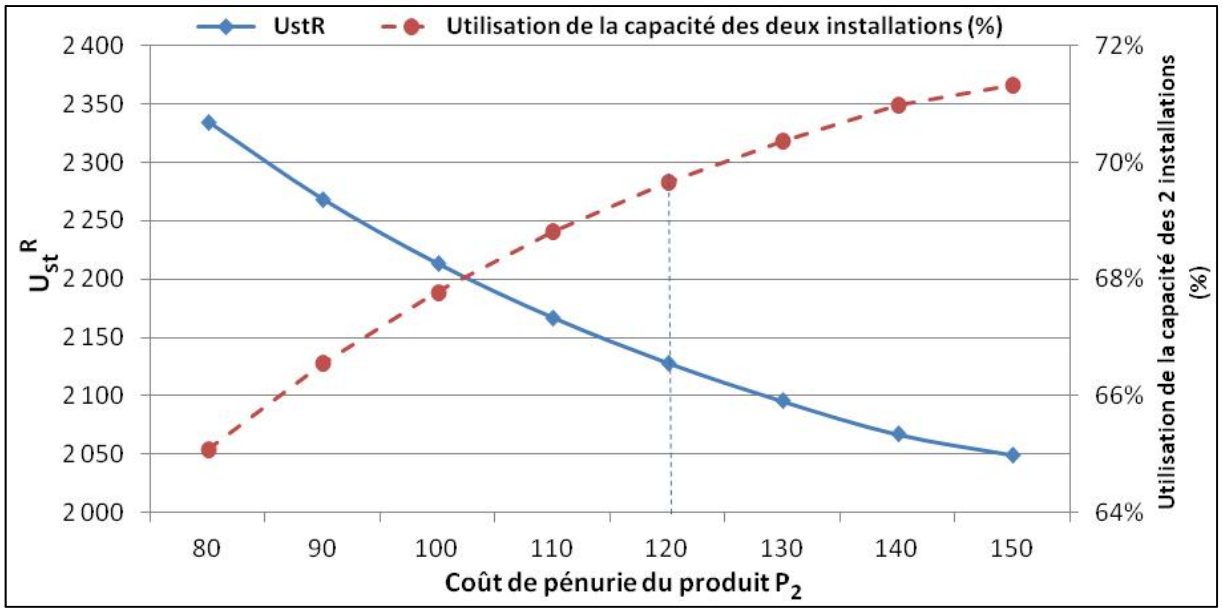


Figure 1.13 Variation de la sous-traitance régulière et du pourcentage d'utilisation de la capacité (U.C.) des installations en fonction du c_2^- pour un niveau de service de 99,5 %

1.4.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est également été réalisée dans le but de valider la robustesse de et l'efficacité de la politique de commande générale. Ainsi, nous avons vérifié si le modèle réagit correctement aux conditions ci-dessous.

- Variation de c_1^+ (scénarios 1 et 2)

Comme déjà observé dans la section 1.3.4, cette variation n'a pas d'influence sur la valeur optimale des paramètres de commande (Z_1^*, Z_2^* et U_{st}^R). Ce phénomène est dû au fait que l'ajout de la sous-traitance comme variable de décision ne concerne que le produit P_2.

- Variation de c_2^+ (scénarios 3 et 4)

Lorsque c_2^+ augmente, la capacité de l'espace de stockage dédiée au produit P_2 diminue (Z_2^* diminue) afin d'éviter des coûts supplémentaires d'inventaire et d'espace de stockage. Cette diminution implique un risque plus important de rupture de stock et un niveau de service à la clientèle plus faible. D'où l'augmentation de la valeur de $U_{st}^{R\,*}$. La croissance du coût total

encouru est due essentiellement à l'augmentation des coûts d'inventaire et d'espace de stockage du produit P_2. Le contraire se produit quand c_2^+ diminue.

- Variation de c^e (scénarios 5 et 6)

Cette variation affecte la politique de commande en même sens que celle de c_2^+.

- Variation de c_1^- (scénarios 7 et 8)

Comme déjà expliqué dans la section 1.3.4, cette variation n'affecte pas la valeur des paramètres de commande du système. Cela est dû au fait que l'ajout de la sous-traitance comme variable de décision ne concerne que le produit P_2.

- Variation de c_2^- (scénarios 9 et 10)

La variation de c_2^- a un effet inverse sur les paramètres de commande comparée avec celle du coût d'inventaire (c_2^+). En effet, quand c_2^- augmente, Z_2^* augmente afin d'éviter des coûts supplémentaires de pénurie. Cette augmentation a pour effet de croître la valeur de la satisfaction clientèle. Par conséquent, le système diminue la valeur de $U_{st}^{R\,*}$ dans le but de réduire le coût de la sous-traitance régulière tout en gardant un niveau de service minimal de 99,5 %. L'augmentation du coût total encouru est due essentiellement à la croissance des coûts de pénurie. Le contraire se produit lorsque c_2^- diminue.

- Variation de c_1^p (scénarios 11 et 12)

Comme déjà observé dans la section 1.3.4, cette variation n'a pas d'influence sur la valeur optimale des paramètres de commande (Z_1^*, Z_2^* et U_{st}^R). Ceci est expliqué par la priorité donné au produit P_1 (Innovateur) dont la compagnie est le seul fabricant. En raison de satisfaire la demande des clients, ce type de produit est fabriqué à l'interne quelque soit son coût de production.

- Variation de c_2^p (scénarios 13 et 14)

La variation du coût de production c_2^p affecte le taux de la sous-traitance régulière ($U_{st}^{r\,*}$) et le niveau du seuil critique (Z_2^*) du produit (P_2). Ce phénomène est justifié par le fait que le

modèle EXP_G a permis de remplacer un pourcentage de la capacité de production du produit P_2 par la sous-traitance, contrairement au modèle présenté dans la section 1.3 où les installations sont utilisées à capacité maximale tout au long de leur période de disponibilité. Ainsi, l'augmentation du c_2^p croît la valeur de $U_{st}^{r\,*}$ afin de réduire la quantité fabriquée du produit P_2. D'où la diminution de Z_2^*. Le contraire se produit lors de la réduction c_2^p.

- Variation de c_{st}^R (scénarios 15 et 16)

Lorsque c_{st}^R augmente, $U_{st}^{R\,*}$ diminue afin d'éviter des coûts supplémentaires de sous-traitance régulière. Cette diminution de $U_{st}^{R\,*}$ a pour effet d'augmenter le risque de rupture de stock. Par conséquent, le système accroît la valeur de Z_2^* pour réduire les coûts de pénurie et garder un niveau de service de 99,5 %. L'augmentation du coût total est due essentiellement à la croissance de coût de la sous-traitance régulière. Le contraire se produit quand c_{st}^R diminue.

Les données du tableau 1.7 révèlent que l'augmentation (diminution) du coût de la sous-traitance régulière croît (réduit) le pourcentage d'utilisation de la capacité des deux installations. Comme déjà mentionné dans la section 1.4.2, cette réaction est due au fait que la sous-traitance régulière est utilisée pour satisfaire la demande des clients d_2 et pour restaurer du niveau d'inventaire du produit P_2. Notons que seul le taux de fabrication du produit P_2 influence la variation du pourcentage d'utilisation de la capacité des deux installations. Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que l'approche adoptée dans ce travail est robuste et permet de réduire considérablement les coûts du système manufacturier étudié. En effet, en comparaison avec la solution de (Dror et al., 2009), les modèles développés dans le présent chapitre sont plus avantageux en termes de coût. Effectivement, l'utilisation de l'approche de résolution expérimentale a permis une amélioration allant de 24,87 % à 32,75 %, puis la politique de commande générale a encore réduit le coût total de 5,04 % jusqu'à 11,76 %. Au total, le gain réalisé en combinant l'approche de résolution expérimentale avec la politique de commande générale varie entre 32,38 % et 37,91 %.

Tableau 1.7 Analyse de sensibilité du modèle EXP_G pour un niveau de service de 99,5 % et comparaison des améliorations du coût

Cas	c_i^+		c^e	c_i^-		c_i^p		c_{st}^R	Utilisation de la capacité des deux installations (%)	$U_{st}^{R^*}$	Z_1^*	Z_2^*	Coût Total			Amélioration du coût (%)		Remarque
	P_1	P_2		P_1	P_2	P_1	P_2						EXP_G (1)	EXP_P (2)	HEU_P (3)	(3) - (2)	(3) - (1)	
Base	**1**	**1**		**100**	**120**	**3**	**3**	**20**	**69,66**	**2 128**	**12 319**	**7 523**	**88 633,4**	**96522,5**	**135585,0**	**28,81**	**34,63**	**Cas de base**
1	**0,8**	**1**	±0 %	100	120	3	3	20	69,66	2 128	12 319	7 532	86 218,5	94098,1	128036,6	30,60	36,41	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
2	**1,2**	**1**	±0 %	100	120	3	3	20	69,66	2 128	12 319	7 532	91 048,5	98947,4	143133,5	27,02	32,85	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
3	1	**0,8**	±0 %	100	120	3	3	20	74,46	1 906	12 328	9 959	86 924,0	91729,0	129380,1	32,35	35,89	$U_{st}^{r*} \downarrow, Z_2^* \uparrow, C^* \downarrow$
4	1	**1,2**	±0 %	100	120	3	3	20	65,05	2 338	12 310	5 069	89 871,7	101316,0	141790,0	25,27	33,72	$U_{st}^{r*} \uparrow, Z_2^* \downarrow, C^* \uparrow$
5	1	1	**-20%**	100	120	3	3	20	73,97	1 928	12 327	9 721	85 236,5	91176,7	128447,0	32,75	37,13	$U_{st}^{r*} \downarrow, Z_2^* \uparrow, C^* \downarrow$
6	1	1	**20%**	100	120	3	3	20	65,84	2 301	12 311	5 517	91 684,8	101868,6	142723,0	24,87	32,38	$U_{st}^{r*} \uparrow, Z_2^* \downarrow, C^* \uparrow$
7	1	1	±0 %	**80**	120	3	3	20	69,66	2 128	12 319	7 523	88 384,7	96230,8	135584,4	29,03	34,81	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
8	1	1	±0 %	**120**	120	3	3	20	69,66	2 128	12 319	7 523	88 882,2	96814,6	135585,7	28,59	34,45	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
9	1	1	±0 %	100	**100**	3	3	20	67,78	2 213	12 315	6 546	88 654,5	96202,6	135446,7	29,05	34,61	$U_{st}^{r*} \uparrow, Z_2^* \downarrow, C^* \downarrow$
10	1	1	±0 %	100	**140**	3	3	20	70,98	2 067	12 321	8 210	88 561,1	96841,5	135723,4	28,58	34,68	$U_{st}^{r*} \downarrow, Z_2^* \uparrow, C^* \uparrow$
11	1	1	±0 %	100	120	**2**	3	20	69,66	2 129	12 319	7 520	85 927,6	93816,0	132878,8	30,81	36,62	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \downarrow$
12	1	1	±0 %	100	120	**4**	3	20	69,66	2 129	12 319	7 520	91 339,8	99229,3	138291,3	26,81	32,63	$Z_1^* \leftrightarrow, C^* \uparrow$
13	1	1	±0 %	100	120	3	**2**	20	71,82	2 028	12 323	8 648	88 178,3	94639,2	133701,3	30,20	34,96	$U_{st}^{r*} \downarrow, Z_2^* \uparrow, C^* \downarrow$
14	1	1	±0 %	100	120	3	**4**	20	67,64	2 220	12 315	6 467	88 996,7	98406,1	137468,7	27,42	34,36	$U_{st}^{r*} \uparrow, Z_2^* \downarrow, C^* \uparrow$
15	1	1	±0 %	100	120	3	3	**18**	65,65	2 311	12 311	5 394	84 189,5	95422,6	135442,4	29,62	37,91	$U_{st}^{r*} \uparrow, Z_2^* \downarrow, C^* \downarrow$
16	1	1	±0 %	100	120	3	3	**22**	74,48	1 905	12 328	9 969	92 674,9	97622,6	137642,4	28,00	31,65	$U_{st}^{r*} \downarrow, Z_2^* \uparrow, C^* \uparrow$

Où EXP_G : Politique de commande générale, EXP_P : Approche de résolution expérimentale proposée, HEU_P : Approche de résolution heuristique proposée par Dror et al. (2009).

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de commande optimale pour un système manufacturier qui représente une problématique commune dans l'industrie pharmaceutique. Ce système est constitué de deux installations; de capacité différente, sujettes à des pannes et des réparations aléatoires. Elles fabriquent deux types de produits distincts : un produit de marque protégé par un brevet et un autre générique doit être procuré à partir de sources externe pour satisfaire toute la demande clientèle. Ce problème est formulé par un modèle de programmation dynamique et stochastique en considérant les taux de production et de sous-traitance comme variables de décisions. Face à la complexité du système considéré et des limites des approches de résolution analytique, nous avons opté pour une approche expérimentale intégrant la simulation à des techniques d'optimisation statistique. Il s'agit de déterminer expérimentalement la valeur optimale des paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru en tenant compte de la contrainte de la satisfaction des clients. Cette possibilité de considérer simultanément le coût et la satisfaction des clients est plus proche des préoccupations des décideurs. De plus, en se basant sur la littérature, nous avons développé une politique de commande générale qui considère simultanément les taux de production et de sous-traitance comme une variable de décision. La combinaison de l'approche expérimentale avec la politique de commande générale a permis d'obtenir des améliorations en termes de coût, allant jusqu'à 37 % par rapport à un modèle déjà existant dans la littérature (Dror et al., 2009). Nous avons aussi démontré que pour des raisons économiques, le système choisit d'augmenter la valeur du taux de la sous-traitance régulière; au dépend de la production interne, dans le but d'atteindre un niveau de service plus important. Des analyses de sensibilité ont été réalisées et certains comportements intéressants ont été observés, confirmant ainsi la robustesse de l'approche utilisée et l'efficacité de la politique de commande proposée.

D'autres extensions des modèles proposés peuvent être envisagées. Il faut noter que nous avons ignoré dans ce travail les paramètres de coût et de temps de la mise en course (Setup). Cependant, dans certaines situations où les produits finis sont plus distincts, lorsque la production passe d'un type de produit à un autre, le système industriel implique souvent des

machines non-flexibles avec des durées et des coûts de mise en course non négligeables. Cette amélioration sera considérée dans nos travaux de recherche futurs.

CHAPITRE 2

ÉTUDE COMPARATIVE DE POLITIQUES DE COMMANDE POUR UN SYSTÈME MANUFACTURIER IMPARFAIT AVEC SETUP

Ce chapitre traite la classe des systèmes manufacturiers imparfaits qui impliquent des machines non-flexibles et vise à analyser les interactions entre les politiques de commande de production et de Setup (mise en course). Il s'appuie sur la structure de la politique de production et de Setup déjà développés dans la littérature scientifique par Bai et Elhafsi (1997), Hajji et al. (2004) et Gharbi et al. (2006).

Dans le domaine de la recherche des politiques de commande pour les systèmes industriels, le concept de la politique à seuil critique (HPP) est la base sur laquelle plusieurs approches ont été développées (Kenne et Gharbi, 2000). Feng et Yan (2000) ont démontré l'optimalité de la politique à seuil critique pour un système manufacturier stochastique discret avec une demande aléatoire. Sharifnia (1988) a traité le même problème que Akella et Kumar (1986) en considérant plusieurs états de la machine, il a montré que la politique de production optimale a une structure de multiples seuils critiques (MHPP). Caramanis et Sharifnia (1991) ont utilisé une méthode de décomposition afin de concevoir une politique sous-optimale de planification de la production pour un système manufacturier. Ainsi, ils ont transformé un problème de commande complexe à plusieurs types de produits (M_1P_n) en plusieurs problèmes de commande plus simples avec un seul type de produit (M_1P_1) qu'on peut traiter analytiquement. Sethi and Zhang (1999) ont présenté une formulation explicite du problème de commande optimale d'un système de production composé d'une seule machine capable de produire plusieurs types de produits, en négligeant le temps et le coût de Setup. Cependant, aucun système manufacturier n'est parfaitement flexible. Parmi les auteurs qui ont abordé cette classe des systèmes de fabrication stochastiques, Yan et Zhang (1997) ont élaboré les conditions d'optimalité décrites par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB) pour un système manufacturier composé d'une seule machine capable de produire deux types de produits finis. Sachant que ces équations n'ont pas de solutions analytiques pour ce genre de problème, les auteurs ont appliqué une méthode numérique basée sur l'approche de Kushner

(Kushner et Dupuis, 1992) pour développer une structure de la politique de commande sous-optimale. Dans le même sens, Bai et Elhafsi (1997) ont présenté une structure adaptée de la politique de commande, connu sous le nom de Hedging Corridor Policy (HCP). Gharbi et al. (2006) ont étendu les résultats de Bai et Elhafsi (1997) et ont obtenu une politique de commande sous-optimale améliorée appelée MHCP (Modified Hedging Corridor Policy).

Dans le contexte industriel, les opérations de Setup entraînent généralement des temps et des coûts non-négligeables. Ces derniers peuvent avoir un impact important sur la compétitivité de l'entreprise manufacturière, dont la flexibilité et la performance de son système de production sont limitées par les coûts et les arrêts de Setup sans valeurs ajoutées. En effet, les actions de Setup engendrent des pertes importantes qu'il faut minimiser comme celles du coût d'opération des machines, du temps enregistrées par les ressources humaines et du temps indispensable entre le début d'une opération de setup et le début de la production. D'où le besoin de contrôler et réduire le nombre des actions de Setup. Il s'agit de mettre en place une structure globale et efficace des opérations de setup en considérant toutes les interactions entre les coûts partiels du système tels que le coût de production, d'inventaire, de rupture de stock, etc. Ainsi, le but est d'utiliser une politique de commande optimale de la production et du Setup qui permet d'augmenter la productivité et la disponibilité des ressources ainsi que de minimiser le coût total encouru du système. L'objectif principal de ce chapitre s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par Bai et Elhafsi (1997), Hajji et al. (2004) et Gharbi et al. (2006). Ces derniers ont montré via l'utilisation d'une approche expérimentale intégrant la simulation et des méthodes statistiques d'optimisation, que la politique MHCP est plus économique que la politique HCP. Cependant, seulement cinq configurations où seul le paramètre de coût de pénurie varie ont été considérées, et les valeurs de l'amélioration de la politique de MHCP par rapport à la politique HCP obtenus sont différentes. Cette situation ne donne aucun détail de l'influence des paramètres du système sur les politiques de commande étudiées et nous mène à se demander si le coût total de la politique MHCP ne pourra effectivement jamais dépasser celui de la politique HCP. Dans ce sens, nous estimons que ces expériences ne sont pas suffisantes et qu'il est évident que d'autres analyses comparatives seraient nécessaires pour tirer des conclusions de façon

méthodique. Notre travail consiste à réaliser une étude comparative approfondie entre les deux politiques de commande HCP et MHCP en analysant l'effet d'une large gamme de configurations de coûts et de temps du système, sur les paramètres de commande optimaux qui minimisent le coût total encouru (voir figure 2.1).

Le système manufacturier étudié consiste en une seule machine non-flexible capable de produire deux types de produits finis. Cette machine est soumise à des pannes et des actions de réparations aléatoires qui peuvent générer des ruptures de stock. De plus, des temps et des coûts significatifs de Setup sont engendrés à chaque fois que la production passe d'un type de produit finis à un autre. La figure 2.1 décrit la structure du système manufacturier étudié.

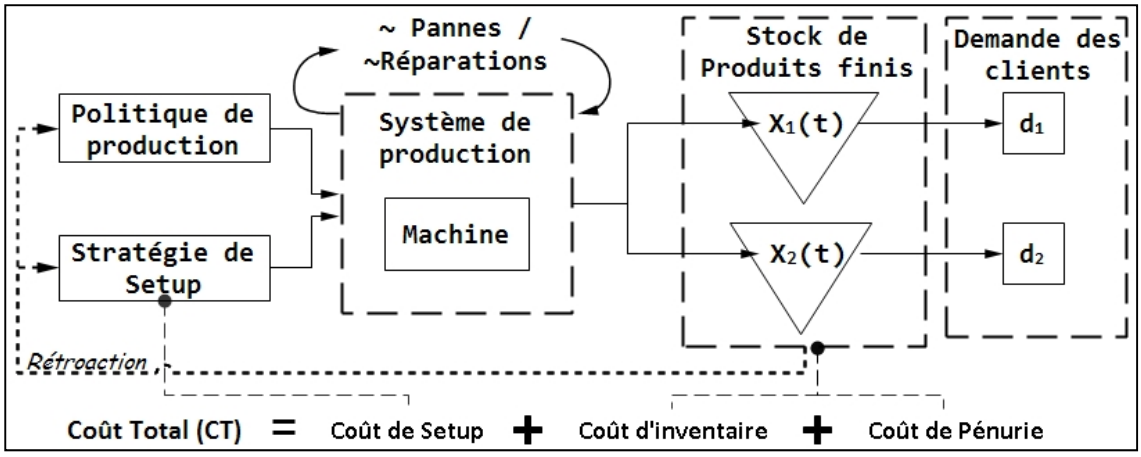


Figure 2.1 Système manufacturier étudié

2.1.1 Notation

Pour tout i ∈ I = {1,2}, la notation suivante sera utilisée dans tout ce chapitre.

$\boldsymbol{P_i}$: Type du produit i, i ∈ I

$\boldsymbol{x_i(t)}$: Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit P_i au temps t

$\boldsymbol{d_i}$: Taux de la demande du produit P_i

$\boldsymbol{u_i}$: Taux de production du produit P_i

$\boldsymbol{U_i^{max}}$: Taux maximal de production du produit P_i

$\boldsymbol{Z_i}$: Niveau du seuil Critique de l'inventaire du produit P_i

$\boldsymbol{T_{ij}^s}$: Temps nécessaire pour passer de la production de P_i à P_j (Setup)

$\boldsymbol{N_{ij}^s}$: Nombre d'opérations de Setup exécutées pour passer de la production de P_i à P_j

$\boldsymbol{c_i^+}$: Coût de mise en inventaire par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_i^-}$: Coût de rupture de stock par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_{ij}^s}$: Coût d'une opération de Setup pour passer de la production de P_i à P_j $i \neq j$

2.1.2 Description des politiques de commande

Deux structures de la politique de commande de la production et du Setup seront alors considérées dans ce travail, elles sont basées sur des travaux de recherche antérieurs concernant un système manufacturier constitué d'une seule machine qui produit deux types de produits finis.

2.1.2.1 Politique du Corridor classique (HCP)

Nous adoptons la structure de la politique de commande proposée par Bai et Elhafsi (1997) connue sous le nom de Hedging Corridor Policy (HCP). Elle concerne le cas d'un système de production composé d'une seule machine produisant deux type de produits finis (P_1 et P_2), et permet après chaque opération de Setup, de construire un stock de sécurité positif afin de réduire le risque des ruptures de stock futures causées par les défaillances de la machine et les arrêts de Setup. Sa structure est caractérisée par un seul seuil $Z_i, i \in \{1,2\}$ pour chaque type de produit fini dont le niveau d'inventaire est exprimé par x_i. La figure 2.2 illustre un exemple montrant la trajectoire des inventaires suivant les instructions de la politique de commande HCP.

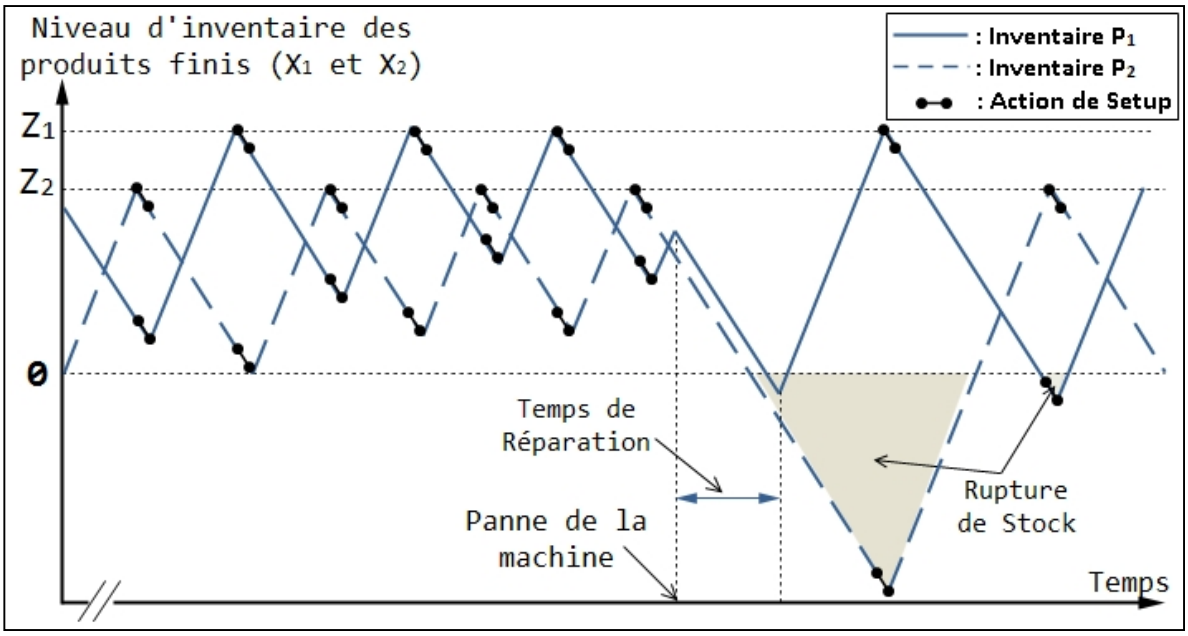


Figure 2.2 Exemple de la trajectoire des inventaires avec la politique HCP

Le couloir (Corridor) de la politique de commande HCP a pour rôle de diriger la trajectoire de l'inventaire des produits finis pour cibler les seuils des stocks positifs équivalents (Z_1 *et* Z_2). Ainsi, la machine fonctionne tout au long de sa période de disponibilité à capacité maximal, de telle façon qu'au moment que l'un des niveaux de stock de produits finis atteint son seuil critique, une opération de Setup est exécutée pour passer à la fabrication de l'autre type de produit (voir figure 2.2). L'organigramme de décision de la politique HCP est décrit dans la figure 2.3, il représente les différents résultats et actions possibles de Setup en fonction des situations rencontrées.

Voici une représentation de la structure de la politique de commande HCP :

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_2 = Z_2) \text{ et } (x_1 < Z_1) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_1 = Z_1) \text{ et } (x_2 < Z_2) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.4)$$

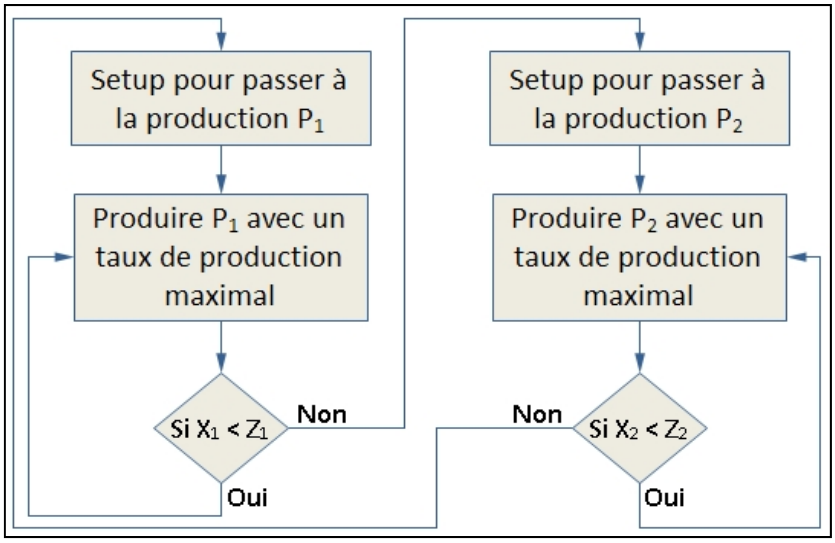


Figure 2.3 Organigramme de décision de la politique HCP

2.1.2.2 Politique du Corridor modifiée (MHCP)

La deuxième politique adoptée considérée dans ce chapitre est inspirée des résultats de Gharbi et al. (2006). En effet, en se basant sur une méthode numérique basée sur l'approche de Kushner (Kushner et Dupuis, 1992) pour un système manufacturier composé d'une seule machine produisant deux type de produits finis (P_1 et P_2), Ils ont obtenu une politique de commande sous-optimale de la production et du Setup qu'ils ont intitulé Modified Hedging Corridor Policy (MHCP), elle se caractérise par deux seuils (Z_i et $a_i, i \in \{1,2\}$ avec $a_i \leq Z_i$) reliés au niveau d'inventaire pour chaque type de produit. L'avantage principal de la politique MHCP est de réduire le nombre d'opérations de Setup exécutées par rapport à celle de HCP durant une même période donnée. Il est intéressant de mentionner que des modifications ont été appliquées à la politique de commande d'origine MHCP proposée par Gharbi et al. (2006), dans le but de réduire le risque de pénurie. En effet, les opérations de Setup sont souvent déclenchées lorsque le niveau d'inventaire d'un produit fini est nul. Cela implique des ruptures de stocks puisque le temps de Setup; qui requière l'arrêt de l'activité

de production, est non-négligeable. Notons que la politique de commande originale prendra maintenant le sigle $MHCP_1$, alors que la politique $MHCP_2$ représentera la politique améliorée. La figure 2.4 présente un exemple de la variation des inventaires suivant les instructions de la politique de commande $MHCP_2$. Parmi les modifications introduites dans ce travail, le cas où le niveau d'inventaire d'un type de produit atteint le seuil critique $Z_i, i \in \{1,2\}$, alors deux éventualités sont à envisager, si l'autre produit risque de tomber en rupture de stock (mais il n'est pas encore en pénurie, i.e. $0 < X_i \leq b_i, i \in \{1,2\}$), alors des actions de Setup sont exécutées ①, sinon le taux de production de la machine est adapté au taux de la demande ②. En conséquence, un nouveaux paramètre ($b_i > 0, i \in \{1,2\}$) a été intégré dans la structure de la politique de commande $MHCP_2$ pour représenter le temps juste nécessaire pour effectuer les opérations de Setup avant de tomber en pénurie. En plus des seuils qui représentent les paramètres de commande de la politique à seuil critique Z_i avec $i \in \{1,2\}$ et les paramètres $b_i, i \in \{1,2\}$, les opérations de Setup dépendent pour chaque type de produits d'un deuxième seuil $a_i, i \in \{1,2\}$ qu'on le nommera le seuil de Setup (ou la borne du corridor). Ce dernier joue le rôle de déclencheur de l'action de Setup lorsque $x_i \geq a_i$, et le niveau d'inventaire de l'autre type de produits $P_j, j \in \{1,2\}$ est inférieur ou égal à b_j ③.

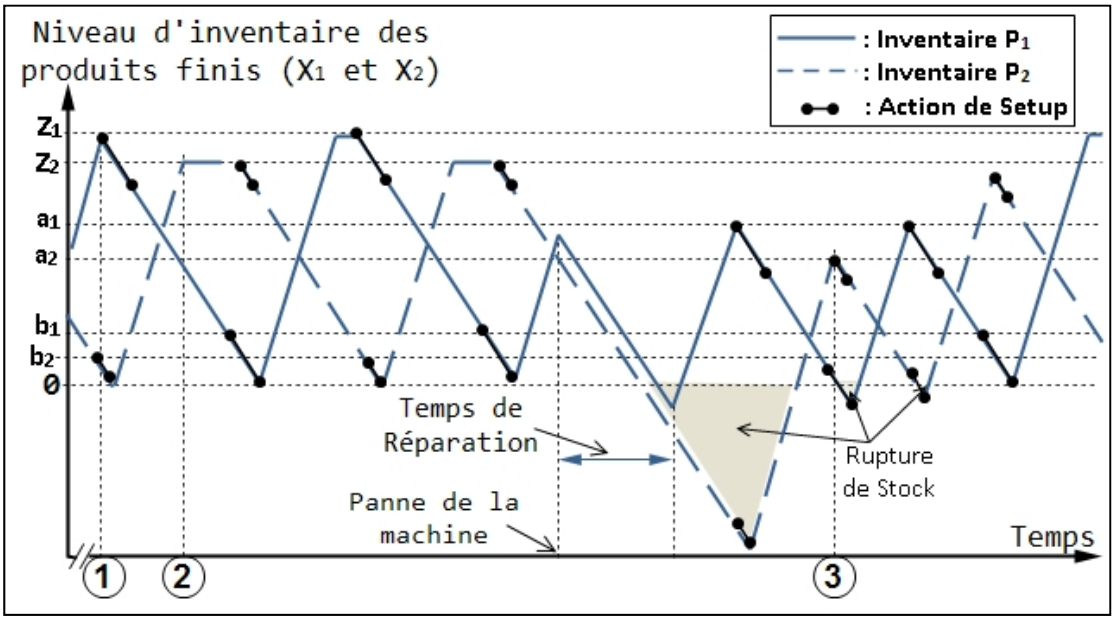


Figure 2.4 Exemple de la trajectoire des inventaires avec la politique $MHCP_2$

L'organigramme de décision de la politique $MHCP_2$ présenté dans la figure 2.5, montre les actions de Setup à entreprendre selon la succession chronologique de plusieurs événements. Les équations suivantes définissent la structure de la politique de commande $MHCP_2$ améliorée. Elle est caractérisée par six (6) paramètres de commande $Z_i, a_i \; et \; b_i$ avec $i \in \{1,2\}$.

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1 \\ d_1 * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 = Z_1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2 \\ d_2 * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 = Z_2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_2 > a_2) \text{ et } (x_1 < b_1) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_1 > a_1) \text{ et } (x_2 < b_2) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.8)$$

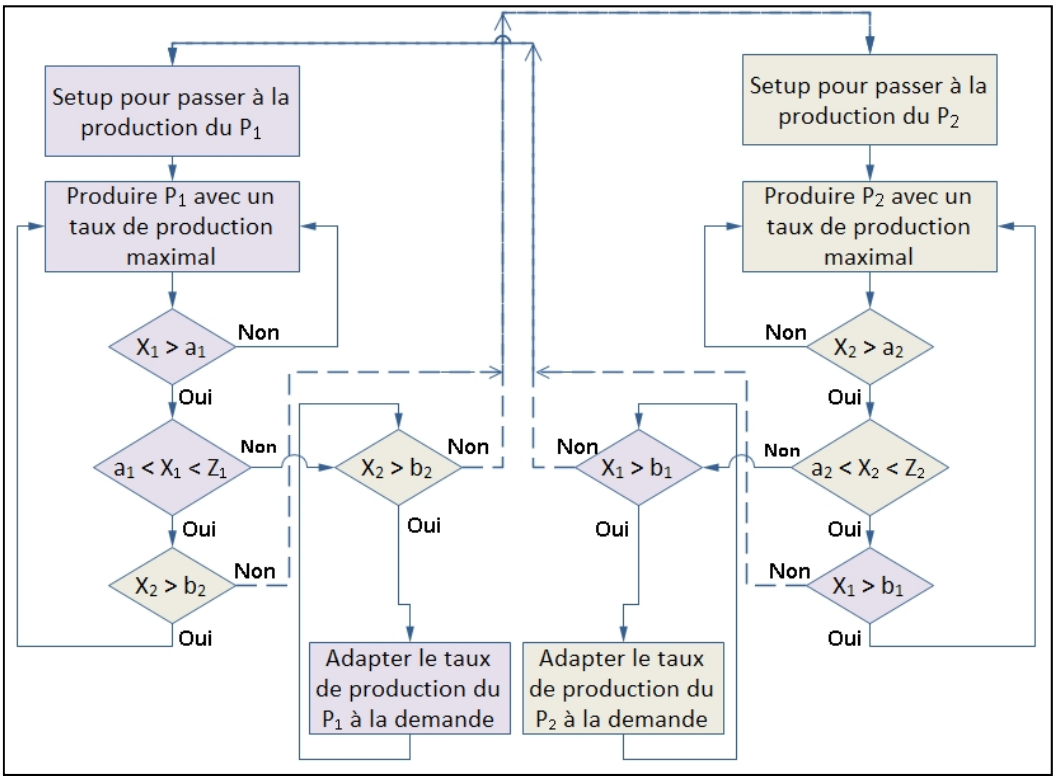


Figure 2.5 Organigramme de décision de la politique $MHCP_2$

Nous finissons cette section par la présentation des hypothèses supportées dans (Gharbi et al., 2006) et qui seront aussi adoptées dans ce travail dans le but de conserver les caractéristiques principales du système manufacturier :

- L'activité de détection de la panne de la machine est pratiquement instantanée et les interventions de réparations sont immédiatement lancées sur la machine;

- En plus des coûts de rupture de stock, les demandes clientèles non satisfaites ne sont pas perdues;

- La demande des clients est supposée constante;

- Le temps des opérations de Setup nécessaire pour passer de la production d'un type de produit finis à un autre est considéré constant.

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une étude comparative plus approfondie dans le but de déterminer l'effet du changement de chaque variable de coût et de temps du système, sur les paramètres des deux politiques de commande HCP et $MHCP_2$ ainsi que sur la différence de coût total de ces dernières. C'est pourquoi ces deux politiques seront d'abord optimisées avant de les comparer l'une par rapport à l'autre. Dans ce sens, une approche intégrant la simulation, les plans d'expérience et la méthodologie de surface de réponse sera utilisée. La section suivante, présente plus en détails les étapes de l'approche expérimentale adoptée.

2.2 Approche de résolution

En vue de comparer les deux politiques de commande de production et de Setup considérées dans ce chapitre. Nous devons, en premier lieu, optimiser les paramètres de commande de chaque politique. Par la suite, nous menons une étude comparative de la différence du coût total optimal des deux politiques de commande pour une large gamme de configurations des paramètres de coût et de temps du système. L'approche adoptée pour résoudre ce problème

est inspirée de celle proposée par Gharbi et al. (2011), elle est basée sur la combinaison de l'outil de la simulation et des méthodes statistiques d'optimisation. Voici les grandes étapes de cette approche :

- Étape 1 : Description des politiques de commande

Dans la section 2.1.2, la structure des politiques de commande de production et de setup est analysée puis traduite en équations mathématiques en vue de l'utiliser par nos modèles de simulation. Les hypothèses adoptées sont également définies à la fin de la section 2.1.2.

- Étape 2 : Modélisation par Simulation

Chaque modèle de simulation utilise une des politiques de commande de la production et de Setup; présentées dans la section 2.1.2, comme une entrée pour conduire plusieurs d'expériences et ainsi évaluer la performance du système manufacturier. Le développement des modèles de simulation s'est effectué via l'utilisation du langage SIMAN (du logiciel ARENA) avec des sous-programmes du langage C++. La section 2.1 présente plus de détails sur les modèles développés.

- Étape 3 : Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse

L'approche des plans d'expérience définit le nombre de réplications des expériences, le domaine expérimental des facteurs d'entrée (variables indépendantes) considérés et la façon dont ces derniers varient les uns par rapport aux autres. L'analyse de la variance sera par la suite employée pour déterminer les principaux facteurs et leurs interactions qui ont un effet significatif sur le coût total (variable dépendante). Ensuite, l'utilisation de la méthodologie de surface de réponse permettra de définir la relation entre la variable dépendante (coût) et les facteurs principaux et leurs interactions significatifs obtenus auparavant. Le modèle résultant est ensuite optimisée afin de déterminer la meilleure combinaison des paramètres de la politique de commande qui minimisent le coût total encouru.

2.2.1 Modèles de simulation

La conception des modèles de simulation dans la partie visuelle de SIMAN s'est réalisée sous forme de plusieurs réseaux en interactions entre eux, et dont chacun remplie une mission spécifique (activités de production, événements de pannes, interventions de réparations, etc.). Ainsi, le modèle de simulation pourra imiter fidèlement le comportement du système de production. Dans ce contexte, deux modèles; adoptant une approche combinée continus / discrets, sont développées via l'utilisation du langage de simulation SIMAN et des sous-programmes écrits en langage C++ (Pegden et al., 1995). Le choix de cette approche combinée de modélisation repose principalement sur la nature impulsive de la dynamique du système manufacturier ainsi que sur sa capacité à raccourcir énormément le temps d'exécution par rapport aux modèles discret (Lavoie et al., 2007).

Le premier modèle reproduit la politique de commande de production et de Setup classique, telle proposée dans la littérature par Bai et Elhafsi (1997). Elle est caractérisée par un seul seuil par produit ($Z_i, i \in \{1,2\}$). Tandis que le second modèle est basé sur les résultats de l'approche numérique utilisée par Gharbi et al. (2006). Il représente la politique de commande de production et de Setup modifiée. Cette politique est caractérisée par trois seuils ($Z_i, a_i \; et \; b_i, i \in \{1,2\}$) pour chaque type de produits finis. Rappelons que des modifications ont été introduites à la version originale de MHCP dans le but de réduire le risque de pénurie. L'architecture globale des modèles est relativement identique sauf lorsque le modèle modifié atteint un seuil de Setup. Cet événement déclenche une série de vérifications des niveaux des inventaires avant d'exécuter une opération de Setup (2.5-2.8). En ce qui concerne la durée de simulation, plusieurs simulations préliminaires ont permis de déterminer le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent. Chacun des modèles de simulation est dirigé par une politique de commande de production et de Setup (section 2.1.2) puis exécutés par le logiciel de simulation ARENA dans le but de reproduire la dynamique du système et d'évaluer sa performance. La figure 2.6 représente le schéma-bloc des modèles de simulation développés. La modélisation de notre système manufacturier consiste en huit grandes parties.

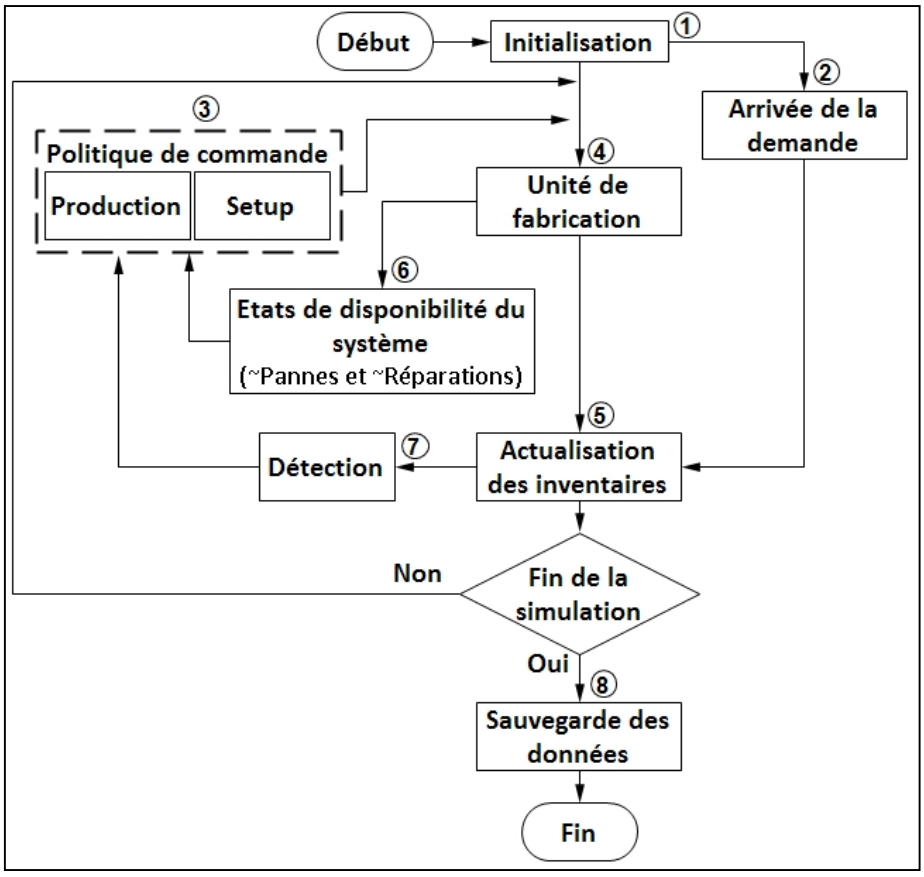


Figure 2.6 Schéma-bloc des modèles de simulation

- Bloc ① : Initialisation

Il permet d'initialiser les variables du modèle (taux de production, taux de demande, la capacité de la machine, etc.) ainsi que les paramètres minimaux et maximaux d'avancement dans temps pour l'intégration des variables cumulatives et les erreurs permises. Nous considérons aussi dans cette étape la durée de simulation et la fin de la période Warm-Up à partir de laquelle les données statistiques sont collectées.

- Bloc ② : Arrivée de la demande

Il affecte directement le niveau d'inventaire des deux types de produits finis à chaque instant. En effet, nous nous servons des contrôles effectués de façon continue afin de déterminer s'il s'agit d'une rupture de stock ou pas. Nous signalons que les taux de la demande clientèle sont utilisés comme une entrée dans les équations différentielles des inventaires.

- Bloc ③ : Politique de commande

Il permet d'appliquer la loi de commande de la politique de contrôle de production et de Setup considérée (section 2.1.2). Ainsi, le choix du type de produit à fabriquer et les taux de production sont déterminées en fonction du niveau des stocks de sécurité des produits finis.

- Bloc ④ : Unité de fabrication

Il représente l'activité de la machine de fabrication en fonction de la structure de la politique de commande adoptée (section 2.1.2). Les produits finis représentent la sortie de ce bloc.

- Bloc ⑤ : Actualisation des inventaires

Il agit sur le niveau des inventaires des produits finis à chaque instant. Effectivement, la variation des inventaires dépend des taux de production de la machine et de la demande clientèle. Lorsqu'un type de produit n'est pas en rupture de stock, sa production augmente son niveau d'inventaire, mais dans le cas contraire, elle se contente de satisfaire sa demande en arriérage en diminuant la rupture de stock.

- Bloc ⑥ : États de disponibilité du système

Il définit les temps de pannes et de réparations de la machine. Les modèles de simulation sont développés de façon à admettre toute les distributions de probabilité possible (~Panne et ~Réparation). A chaque instant, l'état de disponibilité de la machine est utilisé pour déterminer le taux de production exprimé sous forme d'équation d'état dans le langage C++.

- Bloc ⑦ : Détection

Il contrôle de façon continue les inventaires des deux types de produits finis et envoie des signaux à chaque déclenchement d'un franchissement des seuils au bloc ③. Ces derniers correspondent aux paramètres de commande Z_i, a_i et $b_i, i \in \{1,2\}$.

- Bloc ⑧ : Sauvegarde des données

Il se met en marche juste avant la fin de la simulation et permet automatiquement d'enregistrer toutes les informations nécessaires pour calculer la valeur du coût total encouru.

2.2.2 Validation du modèle de simulation

Pour valider le modèle de simulation, une représentation graphique de la variation du niveau des stocks de sécurité des produits finis pour la politique $MHCP_2$ a été générée (figure 2.7). La simulation du système est réalisée pour $Z_1 = Z_2 = 30$ et $a_1 = a_2 = 15$.

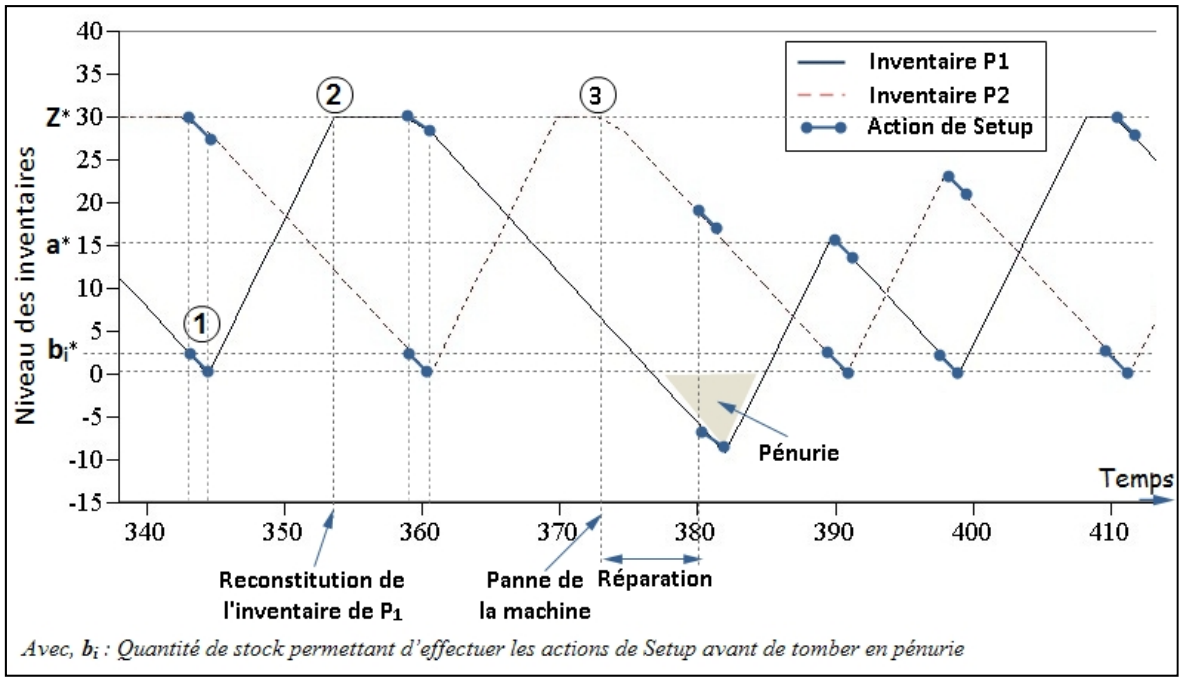


Figure 2.7 Variation des inventaires des deux produits finis ($Z_1 = Z_2 = 30$ et $a_1 = a_2 = 15$)

La figure 2.7 montre que lorsqu'un type de produits finis risque de tomber en rupture de stock (représenté par l'atteinte du paramètre $b_i, i \in \{1,2\}$ dans le sens négatif) et le niveau d'inventaire de l'autre type de produits $X_j, j \neq i$ est supérieur à son seuil de Setup a_j équivalent, alors des actions de Setup sont automatiquement exécutées ①. Dans ce contexte, les mêmes conditions sont vérifiées dès qu'un seuil de Setup $a_i, i \in \{1,2\}$ est atteint. D'autre part, dans le cas où le niveau d'inventaire d'un type de produit atteint le seuil critique Z_i, $i \in \{1,2\}$, le taux de production de la machine est adapté au taux de la demande à condition que pour l'autre produit : $X_j > b_j$ ②. Lors de la panne de la machine ③, une diminution des niveaux des inventaires des deux type de produits finis est observée (Seuls les stocks de sécurité sont utilisés pour satisfaire la demande des clients) jusqu'à la fin des activités de

réparations. Notons qu'en raison de restaurer le niveau d'inventaire du type de produits en fabrication, la machine utilise un taux de production maximal. De tels comportements ont lieu jusqu'à la fin de la simulation, elles démontrent que le modèle de simulation représente adéquatement la politique de commande $MHCP_2$ décrite dans la section 2.1.2.2.

2.2.3 Optimisation

Cette section présente la démarche adoptée pour calculer le coût total optimal avant d'entamer une analyse de comparaison entre les deux politiques de commande HCP et $MHCP_2$. Cette démarche se divise en deux grandes parties. La première permet d'obtenir la relation entre la variable dépendante du système (i.e. Coût total) et ses facteurs ($Z_i, a_i \; et \; b_i \; , i \in \{1,2\}$) ainsi que leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie. Tandis que la deuxième partie calcule les valeurs optimales des paramètres de la politique (facteurs d'entrée) qui minimisent le coût total encouru. Dans ce sens, un exemple numérique est élaboré pour illustrer les stratégies des politiques de commande considérées dans ce travail. En tenant compte du nouveau paramètre $b_i > 0, i \in \{1,2\}$; qui représente le niveau d'inventaire nécessaire pour effectuer les opérations de Setup avant de tomber en pénurie, la politique de commande $MHCP_2$ est caractérisée par six paramètres de commande $Z_i, a_i \; et \; b_i, i \in \{1,2\}$. Toutefois, comme dans le cas de Gharbi et al. (2006), pour fin d'illustration nous supposons que les deux types de produits finis sont identiques. C'est-à-dire que les paramètres du système des deux types de produits sont égaux ($c_1^+=c_2^+=c^+$, $c_1^-=c_2^-=c^-$, $c_{12}^s=c_{21}^s=c_s$, $T_{12}^s=T_{21}^s=T_s$, $N_{12}^s=N_{21}^s=N_s$, $U_1^{max}=U_2^{max}=U_{max}$, $d_1=d_2=d$). En conséquence, la valeur des seuils critiques ainsi que des bornes du Corridor (variables dépendantes); pour le cas de la politique de commande $MHCP_2$, est également équivalente ($Z_1=Z_2=Z$, $a_1=a_2=a$ et $b_1 = b_2$). D'autre part, les paramètres b_1 et b_2 sont utilisés pour représenter la durée juste nécessaire pour passer de la fabrication d'un type de produits à un autre avant de tomber en pénurie, ils dépendent du taux de la demande ($d_i, i \in \{1,2\}$) et de la durée de Setup ($T_{ij}^s, i,j \in \{1,2\}^2, \; i \neq j$) qu'on peut calculer à partir de $b_i = d_i * T_{ij}^s, \; \forall i,j \in \{1,2\}^2$ et $i \neq j$. Par conséquent, la valeur des paramètres b_1 et b_2 est constante puisque le taux de la demande et

les temps des opérations de Setup sont fixes (voir les hypothèses adoptées dans la fin de la section 2.1.2).

Dans le but d'assurer que $a < Z$, une nouvelle variable α est définie de telle sorte que $a = \alpha * Z$ et $0 \leq \alpha \leq 1$. Ainsi, dans cette situation particulière, la politique de commande HCP est définie par un seul paramètre de commande (Z), contre deux (Z et α) pour la politique $MHCP_2$. Le tableau 2.1 résume les données du système.

Tableau 2.1 Paramètres de simulation

Paramètres	c^+	c^-	c_s	T_s	U_{max}	d	MTBF	MTTR
Valeurs	5	200	40	1	5	1,75	EXP (95)	EXP (2,5)

En ce qui concerne la politique de commande HCP classique, le fait d'avoir un seul paramètre (Z) à optimiser nous amène à utiliser l'outil de régression polynomiale. Ainsi, le modèle obtenu, généralement quadratique pour représenter la convexité de la fonction coût, est ensuite optimisé afin de déterminer la valeur optimale du paramètre de commande qui minimise le coût total encouru. Voici l'équation du modèle ajustée trouvée :

$$C_{HCP} = 209{,}34 - 7{,}54929 * Z + 0{,}279633 * Z^2 \quad (2.9)$$

Le minimum est observé au point $Z^* = 13{,}49$, avec un coût total généré de $C^*_{HCP} = 158{,}31$. De l'autre coté, en raison de la convexité de la fonction coût de la politique $MHCP_1$ (Gharbi et al., 2006), nous sélectionnons le plan factoriel complet 3^2 qui conduit à la réalisation de neuf essais expérimentaux. Ce type de plans factoriels complets est souvent utilisé pour des modèles ayants une petite quantité de facteurs, il donne des résultats plus précis vu que chaque interaction est estimée séparément. Cinq réplications ont été effectuées pour chaque combinaison de facteurs, et donc, 45 ($3^2 * 5$) simulations ont été exécutées au total. La durée de simulation adoptée pour les deux modèles de simulation, est égale à $T_\infty = 500.000$ unités de temps, elle est suffisamment longue pour atteindre le régime permanent. Plusieurs

expériences de simulation préliminaires ont été exécutées en vue de choisir les plages du domaine expérimental. Ces dernières sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Niveaux des variables indépendantes

Facteurs	Niveau inférieur	Centre	Niveau supérieur	Descriptions
Z	15	21	27	Niveau des inventaires
α	0,4	0,65	0,9	Borne du Corridor

En utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics, nous avons effectué une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) sur les données de la simulation pour but d'obtenir les effets des variables indépendantes (Z et α) sur les variables de réponse (Coût et satisfaction clientèle). Selon les coefficients de corrélation ajustée (R^2); présentés dans le tableau 2.3, plus de 98 % de la variabilité observée du coût total prévu est expliqué par le modèle de simulation (Montgomery, 2008). D'après le tableau 2.3, tous les principaux facteurs (Z et α), l'interaction (Z. α) et les effets quadratiques (Z^2 et α^2) sont significatifs à un niveau de signification de 95 % (la valeur de la colonne P-value est inférieur à 0,05). Le troisième ordre des interactions et tous les autres effets sont négligés ou ajouté à l'erreur.

Tableau 2.3 Analyse de variance pour le coût total généré par la politique $MHCP_2$

Facteurs	Somme des carrées	dl.*	Moyenne des carrées	F-Ratio	P-Value
A: Z	6603,8	1	6603,8	2000,34	0,0000
B: α	385,208	1	385,208	116,68	0,0000
AA	599,799	1	599,799	181,68	0,0000
AB	141,831	1	141,831	42,96	0,0000
BB	369,988	1	369,988	112,07	0,0000
Blocks	646,569	4	161,642	48,96	0,0000
Total error	115,547	35	3,30133		
Total (corr.)	8862,74	44			
R^2(ajusté au dl.) = 98,361 pourcent ** dl indique le degré de liberté*					

Une analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance a été également effectuée pour vérifier la conformité du modèle. D'après Statgraphics, la fonction de surface de réponse des variables dépendantes du système est donnée par l'équation suivante :

$$C_{MHCP_2} = 254{,}641 - 7{,}71663.Z - 149{,}468.\alpha + 0{,}2151.Z^2 + 1{,}7753.Z.\alpha + 97{,}322.\alpha^2 \quad (2.10)$$

La surface de réponse équivalente à cette fonction est présentée dans la figure 2.8. Le coût total minimum obtenu est égale à $C^*_{MHCP_2} = 148{,}51$. Il correspond aux paramètres de commande optimaux : $Z^* = 15{,}34$ et $\alpha^* = 0{,}63$, donc $a^* = 9{,}66$.

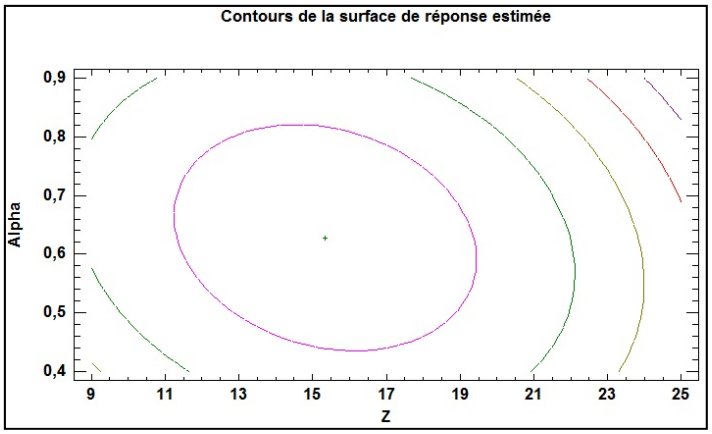


Figure 2.8 Surface de réponse du coût total

Le tableau 2.4 résume les résultats obtenus suite à l'optimisation des paramètres de commande des deux politiques de commande HCP et $MHCP_2$ qui minimisent le coût total encouru. Nous remarquons que pour les paramètres de coût apposés au système (tableau 2.1), la politique de commande $MHCP_2$ est plus avantageuse en termes de coût que la politique classique HCP avec une réduction de 6,60 %. Cette amélioration est due essentiellement à la capacité de la politique $MHCP_2$ à réduire le nombre des actions de Setup (donc le coût de Setup) par rapport à la politique HCP. Il est intéressant de noter que si le niveau optimal du seuil critique Z^*; pour la politique de commande $MHCP_2$, est plus élevé que celui de HCP, cela ne signifie pas que le coût d'inventaire est plus grand pour la politique $MHCP_2$. En fait,

le stock de produits finis pour la politique de commande $MHCP_2$ varient sur une plus grande échelle entre les valeurs 0 et Z^* et tombe un peu plus souvent en pénurie durant les pannes du système que la politique de commande HCP classique. Pour valider les résultats des modèles représentés par les équations (2.9) et (2.10), nous avons considéré les paramètres optimaux ($Z^* = 13{,}49$ pour la politique HCP et $Z^* = 15{,}34$ et $a^* = 9{,}66$ pour la politique $MHCP_2$) comme entrée pour conduire des expériences de simulation et déterminer l'intervalle de confiance. $n = 20$ réplications ont été adoptées. Nous confirmons que la valeur du coût optimal pour chaque politique de commande (tableau 2.4) appartient bien à l'intervalle de confiance à 95 % ($\overline{C.T.} \pm t_{1-(\alpha/2)}^{n-1}\sqrt{S^2/n}$) équivalent (voir la section 1.3.3 du premier chapitre).

Tableau 2.4 Solutions des deux politiques HCP et $MHCP_2$

Modèle	$\boldsymbol{Z^*}$	$\boldsymbol{a^*}$	**Coût**	**Intervalle de confiance (95 %)**
HCP	13,49	-	158,31	[153,91 ; 159,01]
$MHCP_2$	15,34	9,66	148,51	[146,50 ; 150,47]

2.3 Analyse de Sensibilité

Nous procédons dans cette section à une analyse de sensibilité pour démontrer la robustesse de l'approche de résolution expérimentale et l'efficacité des politiques de commande étudiées. Pour cela, différentes combinaisons des paramètres du coût du système sont adoptées. Ces combinaisons de coûts sont dévirées du scénario de base et varient en augmentant et en diminuant leur valeur, un à la fois. Le tableau 2.5 résume la réaction des politiques de commande $MHCP_2$ et HCP face à la variation des paramètres de coût du système. Dans tous les scénarios du tableau 2.5, la politique $MHCP_2$ mène aux meilleurs résultats en termes de coût. En effet, la politique $MHCP_2$ réduit le coût total de 5,67 % jusqu'à 7,52 % par rapport à la politique HCP. Notons également que les paramètres optimaux des deux politiques de commande évoluent de façon logique et cohérente.

Tableau 2.5 Analyse de sensibilité pour différents paramètres du coût

Scénario	c^+	c^-	c_s	Z_i^*		a_i^*	Coût total		DC[1] (%)	Remarque
				HCP	$MHCP_2$	$MHCP_2$	HCP	$MHCP_2$		
Base	**5**	**200**	**40**	**13,49**	**15,34**	**9,66**	**158,31**	**148,51**	**6,60**	**Cas de base**
1	**4,5**	200	40	14,36	16,86	10,40	148,72	139,85	6,34	$a^* \uparrow, Z^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	**5,5**	200	40	12,62	13,92	8,92	167,05	156,51	6,74	$a^* \downarrow, Z^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	5	**180**	40	12,52	14,29	9,17	152,28	142,18	7,10	$a^* \downarrow, Z^* \downarrow, C^* \downarrow$
4	5	**220**	40	14,28	16,65	10,29	163,49	154,27	5,98	$a^* \uparrow, Z^* \uparrow, C^* \uparrow$
5	5	200	**30**	13,49	15,15	9,53	155,56	147,21	5,67	$a^* \downarrow, Z^* \downarrow, C^* \downarrow$
6	5	200	**50**	13,49	15,54	9,74	161,07	149,80	7,52	$a^* \uparrow, Z^* \uparrow, C^* \uparrow$

(1) DC : *différence de coût entre les politiques HCP et* $MHCP_2$*, il est exprimé par* $DC = \left(C^*_{HCP} - C^*_{MHCP_2}\right)/C^*_{MHCP_2}$.

La réaction des paramètres de commande ainsi que celle du coût total encouru est analysée comme suit :

- Variation du coût d'inventaire c^+ (scénarios 1 et 2)

Quand c^+ augmente, le seuil critique (Z^*) pour les deux politiques de commande et la borne du corridor (a^*) diminuent dans le but d'éviter des coûts supplémentaires de l'inventaire. D'où l'augmentation du coût total des politiques de commande. Le contraire arrive lorsque c^+ diminue.

- Variation du coût de pénurie c^- (scénarios 3 et 4)

La variation du coût de pénurie a un effet inverse en comparaison avec le coût d'inventaire. En effet, l'augmentation du coût de pénurie, augmente le seuil critique Z^* et la borne du corridor a^* (pour la politique $MHCP_2$) afin d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock. Ainsi, le coût total des politiques de commande augmente. Le contraire se produit lorsque c^- diminue.

- Variation du coût de Setup c_s (scénarios 5 et 6)

Les résultats du tableau 2.5 montrent que la variation du coût de Setup n'affecte pas le niveau de seuil critique Z^* de la politique HCP. Ce phénomène peut être expliqué par les directives

de cette politique de commande puisque la machine fonctionne toujours à capacité maximal durant la période de sa disponibilité. De telle façon qu'au moment que l'un des niveaux de stock de produits finis $(X_1(t), X_2(t))$ atteint le seuil critique Z, une opération de Setup est exécutée. Ainsi, l'influence du coût de Setup sur l'inventaire et la rupture de stock est non significative. De l'autre coté, nous remarquons que lorsque le coût de Setup (c_s) augmente, le seuil critique Z^* et la borne du corridor a^*; pour la politique de commande $MHCP_2$, diminuent dans le but d'éviter des coûts supplémentaires de Setup. Effectivement, cette dernière n'effectue aucune opération de Setup que si l'un des produits risque de tomber en pénurie, sinon la production est maintenue au taux de la demande. Par conséquent, quand le seuil critique diminue, le nombre d'opérations de Setup diminue également. Le contraire arrive quand c_s diminue.

2.4 Influence des paramètres de coût et de temps sur les politiques de commande

Dans la section précédente, nous avons présenté la réaction des paramètres optimaux de commande et du coût total encouru des deux politiques de commande $MHCP_2$ et HCP face à la variation des paramètres du coût du système. Cette analyse montre qu'en termes de coût, la politique de commande $MHCP_2$ est plus avantageuse que celle HCP avec une nette amélioration allant de 5,67 % jusqu'à 7,52 %. Dans cette section, une étude comparative plus approfondie de l'effet de la variation de chaque paramètre de coût et de temps du système sur la différence de coût des politiques de commande est réalisée. Les résultats obtenus et des explications sont ainsi présentés en fonction de la structure des politiques de commande considérées et de leurs paramètres. Notons que l'utilisation de la différence de coût (DC) entre HCP et $MHCP_2$ a pour but d'analyser l'écart du coût total encouru des deux politiques de commande considérées. Cette différence est exprimée par $DC = \left(C^*_{HCP} - C^*_{MHCP_2}\right)/C^*_{MHCP_2}$.

2.4.1 Influence des paramètres de coût

La figure 2.9 présente; pour le cas de base, la différence du coût total (DC) entre les politiques HCP et $MHCP_2$ lorsque les paramètres du coût de mise en course (figure 2.9 a) et

de pénurie (figure 2.9 b) varie de 0 à 100 et de 160 à 600 respectivement (c-/c+ varie de 32 à 120).

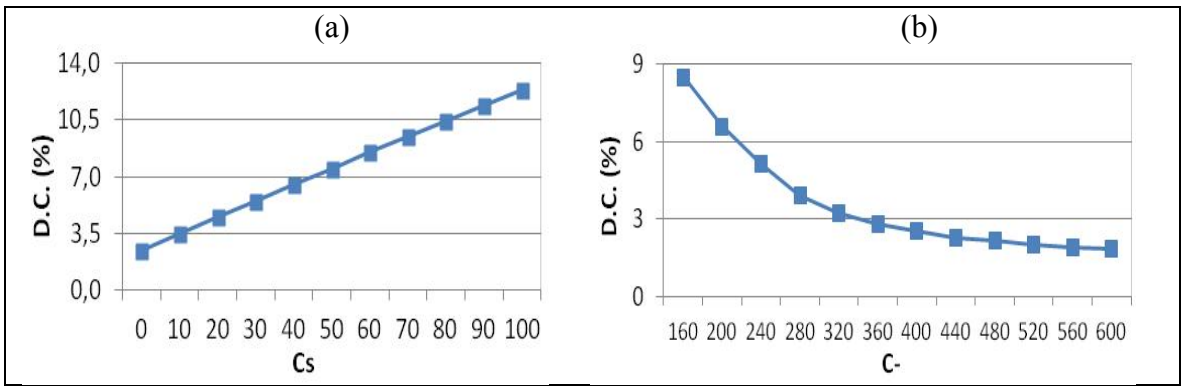


Figure 2.9 Variation de la différence de coût entre les politiques de commande HCP et $MHCP_2$ en fonction des coûts de pénurie et de Setup

Puisque le modèle $MHCP_2$ est conçu dans le but d'éviter les opérations inutiles de Setup (mise en course), la croissance du coût de setup augmente la différence du coût total engendré entre les politiques HCP et $MHCP_2$ en faveur du deuxième (figure 2.9 a). En effet, cette augmentation est due essentiellement au nombre élevé d'opérations de Setup exécutées par le modèle HCP, et cela à chaque fois qu'un niveau d'inventaire ($X_i, i \in \{1,2\}$) atteint son seuil critique (Z_i). Tandis que le modèle $MHCP_2$ n'effectue aucune opération de Setup que si l'un des produits risque de tomber en pénurie, et dans le cas contraire, on maintient la production au taux de la demande.

D'après la figure 2.9 (b), la différence de coût entre les modèles HCP et $MHCP_2$ diminue quand le coût de pénurie (c^-) augmente. Ce phénomène est expliqué par la structure de la politique de commande HCP dont la machine fonctionne tout au long de sa période de disponibilité à capacité maximal, de telle façon que dès que l'un des niveaux de stock de produits finis atteint son seuil critique, une opération de Setup est exécutée pour passer à la fabrication de l'autre type de produit. Par conséquent, la nature aléatoire des pannes permet au modèle $MHCP_2$ de générer plus de pénurie que le modèle HCP, d'où la diminution de DC lorsque c^- augmente. Toutefois le coût total de la politique de commande HCP reste plus

élevé que celle du $MHCP_2$. Afin de confirmer ce résultat, nous avons comparé le coût total des deux politiques pour une très grande valeur de c^-. La valeur DC calculée pour $c^- = 1000$ est égale à $0.93\ \% \geq 0$.

2.4.2 Influence de la durée de maintenance corrective et de la durée de Setup

La variation de la durée d'opération de Setup (T_s) affecte les seuils (Z^* et a^* augmentent suivant la croissance de T_s) et principalement le nombre d'exécution des opérations de Setup (N_s) qui diminue d'une façon considérable en ce qui concerne la politique HCP, d'où le résultat présenté dans la figure 2.10 (a), à savoir, la diminution de la différence du coût entre $MHCP_2$ et HCP lorsque la durée d'opération de Setup (T_s) augmente.

La diminution de la différence de coût entre $MHCP_2$ et HCP (DC) est aussi observée lors de l'augmentation de la durée moyenne de maintenance corrective (MTTCR) (figure 2.10 b). La raison coïncide avec celle donnée dans la section 2.4.1 (variation c^-). En effet, l'occurrence des pannes aléatoires qui sont de plus longue durée (MTTCR augmente), engendre plus d'inventaire (Z^* et a^* augmentent) dans le but de se protéger contre la rupture de stock. Toutefois, puisque la politique de commande $MHCP_2$ n'effectue aucune action de Setup que lorsqu'un type de produits finis risque de tomber en pénurie, cette politique implique plus de rupture de stock par rapport à la politique HCP lors des pannes du système. D'où la diminution de DC.

Dans le but de confirmer la supériorité de la politique de commande $MHCP_2$ en comparaison avec la politique HCP, nous traitons le cas où $c_s = 5$, $c^- = 1000$, $T_s = 4$ et MTTCR = 6 en respectant les conditions de faisabilité du système de production. Ainsi, la valeur de DC obtenue est égale à $0{,}08\ \% \geq 0$.

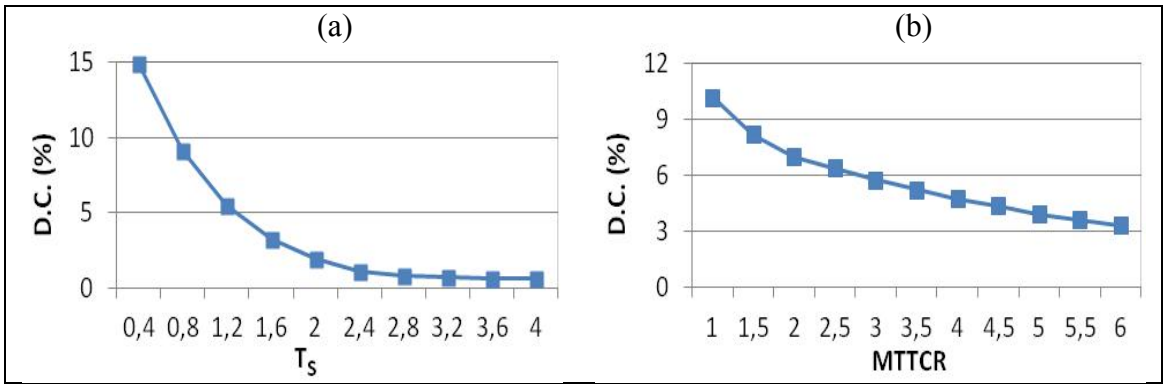


Figure 2.10 Variation de la différence de coût entre les politiques de commande HCP et $MHCP_2$ en fonction des durées d'exécution de CM et de Setup

2.4.3 Influence du taux de production maximal

En tenant compte des conditions de faisabilité du système, la figure 2.11 montre que la différence de coût total relatif aux politiques HCP et $MHCP_2$ (DC) croît quand le taux de production maximal (U_{max}) augmente de façon incrémentielle de $4{,}4\,p/u.t.$ jusqu'à $7\,p/u.t.$. Les autres paramètres du coût et de temps du système restent fixes et leur valeur correspond au cas de base. La variation de U_{max} agit directement sur le coût de Setup mais aussi sur le niveau d'inventaire des produits finis. En fait, l'augmentation de U_{max} est équivalente à accroître la capacité de production du système, d'où la diminution du seuil critique (Z^*) et du coût de pénurie. Par ailleurs, le coût de Setup du modèle HCP augmente d'une manière significative puisque le niveau des inventaires atteint plus rapidement le seuil Z^* (capacité de production plus grande), impliquant ainsi des actions de Setup plus nombreuses.

En résumé, la politique de commande $MHCP_2$ donne de meilleurs résultats en termes de coût que la politique de commande HCP, exploitant ainsi sa capacité à exécuter les opérations de Setup que si le système risque de tomber en pénurie. Cependant, cette faculté engendre souvent plus de rupture de stock et nécessite un espace de stockage plus élevé (le seuil critique optimal Z^* de la politique $MHCP_2$ plus grand que celui de HCP). Ainsi, dans certains cas (lorsque le coût de pénurie (c^-) et les temps de CM (MTTCR) et de Setup (c_s)

augmentent), la différence de coût (DC) entre les politiques de commande $MHCP_2$ et HCP devient plus faible.

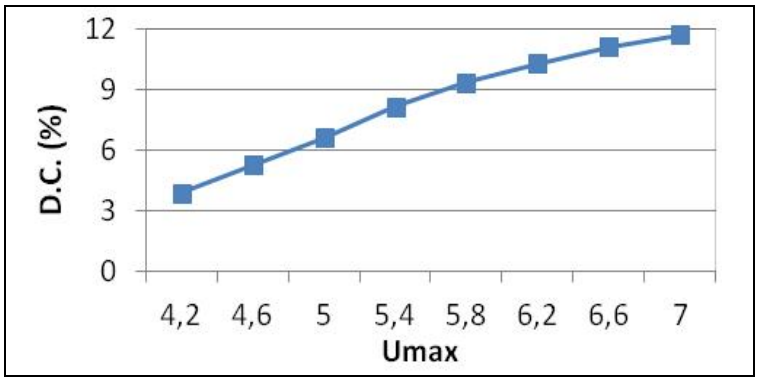


Figure 2.11 Variation de DC entre les politiques HCP et $MHCP_2$ en fonction de U_{max}

Une étude comparative de deux politiques de commande de la production et de Setup est effectuée pour un système manufacturier composé d'une seule machine sujette à des pannes et réparations aléatoires. Cette machine est capable de produire deux types de produits finis avec un délai et coût de Setup (mise en course) non négligeables. Il s'agit des politiques de commande HCP classique (Hedging Corridor Policy) et de la politique $MHCP_2$ (Modified Hedging Corridor Policy) telle que présentée dans Gharbi et al. (2006) mais avec des améliorations dans le but réduire les pénuries. Ce travail est réalisé en adoptant une approche intégrant la simulation combinée événement continus / discrets, à des techniques statistiques d'optimisation comme les plans d'expériences, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Cette approche permet d'optimiser expérimentalement les paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru.

Les premiers résultats confirment la supériorité en termes de coût de la politique modifiée $MHCP_2$ par rapport à la politique de commande HCP. Par la suite, une étude plus approfondie est effectuée pour but d'étudier l'effet des paramètres du coût et du temps du système sur les paramètres de commande et le coût total encouru. La conclusion obtenue est que la politique de commande $MHCP_2$ reste plus avantageuse par rapport à la politique HCP

pour toutes les configurations des paramètres de coût et de temps apposées au système, mais leur différence de coût diminue dans certaines situations comme l'augmentation du coût de pénurie, du temps de Setup et du temps moyen des actions de la maintenance corrective.

Partant des conséquences néfastes que génère l'occurrence des pannes sur le fonctionnement normal des unités de production, les chapitres suivants étendent les modèles traités dans ce chapitre en introduisant la notion de la maintenance préventive dans les politiques de commande HCP et $MHCP_2$ présentées dans la section 2.1.2.

CHAPITRE 3

POLITIQUES DE COMMANDE COMBINÉE DE PRODUCTION, DE SETUP ET DE MAINTENANCE DANS UN CONTEXTE MANUFACTURIER IMPARFAIT

Dans une entreprise manufacturière, la fonction de maintenance constitue une priorité et se situe au centre des préoccupations des industriels vu son rôle crucial dans la prévention des défaillances et le maintien en service de l'outil de production. Une grande partie des politiques de commandes développées jusqu'ici suppose que les distributions de pannes et de réparations affectant le système manufacturier, sont décrites par un processus de Markov homogène. Or, dans le contexte industriel, la probabilité de défaillance d'une machine dépend de nombreux facteurs comme par exemple l'usure, la fatigue, les fissures, la corrosion, les réparations et les actions de maintenance préventive qui diminuent la probabilité d'occurrence des pannes. Ces dernières ont un effet nuisible sur le processus de production des biens et des services et sur l'âge des machines (Boukas et Haurie, 1990). Effectivement, la fréquence d'occurrence des pannes augmente souvent avec le temps puisque les actions de la maintenance ne sont pas parfaites. Selon Wang (2002), les interventions de maintenance peuvent être divisées en deux grandes classes : la maintenance corrective (CM) qui survient lorsque le système tombe en panne et la maintenance préventive (PM) qui se produit lorsque le système est en fonctionnement.

Les premiers modèles traitants les stratégies de maintenance sont développés indépendamment de la production. Barlow et Hunter (1960) ont présenté deux stratégies de la maintenance préventive. La première intitulée la politique de maintenance préventive de type âge (Age replacement preventive maintenance policy : ARP), elle repose sur le remplacement des unités au moment de la panne ou après une durée constante de fonctionnement. La deuxième stratégie est la politique de maintenance préventive de type bloc (Bloc replacement preventive maintenance policy : BRP), elle consiste à remplacer les unités lors de la panne ou suite à des intervalles fixes de temps, indépendamment de l'âge des unités. De point de vue économique, Barlow et Proschan (1965) ont montré que la stratégie de type âge (ARP) est supérieure à celle de type bloc (BRP). Par contre, cette dernière est plus utilisée dans

l'industrie. Elle est plus pratique à mettre en œuvre et à gérer dans un contexte industriel que celle de type âge (ARP), puisqu'elle ne nécessite pas un suivi de l'âge des unités. De plus, la stratégie de type bloc (BRP) est plus gaspilleuse vu la possibilité de remplacer des composantes presque neuves quand les actions de PM surviennent juste après la fin des actions de réparation. Plusieurs approches ont été proposées afin de diminuer ce gaspillage. Barlow et Hunter (1960) proposent d'exécuter des réparations minimales lors de la panne pour ramener l'unité à son état fonctionnel jusqu'à la date prochaine de son remplacement préventif. D'autres modèles suggèrent de se servir des unités usagées au moment des remplacements correctifs au cas où l'unité tombe en panne juste avant l'intervention préventive (Bhat, 1969) et (Murthy et Nguyen, 1982). Des nouvelles unités moins fiables sont aussi considérées pour le remplacement correctif (Tango, 1979). Berg et Epstein (1976) ont proposé une politique modifiée de la stratégie de maintenance de type bloc (MBRP), elle consiste à exécuter les actions de maintenance préventive à un intervalle constant si le temps écoulé depuis le dernier remplacement dépasse un seuil fixe. Dans le cas contraire, le remplacement préventif est annulé en gardant l'ancienne unité en fonctionnement. Archibald et Dekker (1996) apportent des améliorations à la politique MBRP en utilisant différentes lois statistiques autre que les distributions exponentielles et gammas. Les auteurs ont démontré que la politique MRBP se rapproche de la politique ARP en termes de coût de maintenance tout en gardant une simplicité quand à l'opération de son administration.

Pour la plupart de ces travaux, les durées des interventions de la maintenance (PM et CM) sont présumées négligeables. Cependant, cette hypothèse n'est pas réaliste puisque dans le cas manufacturier, les arrêts des unités de production dû à la maintenance, diminuent la disponibilité du système et peuvent engendrer des situations de pénurie (Berthaut et al., 2011). D'où l'intérêt à combiner les avantages des stratégies de maintenance, avec des politique de commande de la production. Cette combinaison permet d'optimiser simultanément les paramètres liés aux politiques de commande de production et de maintenance préventive, et d'étudier la variation des niveaux d'inventaire de pièces produites en fonction des interventions de la maintenance (Boulet, 2007). Dans ce contexte, Gharbi et al. (2007) ont combiné la politique de commande de type seuil critique avec la stratégie de

maintenance préventive de type âge (ARP). Le système manufacturier étudié se compose d'une seule machine produisant un seul type de produits finis et dont le temps et le coût des interventions de maintenance sont non-négligeables. Boulet et al. (2007) ont étendu la politique de Gharbi et al. (2007) en utilisant une stratégie de type MBRP. En se basant sur le coût total encouru, Berthaut et al. (2011) ont comparé l'effet des paramètres de coût et de temps du système sur les stratégies de maintenance MBRP, ARP et BRP lorsqu'elles sont combinées avec la politique à seuil critique classique (HPP). Pour le même système manufacturier composé d'une seule machine produisant un seul type de produit, les auteurs Berthaut et al. (2010) ont développé une politique de commande sous-optimale de production et de maintenance dans le cas de la maintenance préventive systématique de type bloc. Une étude de comparaison est également réaliser entre la politique de commande obtenue et la politique HPP lorsqu'elle est combinée avec la stratégie de maintenance BRP.

Dans la littérature, aucun travail n'a traité la combinaison des politiques de commande de production et de Setup avec des stratégies de maintenance préventives. Notons que la durée des interventions de maintenance (CM et PM) est non-négligeable. L'objectif principal de ce travail consiste à proposer une structure de loi de commande sous-optimale intégrant simultanément la production, le Setup et la maintenance préventive pour cette classe de systèmes manufacturiers. En raison de la complexité du problème, quatre politiques de commande ont été proposées en se basant sur la littérature scientifique notamment les résultats de Bai et Elhafsi (1997), Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2010). Ces politiques combinent la planification de la production et du Setup; telles que présentées dans le deuxième chapitre, avec deux stratégies de maintenance préventive systématique de type bloc. Ces dernières consistent à effectuer des remplacements préventifs à des intervalles de temps prédéterminé. En plus d'assurer la continuité des activités de la production lors des actions de maintenance corrective et préventive via le recours aux stocks tampons, cette combinaison permet d'associer dans un même modèle les paramètres de la production et de Setup à ceux de la maintenance préventive dans le but d'augmenter la disponibilité du système de production et d'améliorer sa productivité. De plus, l'introduction de PM permet

également de réduire les effets nuisibles des pannes qui durent généralement plus longtemps, et sont largement couteux en comparaison à des arrêts prévus de la production.

Deux stratégies de maintenance préventives systématiques feront l'objet de ce travail. La première concerne la politique de PM de type bloc classique dont les interventions de remplacements préventifs sont exécutées à des intervalles prédéterminés indépendamment de l'âge de l'équipement. Ces interventions sont destinées principalement à réduire la probabilité de défaillance et améliorer la performance globale du système de production. En général, lorsque ce type de politiques de commande de maintenance combiné à la politique à seuil critique HPP pour un système M_1P_1, deux paramètres T_{PM} (période entre chaque action de PM) et Z_{inv} (seuil critique) sont analysés en vue d'optimiser leur valeur. Il consiste à trouver la meilleure valeur du niveau du stock tampon ${Z_{inv}}^*$ et du temps ${T_{PM}}^*$ pour exécuter périodiquement (${kT_{PM}}^*$, $k = 1,2, \ldots$) les interventions de PM qui minimisent le coût total généré. La deuxième stratégie de PM est basée sur la politique de commande de PM de type bloc obtenue par Berthaut et al. (2010) via une approche numérique. Cette politique exécute les actions de PM de remplacement seulement si le niveau des stocks tampons est suffisant, dans le but de réduire le risque de pénurie quand une intervention préventive suit immédiatement une action corrective. La combinaison de cette politique avec la politique à seuil critique (HPP) pour un système composé d'une seule machine capable de produire un seul type de produits, permet généralement d'introduire; par rapport à ceux déjà définis dans le paragraphe précédent (T_{PM} et Z_{inv}), un nouveau paramètre Z_{PM} qui représente le seuil à partir duquel nous déciderons d'effectuer ou non les interventions de PM. Ainsi, dans le cas d'une machine en état fonctionnel, un remplacement préventif est accompli seulement si le niveau d'inventaire du produit fini $x(.)$ est supérieur au seuil Z_{PM} ($x(.) \geq Z_{PM}$). Cette condition est liée de façon indirecte au comportement du système qui en plus de se protéger contre la rupture de stock, favorise la restauration du stock tampon et évite le gaspillage des composants relativement nouveaux lorsque les interventions préventives suivent immédiatement les actions correctives. Il est pertinent de mentionner que pour le cas d'un seul type de produits finis, la condition $Z_{PM} \leq Z_{inv}$ est toujours vérifiée.

3.1 Formulation et état du problème de commande

Dans cette section, le problème de production, de Setup et de maintenance est formulé mathématiquement en se basant sur la structure des politiques de maintenance proposées dans la littérature. Les hypothèses et les approximations supportées sont décrites à la fin de cette section. Afin d'illustrer le concept intégrant les stratégies de maintenance systématiques de type bloc considérées dans les politiques de commande de production et de Setup, nous traitons un système manufacturier composé d'une seule machine non flexible produisant deux types de produits finis dont chacun doit être conservé dans un espace de stockage avant d'être livré aux clients. Cette machine est sujette à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent engendrées des ruptures de stock et sont définies par des distributions non-exponentielles. Des interventions de la maintenance préventive sont aussi programmées pour augmenter la disponibilité de système de production. De plus, le coût et le temps nécessaire pour passer de la production d'un type de produits finis à un autre sont considérés non-négligeables. La structure globale du système manufacturier est illustrée dans la figure 3.1, elle associe comme prévu, une stratégie de maintenance préventive à la politique de commande de production et de Setup telle présentée dans le deuxième chapitre.

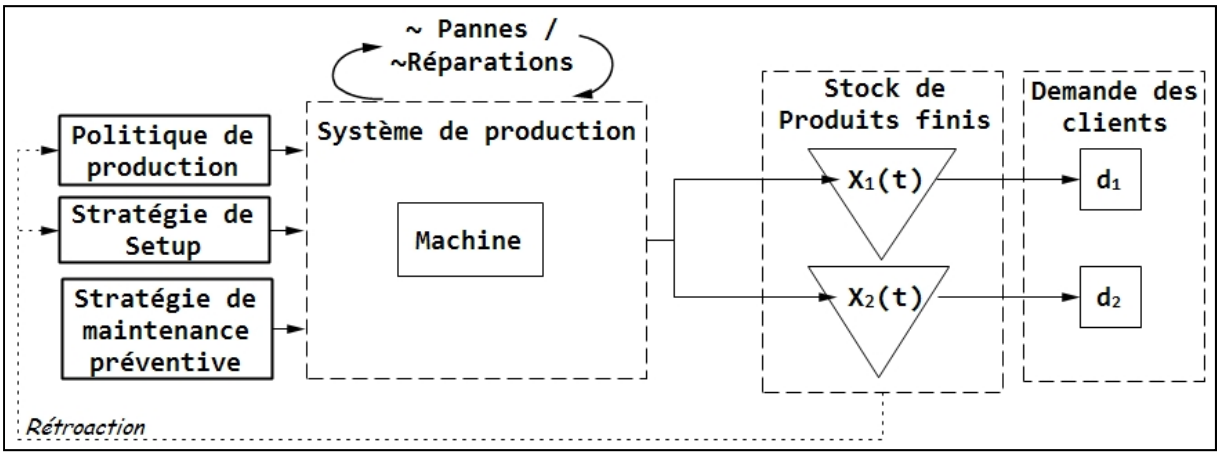


Figure 3.1 Système manufacturier étudié

3.1.1 Notation

La notation suivante sera utilisée dans tout ce chapitre. $\forall$ i $\in$ I $= \{1,2\}$,

$\boldsymbol{P_i}$: Type du produit i

$\boldsymbol{x_i(t)}$: Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit P_i au temps t

$\boldsymbol{d_i}$: Taux de la demande du produit P_i

$\boldsymbol{u_i}$: Taux de production du produit P_i

$\boldsymbol{U_i^{max}}$: Taux maximal de production du produit P_i

$\boldsymbol{Z_i^{inv}}$: Niveau du seuil critique de l'inventaire du produit P_i

$\boldsymbol{Z_{PM}}$: Niveau du seuil de maintenance préventive

$\boldsymbol{a_i}$: Niveau de seuil de Setup (ou borne du corridor) du produit P_i

$\boldsymbol{T_{PM}}$: période entre chaque intervention de maintenance préventive

$\boldsymbol{T_{ij}^s}$: Temps nécessaire pour passer de la production de P_i à P_j (Setup)

$\boldsymbol{N_{ij}^s}$: Nombre d'opérations de Setup exécutées pour passer de la production de P_i à P_j

$\boldsymbol{c_i^+}$: Coût de mise en inventaire par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_i^-}$: Coût de rupture de stock par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_{ij}^s}$: Coût d'une opération de Setup pour passer de la production de P_i à $P_j, i \neq j$

$\boldsymbol{c_{pm}}$: Coût d'une opération de maintenance préventive (PM)

$\boldsymbol{c_{cm}}$: Coût d'une opération de maintenance corrective (CM)

3.1.2 Formulation du problème

L'état du système est modélisé par deux composantes. D'une part, le niveau d'inventaire cumulatif des deux produits $X = (x_1, x_2) \in R^2$ qui correspond à une variable continue dans le temps et d'autre part, l'état discret de la machine $\zeta(t)$. La dynamique du système de production qui se compose d'une seule machine, prendra la valeur 1 si la machine M est opérationnelle, 2 si elle est en état de panne et 3 si elle est soumise à des actions de maintenance préventives. Ainsi, le comportement stochastique et dynamique du système est décrit par les variables d'état $(X(t), \zeta(t))$ avec $X(t) = (x_1, x_2) \in R^2$ et $\zeta(t) \in M = \{0,1, \dots, 3\}$.

$$\zeta(t) = \begin{cases} 1 : \text{si la machine est opérationnelle} \\ 2 : \text{si la machine est en panne (CM)} \\ 3 : \text{si la machine est en maintenance préventive (PM)} \end{cases}$$

L'équation différentielle suivante représente la dynamique des stocks des produits finis $\dot{X}(t) = \left(\dot{x_1}(t), \dot{x_2}(t)\right) \in R^2$. Elle est exprimée en fonction du taux de production de la machine $u_i(.), i \in \{1,2\}$ et de la demande clientèle $d_i, i \in \{1,2\}$.

$$\begin{cases} \dot{x_1}(t) = u_1(t,\zeta) - d_1\,, & x_1(0) = x_1 \\ \dot{x_2}(t) = u_2(t,\zeta) - d_2\,, & x_2(0) = x_2 \end{cases} \tag{3.1}$$

Où x_1 et x_2 désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire des produits finis P_1 et P_2. La contrainte de capacité des machines de fabrication suivante doit être satisfaite à chaque instant :

$$0 \leq u_i \leq U_i^{max} * \text{Ind}\{\zeta(t) = 1\}, \qquad \forall i \in \{1,2\} \tag{3.2}$$

Avec,

$$\text{Ind}\{\zeta(t) = \delta\} = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = \delta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

En ce qui concerne la modélisation des opérations de Setup, deux paramètres sont utilisés à savoir : l'instant τ pendant lequel le système débute l'action de Setup et le paramètre ij qui marque la transition de la production du produit fini i vers le produit j. Par conséquent, les variables de décision de la politique de commande; qui combine la planification de la production, du Setup et de la maintenance, sont les taux de production de la machine $u_i(.), i \in \{1,2\}$, la séquence des opérations de Setup φ définie par $\varphi = \{(\tau_0, i_0 i_1), (\tau_1, i_1 i_2), \ldots\}$ et la période entre chaque intervention de maintenance préventive T_{PM}.

Soit $\Gamma(.)$ l'ensemble des décisions admissibles. L'objectif du problème de commande optimale stochastique est d'optimiser les paramètres de commande du système qui minimisent la fonction du coût moyen total actualisé $J(.)$ sur un horizon infini.

$$J(X,\zeta,u_1,u_2,\varphi,T^{pm}) = E\left[\int_0^{\infty} e^{-\rho t} g(.)dt + \sum_{j=0}^{\infty} e^{-\rho \tau_j} C^s_{i_j i_{j+1}}\right] \quad (3.3)$$

Avec, ρ est le taux d'escompte, $g(.)$ est la fonction du coût instantané d'inventaire, de pénurie et de maintenance, elle est définie comme suit :

$$g(X,\zeta) = c_i^+ x_i^+(t) + c_i^- x_i^-(t) + c_{cm} E^+_{cm}(t) + c_{pm} E^+_{pm}(t) \quad (3.4)$$

Où,

$$\begin{cases} x_i^+ = \max(0, x_i) & \text{si } x_i \geq 0 \\ x_i^- = \max(-x_i, 0) & \text{si } x_i < 0 \end{cases}$$

Et,

$$E^+_{cm}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = 2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \qquad E^+_{pm}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = 3 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$v(X,\zeta,t^s) = \inf_{(T^{pm},U,\varphi)\in\Gamma(\alpha)} J(X,\zeta,u_1,u_2,\varphi,T_{PM}) \ ; \ \forall X \in R^2, \zeta \in \{1,2,3\} \quad (3.5)$$

Pour en savoir plus de détails sur la formulation analytique du problème d'optimisation, nous référons nos lecteurs à consulter les articles de Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2010). La détermination des propriétés de la fonction (3.5) nous conduit à des conditions d'optimalité décrites par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB). Cependant, la résolution analytique de ces équations n'est possible que dans certains cas spécifiques, où de simples systèmes de production sont analysés à l'aide des chaînes de Markov (Kenné et Gharbi, 1999). Signalons que d'autres approches ont été proposées dans la littérature comme l'approche numérique de Boukas et Haurie (1990) qui se sont basés sur la méthode de Kushner (Kushner et Dupuis, 2001), pour résoudre les équations de HJB dans le cas où les états du système sont décrits par des processus Markoviens non-homogènes. Toutefois, cette

approche est limitée à des systèmes de petite taille avec un nombre limité de produits, de machines et d'états, et ne peut pas être appliquée sur les problèmes complexes de commande stochastique. En raison de la complexité de notre système de production, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique notamment les résultats de Bai et Elhafsi (1997) Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2010) dans le but de proposer une structure de loi de commande intégrant simultanément la production, le Setup et la maintenance préventive sans passer par la modélisation analytique et numérique. Rappelons que (Bai et Elhafsi, 1997) et (Gharbi et al., 2006) nous ont été très utiles pour déterminer la structure de deux politiques de commande sous-optimales de production et de Setup pour notre système manufacturiers (voir le deuxième chapitre). Dans le même sens, nous adoptons dans ce travail les caractéristiques d'une politique de commande sous-optimale obtenue par Berthaut et al. (2010). Elle combine la politique de commande à seuil critique (HPP) et une stratégie de maintenance préventive de type bloc avec des sauts, dont les interventions sont exécutées seulement si le niveau du stock de sécurité est supérieur à un seuil donné. La stratégie de maintenance préventive de type bloc classique est également traité dans ce chapitre. Je note que les politiques de production et de setup et les stratégies de PM adoptées ne sont pas couplées.

Les équations suivantes définissent la structure des deux politiques de commande de production et de Setup ainsi que les deux stratégies de maintenance préventive de type bloc (classique et avec sauts).

- Politique de commande de production et de Setup classique (HCP)

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \mathrm{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1^{inv} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \tag{3.6}$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \mathrm{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2^{inv} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \tag{3.7}$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } \left(x_2 = Z_2^{inv}\right) \text{ et } \left(x_1 < Z_1^{inv}\right) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \tag{3.8}$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } \left(x_1 = Z_1^{inv}\right) \text{ et } \left(x_2 < Z_2^{inv}\right) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.9)$$

- Politique de commande de production et de Setup modifiée (MHCP)

Soit $b_i > 0$, $\forall i \in \{1,2\}$ le niveau d'inventaire nécessaire pour effectuer les opérations de Setup avant de tomber en pénurie.

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1^{inv} \\ d_1 * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 = Z_1^{inv} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2^{inv} \\ d_2 * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 = Z_2^{inv} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_2 > a_2) \text{ et } (x_1 < b_1) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_1 > a_1) \text{ et } (x_2 < b_2) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.13)$$

- Stratégie de maintenance préventive de type bloc classique

Les interventions de maintenance préventive sont programmées et exécutées périodiquement à des intervalles de temps prédéterminé $kT_{PM}, k = 1,2, \ldots$.

- Stratégie de maintenance préventive de type bloc avec sauts selon le niveau d'inventaire des produits finis

Les interventions de maintenance préventive sont programmées périodiquement à des intervalles de temps prédéterminé, mais elles sont exécutées seulement si le niveau des inventaires est jugé suffisant. Partant du fait que l'arrêt de l'activité de production diminue le niveau des inventaires des produits finis pour satisfaire la demande clientèle, la stratégie de PM de type de bloc avec sauts; dans le but de réduire le risque de pénurie, doit prendre en considération la quantité des deux stocks de sécurité à la fois avant de permettre l'exécution des interventions de PM. Ainsi, en s'inspirant du travail de Berthaut et al. (2010) qui par contre, traite le cas d'un seul type de produits finis, nous proposons d'utiliser la somme des

inventaires instantanés des deux types de produits finis ($x_1(t) + x_2(t)$) pour contrôler les interventions préventives. Cette proposition est basée également sur le fait que lorsque la machine est entrain de restaurer le stock tampon d'un des produits finis, le niveau d'inventaire de l'autre produit diminue en satisfaisant sa demande des clients. En résumé, les interventions de PM sont exécutées si les conditions suivantes sont vérifiées :

$$\begin{cases} x_1(t) + x_2(t) \geq Z_{PM} \\ \zeta(\mathrm{t}) = 1 \ (\mathrm{i.e.\ la\ machine\ est\ opérationnelle}) \end{cases} \tag{3.14}$$

Le tableau 3.1 présente l'abréviation des quatre politiques de commande combinées considérées dans ce chapitre.

Tableau 3.1 Abréviation des politiques de commande combinées

	Stratégie de PM de type bloc classique	**Stratégie de PM de type bloc avec sauts**
Politique de commande de production et de Setup classique (HCP)	HCP_B	HCP_BJ
Politique de commande de production et de Setup modifiée (MHCP)	MHCP_B	MHCP_BJ

Dans la fin de cette section nous présentons les hypothèses adoptées dans ce travail :

- Toutes les interventions de maintenance correspondent à des actions de remplacements qui restaurent le composant à un état comme neuf;

- Les actions de maintenance et de Setup sont exécutées séparément dans le temps;

- L'activité de détection de la panne de la machine est pratiquement instantanée et les interventions de réparations sont immédiatement lancées sur la machine;

- La demande des clients et les temps de Setup sont considérés constants.

L'objectif principal de ce travail vise à proposer une structure de loi de commande sous-optimale intégrant la production, le Setup et la maintenance préventive. Quatre politiques de commande sont considérées (voir tableau 3.1). Ces politiques seront d'abord optimisées avant de comparer l'effet du changement des variables du système sur les paramètres de commande et le coût total optimaux. Dans ce sens, une approche expérimentale (Gharbi et al., 2011) intégrant la simulation, les plans d'expérience et la méthodologie de surface de réponse a été utilisée. La section suivante, présente plus en détails les étapes de l'approche adoptée.

3.2 Approche de résolution

Cette section représente les étapes principales de l'approche de résolution que nous avons utilisée afin de déterminer expérimentalement la valeur des paramètres de commande optimaux qui minimisent le coût total encouru pour chaque politique. Les trois étapes sont :

- Étape 1 : Structure des politiques de commande
  - Définir la structure des politiques de commande et ses paramètres à optimiser;
  - Formuler analytiquement la dynamique du système manufacturier étudié et l'expression du coût total prévu;
  - Présenter les hypothèses adoptées.

- Étape 2 : Modélisation par Simulation
  - La modélisation du système est réalisée à l'aide de modèles de simulation combinés discrets/continus, ainsi que de l'utilisation du langage SIMAN avec des sous-programmes du langage C++;
  - Chaque politique de commande est utilisée comme une entrée pour conduire plusieurs d'expériences et ainsi évaluer la performance du système.

- Étape 3 : Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse
  - Déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet signification sur le coût;

- Déterminer la relation entre le coût total et les effets significatifs;
- Optimiser les paramètres de chaque politique de commande qui minimisent le coût total encouru.

3.2.1 Modèle de Simulation

Quatre modèles de simulation combinés par événements discrets-continus sont développés en utilisant le langage de simulation SIMAN avec des sous-programmes écrits en langage C++ (Pegden et al., 1995). La partie continue est dédiée essentiellement au calcul du niveau instantané des inventaires de produits finis, tandis que la partie discrète modélise les politiques de commande de la production, du Setup, de la maintenance préventive, de l'occurrence des pannes et les actions de réparations. Rappelons que le choix de cette approche repose principalement sur la continuité des flux de production, la nature impulsive de la dynamique du système manufacturier et sur sa capacité à raccourcir énormément le temps d'exécution par rapport aux modèles purement discrets (Lavoie et al., 2007). Étant commandés par les politiques de commande définies dans la section 3.1.2, les programmes résultants sont ensuite exécutés par le logiciel de simulation ARENA afin d'évaluer la performance du système manufacturier. L'avantage de ces modèles de simulation se résume dans leur capacité à limiter les hypothèses simplificatrices nécessaire à la résolution analytique et à imiter fidèlement le comportement du système de production sous les conditions réelles d'opération. Le diagramme du modèle de simulation est présenté dans la figure 3.2.

La structure des modèles de simulation consiste en plusieurs réseaux en interactions entre eux, et dont chacun remplie une mission spécifique telle que la gestion des activités de production, des événements de pannes et de réparations, d'arrivée de la demande, etc. Le principe de modélisation illustré par le diagramme de la figure 3.2, est similaire à celui déjà présenté dans le deuxième chapitre, sauf la partie concernant l'introduction de la maintenance préventive dont la modélisation des stratégies de PM systématiques de type bloc est exclusivement utilisée dans ce travail. La modélisation de notre système manufacturier consiste en neuf grandes parties :

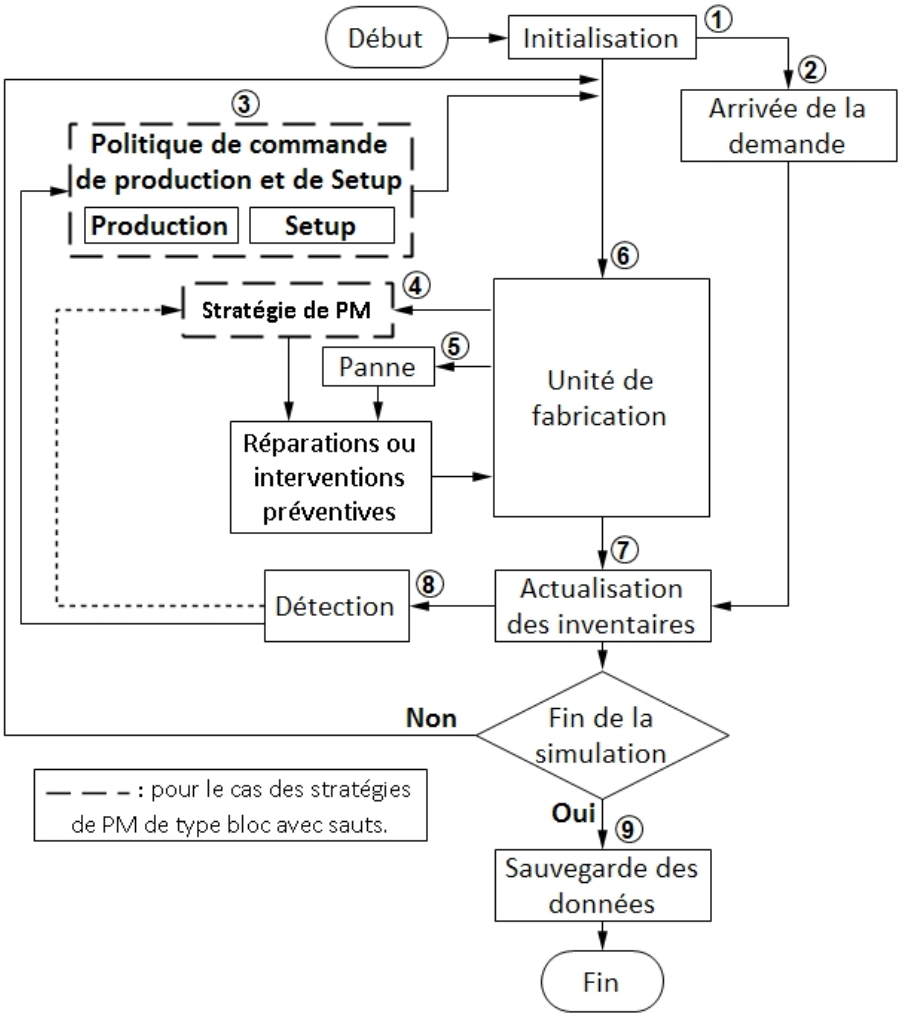


Figure 3.2 Schéma-bloc des modèles de simulation

- Bloc ① : Initialisation

Il initialise les variables du modèle (taux de demande, la capacité de la machine, etc.) ainsi que la durée de simulation et les paramètres minimaux et maximaux d'avancement dans temps pour l'intégration des variables cumulatives et les erreurs permises.

- Bloc ② : Arrivée de la demande

Il affecte directement le niveau d'inventaire des deux types de produits finis à chaque instant. En effet, nous nous servons des contrôles effectués de façon continue afin de déterminer s'il

s'agit d'une rupture de stock ou pas. Les taux de la demande clientèle sont utilisés comme une entrée dans les équations différentielles des inventaires.

- Bloc ③ : Politique de commande de production et de Setup

Il permet d'appliquer la loi de commande de la politique de commande de production et de Setup considérée (section 3.1.2). Ainsi, le choix du type de produit à fabriquer et les taux de production sont déterminées en fonction du niveau des stocks de sécurité des produits finis (voir bloc *Détections* ⑧).

- Bloc ④ : Stratégie de PM

Il se charge de procurer les changements de l'état du système concernant la maintenance préventive, et décide de l'application ou non des interventions de PM selon la structure de la stratégie de PM utilisée ainsi que grâce à l'aide des données instantanées fournies par le bloc *Détections* ⑧ pour le cas de la stratégie de PM avec sauts. En effet, pour cette dernière, des sauts de PM sont autorisés lorsque le niveau d'inventaire des produits finis est suffisant ($x_1(t) + x_2(t) \geq Z_{PM}$).

- Bloc ⑤ : Pannes

Il définit les temps de pannes et les temps de réparations de la machine. Les modèles de simulation sont développés de telle façon à admettre toute les distributions de probabilité possible (~Panne et ~Réparation).

- Bloc ⑥ : Unité de fabrication

Il représente l'activité de la machine de fabrication en fonction des commandes de la politique de commande adoptée (section 3.1.2). Notons qu'à chaque instant, l'état de disponibilité de la machine est utilisé pour déterminer le taux de production exprimé sous forme d'équation d'état dans le langage C++. Les produits finis représentent la sortie de ce bloc.

- Bloc ⑦ : Actualisation des inventaires

Il agit sur le niveau des inventaires des produits finis à chaque instant. Effectivement, la variation des inventaires dépend des taux de production de la machine et de la demande clientèle. Lorsqu'un type de produit n'est pas en rupture de stock, sa production augmente son niveau d'inventaire, mais dans le cas contraire, elle se contente de satisfaire sa demande en arriérage en diminuant la rupture de stock.

- Bloc ⑧ : Détection

Il contrôle de façon continue les inventaires des deux types de produits finis et envoie des signaux à chaque déclenchement d'un franchissement des seuils au bloc *Politique de commande de production et de Setup* ③. Ces derniers se composent; en plus des paramètres (b_1, b_2), des valeurs optimale des seuils critiques (Z_1, Z_2) et des bornes du Corridor (a_1, a_2).

- Bloc ⑨ : Sauvegarde des données

Il se met en marche juste avant la fin de la simulation et permet automatiquement d'enregistrer toutes les informations nécessaires pour calculer la valeur du coût total encouru (3.3).

3.2.2 Validation des modèles de simulation

Pour valider le modèle de simulation, une représentation graphique de la variation de la somme des inventaires instantanés des deux types de produits finis ($x_1(t) + x_2(t)$) pour la politique MHCP_BJ a été générée (figure 3.3). La simulation du système est réalisée pour T_{PM}=100, Z_{PM}=80, Z_1= Z_2=200 et a_1=a_2=100. La figure 3.3 montre bien le fait que lorsque la machine est entrain de produire un des produits finis au taux de la demande, le niveau d'inventaire de l'autre produit diminue en satisfaisant sa demande clientèle ce qui implique la diminution de la somme des inventaires ($x_1(t) + x_2(t)$) ①. Il est intéressant de noter que durant les actions de Setup, la machine de fabrication est arrêtée, d'où la diminution de la somme des inventaires au taux $d_1 + d_2$ ② (consulter la structure de la politique de commande de MHCP dans la section 3.2.2). De même, la panne de machine engendre une

diminution des niveaux des inventaires des deux type de produits finis jusqu'à la fin des activités de réparations ④. D'autre part, les interventions de maintenance préventive sont programmées périodiquement à des intervalles de temps prédéterminé $kT_{PM}, T_{PM} = 100$ avec $k = 1,2, \ldots$ ③. Cependant, elles sont annulées si $x_1(t) + x_2(t) \leq Z_{PM}$ ⑤.

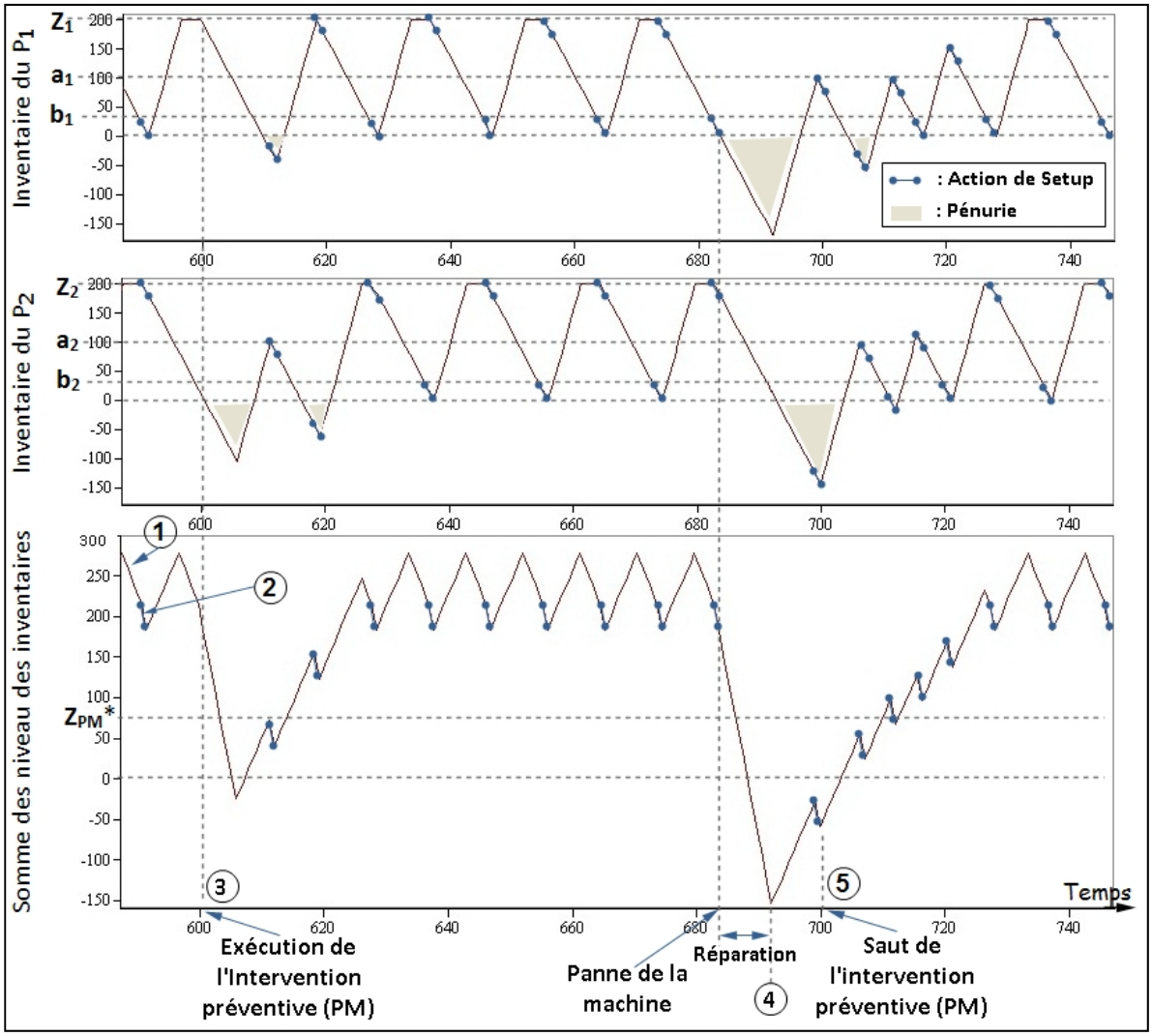


Figure 3.3 Variation de la somme des inventaires des deux produits finis (Z_1=Z_2=200, a_1=a_2=100, $Z_{PM} = 80$ et T_{PM}=100)

Les sections suivantes présentent les résultats de nos expérimentations pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de commande et du coût total encouru, ainsi que l'étude de comparaison effectuée entre les différentes politiques de commande traitées dans ce travail.

3.2.3 Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse

Dans cette section, nous présentons la démarche d'optimisation des paramètres de commande des politiques qui minimisent le coût total moyen encouru, et nous évaluons les résultats des quatre politiques de commande en considérant le coût total comme un critère de comparaison. Les objectifs de la démarche d'optimisation sont : (1) obtenir la relation entre d'une part les variables dépendante du système (i.e. Coût total) et d'autre part, ses facteurs d'entrée (les paramètres de commande de la politique étudiée) ainsi que leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie, et (2) calculer les valeurs optimales des paramètres de la politique (facteurs d'entrée) qui minimisent le coût total moyen encouru. Dans ce sens, un exemple numérique est considéré dans le but d'illustrer l'approche expérimentale combinant la simulation et des techniques d'optimisation statistiques. Nous signalons que pour fin d'illustration nous supposons que les deux types de produits finis sont identiques. Ce qui implique : $c_1^+ = c_2^+ = c^+, c_1^- = c_2^- = c^-,\ c_{12}^s = c_{21}^s = c_s, T_{12}^s = T_{21}^s = T_s,\ N_{12}^s = N_{21}^s = N_s,$ U_1^{max}=U_2^{max}=U_{max}, $d_1 = d_2 = d$. Par conséquent, la valeur des seuils critiques et les bornes du corridor est équivalente pour les deux types de produits finis ($Z_1^{inv} = Z_2^{inv} = Z_{inv}$ et a_1=a_2=a). D'autre part, les paramètres b_1 et b_2 sont utilisés pour représenter la durée juste nécessaire pour passer de la fabrication d'un type de produits à un autre avant de tomber en pénurie, ils dépendent du taux de la demande ($d_i, i \in \{1,2\}$) et de la durée de Setup (T_{ij}^s, $i, j \in \{1,2\}, i \neq j$) qu'on peut calculer à partir de la formule : $b_i = d_i * T_{ij}^s,\ \forall i, j \in \{1,2\}^2$ avec $i \neq j$. Par conséquent, la valeur des paramètres $b_1\ et\ b_2$ est constante puisque le taux de la demande et les temps des opérations de Setup sont fixes (voir les hypothèses adoptées dans la fin de la section 3.1.2).

Sachant que le paramètre Z_{PM} dépend de la somme des inventaires des deux types de produits finis ($x_1(t) + x_2(t)$), la condition suivante est toujours vérifiée : $Z_{PM} < Z_1^{inv} + Z_2^{inv} = 2Z_{inv}$. De même pour la condition $a < Z_{inv}$. Ainsi, deux nouvelles variables α et β sont ajoutées aux modèles de simulation afin de remplacer les paramètres de commande $a\ et\ Z_{PM}$ respectivement dans les plans d'expérience. Elles se définissent par :

$$\begin{cases} a = \alpha * Z_{inv} \\ Z_{PM} = 2 * \beta * Z_{inv} \end{cases} \quad \alpha, \beta \in [0,1]^2 \tag{3.15}$$

Il est intéressant de remarquer que lorsque la valeur de Z_{PM} tend vers zéro, toutes les interventions de PM ne sont plus ignorées, nous concluons que la stratégie de PM de type bloc classique représente une situation particulière de la structure plus générale de la stratégie des remplacements préventifs de type bloc avec sauts. Le tableau 3.2 résume les paramètres de données du système.

Tableau 3.2 Paramètres de simulation

Paramètres	c^+	c^-	c_s	c_{cm}	c_{pm}	T_s	U_{max}	d	$T_p{}^{(1)}$	$T_{acm}{}^{(1)}$	$T_{apm}{}^{(1)}$
Valeurs	0,05	2	30	5000	2500	0,8	58	20	Log-N (120;24)	Log-N (10;1,6)	Log-N (7;1)

(1) *T_s, T_{acm} et T_{apm} indiquent les distributions de probabilité du temps avant la pannes et les durées des actions de CM et PM respectivement.*

Pour chaque politique de commande combiné de production, de Setup et de maintenance, une variable dépendante (coût total moyen encouru) et deux, trois ou quatre variable indépendantes (T_{PM} et Z_{inv} pour HCP_B; T_{PM}, Z_{inv} et a pour MHCP_B; T_{PM}, Z_{inv} et Z_{PM} pour HCP_BJ ainsi que T_{PM}, Z_{inv}, a et Z_{PM} pour MHCP_BJ) sont considérées. En se basant sur les travaux de Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2010), nous supposons que la fonction valeur (3.5) est convexe. Dans ce sens, nous adoptons les plans factoriels complets 3^2 (deux facteurs ayant chacun trois modalités) pour la politique HCP_B, 3^3 pour les politiques MHCP_B et HCP_BJ et 3^4 pour la politique de commande MHCP_BJ. Ce type de plans factoriels complets donne des résultats plus précis puisque chaque interaction est estimée séparément. Cinq réplications ont été effectuées pour chaque combinaison de facteurs, impliquant l'exécution de 45 ($3^2 * 5$) simulations pour HCP_B, 135 ($3^3 * 5$) pour MHCP_B et HCP_BJ et 405 ($3^4 * 5$) pour MHCP_BJ. En ce qui concerne la durée de simulation des politiques de commande, elle est égale à $T_\infty = 500.000$ unités de temps afin d'assurer l'atteinte du régime permanent, avec une durée moyenne du temps d'exécution raisonnable égale à 0,2 minute. Des expériences de simulation préliminaires ont été

effectuées afin de sélectionner les plages du domaine expérimental. Ces dernières sont présentées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Niveaux des variables indépendantes pour les différentes politiques

Politiques de commande	Facteurs	Niveau inférieur	Centre	Niveau supérieur
HCP_B	T_{PM}	76	98	120
	Z_{inv}	170	223	276
MCHP_B	T_{PM}	76	98	120
	Z_{inv}	260	328	396
	α	0,24	0,58	0,92
HCP_BJ	T_{PM}	76	98	120
	Z_{inv}	170	215	260
	β	0,06	0,44	0,76
MHCP_BJ	T_{PM}	76	98	120
	Z_{inv}	250	308	366
	α	0,28	0,6	0,92
	β	0,06	0,44	0,76

Des analyses de variance multifactorielle (ANOVA) sont effectuées sur les données résultantes de la simulation via l'utilisation du logiciel de statistiques Statgraphics. Ces analyses ont pour but d'étudier et de comprendre les effets des paramètres de commande des politiques de commande (la période de remplacement préventive T_{PM}, le niveau d'inventaire Z_{inv}, la borne du Corridor α et le seuil de PM β) sur le coût total encouru. Les effets quantifiés des principaux facteurs, les interactions et les effets quadratiques, ainsi que la valeur R^2 ajustée (les coefficients de corrélation ajustée) pour chaque politique de commande, sont présentés dans la figure 3.4. Le logiciel Statgraphics nous a permis également d'effectuer d'autres analyse statistiques comme le calcul des coefficients de régression, la génération des surfaces de réponse, et l'analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance qui nous a permis de vérifier la conformité de nos modèles.

D'après la figure 3.4, les modèles de simulation expliquent plus de 96 % de la variabilité observée du coût total prévu (Montgomery, 2008). La figure 3.4 indique également qu'à l'exception des interactions des facteurs ($Z_{inv} * \alpha$) pour la politique MHCP_B et ($T_{PM} * \alpha$) pour la politique MHCP_BJ, tous les principaux facteurs (T_{PM}, Z_{inv}, α et β), leurs interactions et les effets quadratiques ($T_{PM}{}^2, Z_{inv}^2, \alpha^2 \; et \; \beta^2$) sont significatifs à un niveau de signification de 95 %. Notons que le troisième ordre des interactions et tous les autres effets sont négligés ou ajouté à l'erreur. Une méthodologie de surface de réponse est par la suite réalisée afin d'optimiser le coût total moyen encouru (variable dépendante) en fonction des variables significatives.

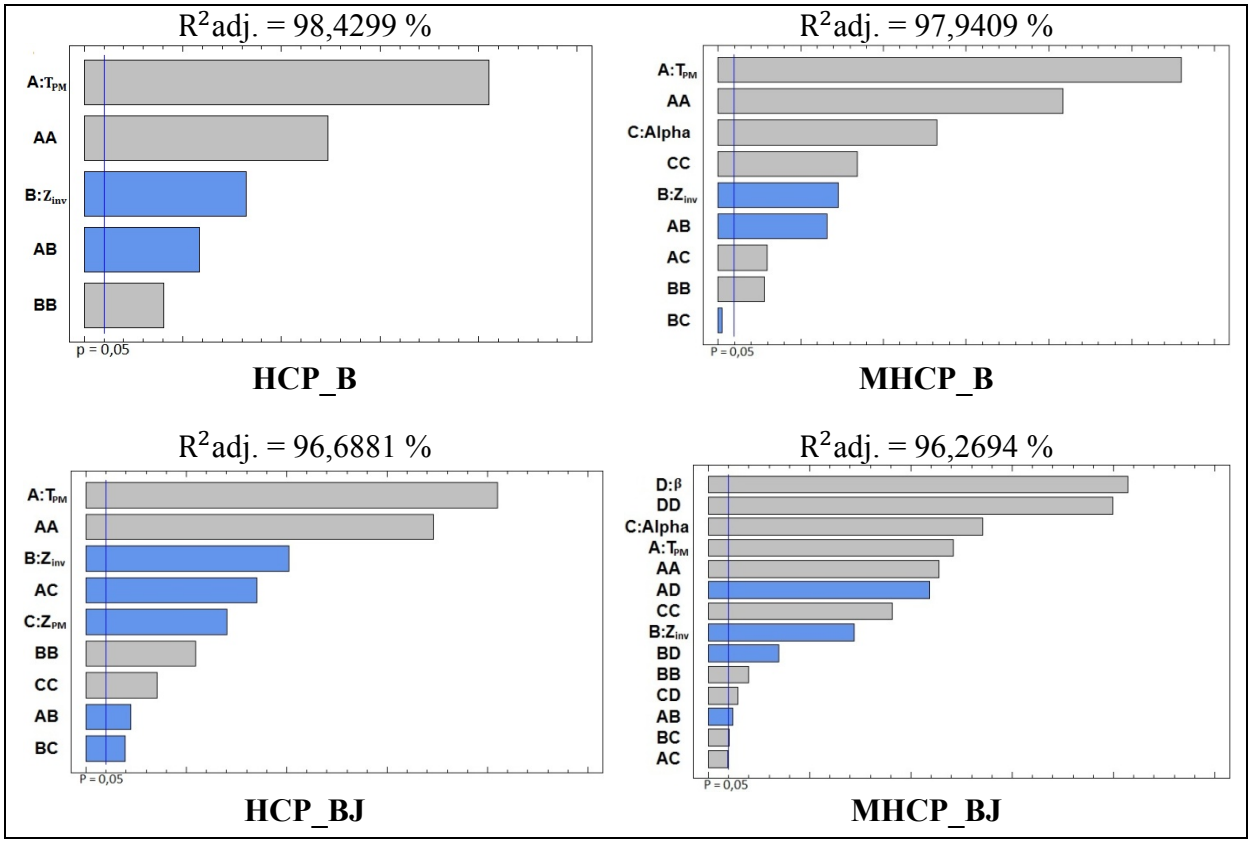


Figure 3.4 Diagramme de Pareto pour les quatre politiques de commande

Les équations suivantes représentent la fonction de surface de réponse du coût total encouru pour les différentes politiques de commande :

$$C_{HCP_B} = 229{,}712 - 3{,}00937.T_{PM} - 0{,}310629.Z_{inv} - 2{,}91424.10^{-3}.T_{PM}.Z_{inv} + 2{,}09215.10^{-2}.T_{PM}^{2} + 1{,}1723.10^{-3}.Z_{inv}^{2} \quad (3.16)$$

$$C_{MHCP_B} = 237{,}836 - 3{,}49926.T_{PM} - 0{,}0802741.Z_{inv} - 45{,}9161.\alpha - 1{,}59369.10^{-3}.T_{PM}.Z_{inv} + 0{,}144274.T_{PM}.\alpha + 2{,}20096*10^{-2}.T_{PM}^{2} + 3{,}12284.10^{-4}.Z_{inv}^{2} + 37{,}2982.\alpha^{2} \quad (3.17)$$

$$C_{HCP_BJ} = 227{,}327 - 2{,}56585.T_{PM} - 0{,}481311.Z_{inv} + 24{,}1197.\beta - 6{,}95791.10^{-4}.T_{PM}.Z_{inv} - 0{,}275758.T_{PM}.\beta - 0{,}0311542.Z_{inv}.\beta + 1{,}55096*10^{-2}.T_{PM}^{2} + 1{,}17103.10^{-3}.Z_{inv}^{2} + 8{,}35226.\beta^{2} \quad (3.18)$$

$$C_{MHCP_BJ} = 181{,}785 - 1{,}98293.T_{PM} - 0{,}188577.Z_{inv} - 50{,}1811.\alpha + 32{,}2719.\beta - 3{,}46395.10^{-4}.T_{PM}.Z_{inv} + 0{,}422786.T_{PM}.\beta + 0{,}020549.Z_{inv}.\alpha - 0{,}0509712.Z_{inv}.\beta + 3{,}86749.\alpha.\beta + 1{,}22117.10^{-2}.T_{PM}^{2} + 3{,}0809.10^{-4}.Z_{inv}^{2} + 46{,}0428.\alpha^{2} + 55{,}9828.\beta^{2} \quad (3.19)$$

Les surfaces de réponse correspondantes à ces fonctions sont présentées dans la figure 3.5. Les résultats d'optimisation des paramètres de lois de commande qui minimisant le coût total encouru sont présentés dans le tableau 3.4. Ce tableau montre que pour les paramètres de coût apposés au système (tableau 3.2), la politique de commande MHCP_BJ donne le meilleur résultat en termes de coût, avec des améliorations de 5,78 % et 11,68 % comparées aux politiques MHCP_B et HCP_BJ respectivement. De plus, les améliorations apportées par ces deux dernières en comparaison par rapport à la politique HCP_B sont de 8,34 % et 2,61 % respectivement. Ces résultats démontrent l'avantage de combiner des sauts de maintenance préventive; lorsque le niveau des stocks de sécurité des produits finis est jugé non-suffisant ($x_1(t) + x_2(t) \leq Z_{PM}$), avec la politique de production et de Setup MHCP. Cela permet d'éviter des opérations inutiles de Setup et de réduire le risque de rupture de stock et le gaspillage des composants relativement nouveaux; lorsqu'une intervention de PM suit immédiatement une action de CM.

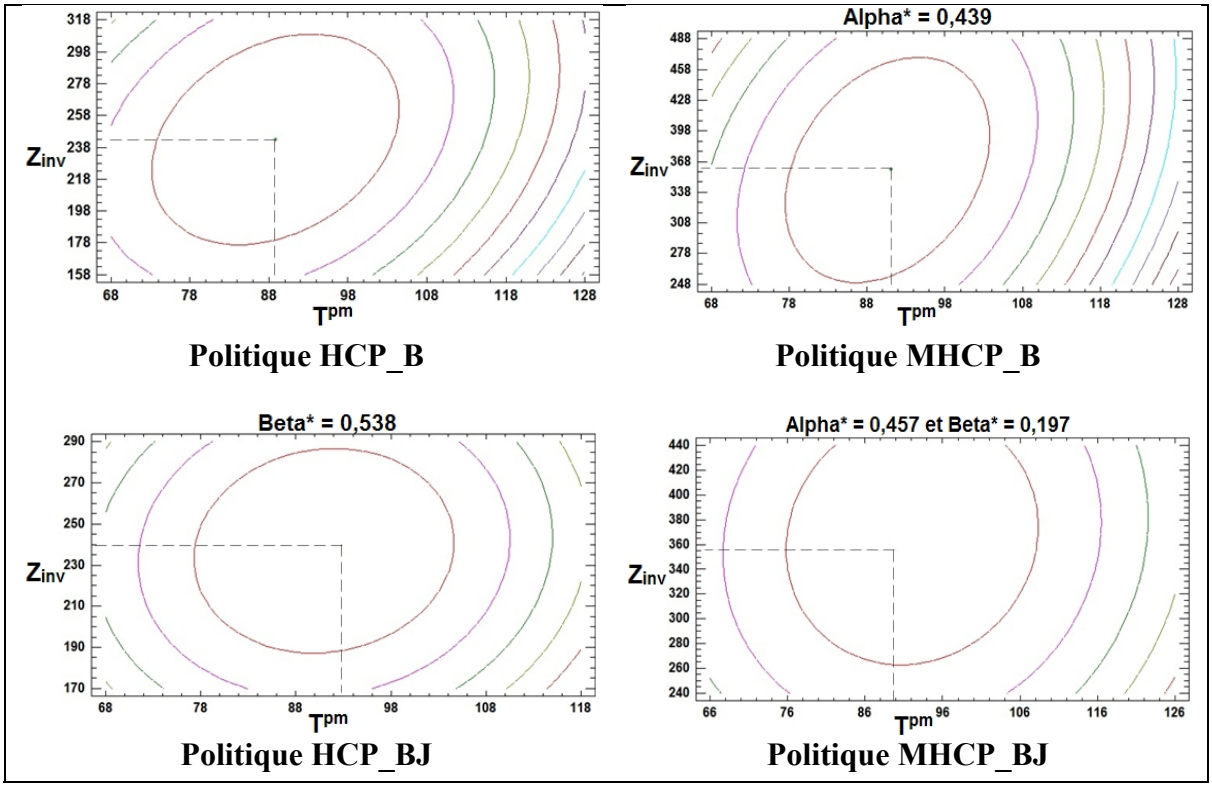


Figure 3.5 Surface de réponse du coût total

Tableau 3.4 Résultats d'optimisation des politiques de commande

Modèles	T_{PM}^{*}	Z_{inv}^{*}	a^{*}	Z_{PM}^{*}	**Coût Total**	**Intervalle de confiance (95 %)**
HCP_B	88,84	242,91	-	-	58,31	[58,28 ; 58,41]
MHCP_B	91,13	361,08	158,63	-	53,82	[53,77; 54,02]
HCP_BJ	92,89	240,27	-	258,39	56,83	[56,79; 56,97]
MHCP_BJ	89,68	357,53	163,33	141,14	50,88	[50,82; 50,98]

Toutefois, afin de valider les résultats obtenus par les modèles représentés par les équations (3.16)-(3.19), d'autres analyses s'imposent. Dans ce sens, nous avons considéré les paramètres de commande optimaux de chaque politique comme entrée pour conduire des expériences de simulation. $n = 20$ réplications ont été adoptées. Nous confirmons que la valeur du coût optimal pour chaque politique de commande (tableau 3.4) appartient bien à l'intervalle de confiance à 95 % ($\overline{C.T.} \pm t_{1-(\alpha/2)}^{n-1}\sqrt{S^2/n}$) équivalent (voir la section 1.3.3 du premier chapitre).

3.3 Analyse de sensibilité

Une série d'exemples numériques est considérée afin d'étudier la sensibilité des politiques de commande du problème lorsque les paramètres de coût varient. Le but est de confirmer l'efficacité et la robustesse de l'approche de résolution et de comparer le coût total encouru et le comportement des politiques de commande pour différentes combinaisons des paramètres de coût. Ces dernières sont dévirés du scénario de base en les changeant à des valeurs plus ou moins élevées (voir les tableaux 3.5 et 3.6).

Les résultats présentés dans les tableaux 3.5 et 3.6 montrent que les paramètres optimaux des politiques de commande évoluent dans le même sens et avec la même amplitude en fonction de la variation des paramètres de coût, excepté le paramètre du coût de Setup dont le sens de la variation dépend de la structure de la politique de production et de Setup (HCP ou MHCP) adoptée (voir en bas la réaction des paramètres de commande quand c_s varie). La structure de la politique de production et de Setup affecte également la valeur du seuil de PM (Z_{PM}^*) : d'après les tableaux 3.5 et 3.6, Z_{PM}^* de la politique de commande **HCP**_BJ est nettement supérieur par rapport à celui de la politique **MHCP**_BJ. Effectivement, si le niveau d'inventaire des produits finis sous les commandes de la stratégie de Setup modifiée (MHCP) atteint le seuil critique pour un produit fini donné, le taux de production est adapté au taux de la demande en attendant que l'autre produit s'approche de la rupture de stock pour exécuter une opération de Setup. Tandis que la stratégie de Setup classique (HCP) adopte un taux de production maximal tout au long du fonctionnement de la machine (voir deuxième chapitre). De ce fait, la politique **MHCP**_BJ a un risque de rupture de stocks plus grand lors des arrêts de l'activité de production que la politique **HCP**_BJ. D'où $\mathrm{Z}_{\mathrm{PM}}^{*}$ (HCP_BJ) $\geq \mathrm{Z}_{\mathrm{PM}}^{*}$ (MHCP_BJ) pour réduire; en ce qui concerne la politique MHCP_BJ, le nombre de pannes qui durent généralement plus longtemps, et ainsi, réduire le risque de pénurie. La même explication est donnée pour $\mathrm{T}_{\mathrm{PM}}^{*}$ (HCP_BJ) $\geq \mathrm{T}_{\mathrm{PM}}^{*}$ (MHCP_BJ).

Les tableaux 3.5 et 3.6 confirme aussi la condition : le seuil de PM (Z_{PM}^*) est toujours inférieur au seuil $2 * Z_{inv}^*$. D'autres parts, nous remarquons que le seuil critique Z_{inv}^* des

politiques de commande HCP_BJ et MHCP_BJ est inférieur à celui des politiques HCP_B et MHCP_B respectivement. Cela est dû à leur capacité à sauter des interventions de PM celle-ci sont programmées juste après des actions de CM permettant ainsi de réduire le risque de rupture de stock. La réaction des paramètres de commande ainsi que celle du coût total encouru est analysée comme suit :

- Variation du coût d'inventaire c^+ (cas 1 et 2)

Lorsque le coût d'inventaire augmente, le seuil critique Z_{inv}^* et la borne du corridor a^* de toutes les politiques de commande diminuent dans le but d'éviter des coûts supplémentaires de l'inventaire. En conséquence, le système réagit; face à un risque plus grand de rupture de stock, en diminuant l'intervalle entre les interventions de maintenance préventive ${T_{PM}}^*$ ainsi que le seuil de PM Z_{PM}^* pour les modèle **HCP**_BJ et **MHCP**_BJ. En raison de l'augmentation du coût de possession des stocks de sécurité, le coût total des quatre politiques de commande augmente. Le contraire se produit lorsque c^+ diminue.

- Variation du coût de pénurie c^- (cas 3 et 4)

La variation du coût de pénurie a un effet inverse sur les niveaux des stocks tampons comparée avec celle du coût d'inventaire. Évidemment, quand le coût de pénurie augmente, le seuil critique Z_{inv}^* et la borne du corridor a^* augmentent pour but d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock suite aux arrêts de l'activité de la production. Dans le même sens, l'augmentation de la fréquence de PM (diminution du paramètre ${T_{PM}}^*$ et le seuil de PM Z_{PM}^*) de toutes les politiques de commande a pour but de réduire le nombre de pannes qui durent plus longtemps. Notons également l'augmentation du coût total pour les quatre politiques de commande quand c^- croît. Le contraire se produit quand c^- diminue.

Tableau 3.5 Analyse de sensibilité pour les politiques de commande avec la stratégie HCP

Cas	Paramètres de coût					T_{PM}^*		Z_{inv}^*		Z_{PM}^*	Coût total (C^*)		Remarque
	c^+	c^-	c_s	c_{pm}	c_{cm}	HCP_B	HCP_BJ	HCP_B	HCP_BJ	HCP_BJ	HCP_B	HCP_BJ	
Base	**0,05**	**2**	**30**	**2500**	**5000**	**88,84**	**92,89**	**242,91**	**240,27**	**258,39**	**58,31**	**56,83**	**Cas de base**
1	**0,03**	2	30	2500	5000	90,20	93,87	261,40	258,11	305,05	50,59	49,18	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	**0,07**	2	30	2500	5000	87,42	91,86	224,67	222,77	216,27	65,31	63,78	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	0,05	**1,8**	30	2500	5000	88,84	92,96	238,29	235,62	249,76	58,09	56,67	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \downarrow$
4	0,05	**2,2**	30	2500	5000	88,82	92,82	246,75	244,09	265,26	58,49	56,94	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \uparrow$
5	0,05	2	**26**	2500	5000	88,92	93,00	243,00	240,33	259,65	57,15	55,65	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \downarrow$
6	0,05	2	**34**	2500	5000	88,76	92,77	242,83	240,21	256,95	59,47	58,00	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \uparrow$
7	0,05	2	30	**2000**	5000	86,69	89,24	240,22	238,49	214,63	52,78	51,58	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \downarrow$
8	0,05	2	30	**3000**	5000	90,88	96,85	245,48	242,16	314,10	63,67	61,68	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \uparrow$
9	0,05	2	30	2500	**4000**	90,25	96,54	244,74	241,85	309,41	57,86	56,05	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \downarrow$
10	0,05	2	30	2500	**6000**	87,64	90,37	241,36	239,16	225,28	58,70	57,35	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \uparrow$

Tableau 3.6 Analyse de sensibilité pour les politiques de commande avec la stratégie MHCP

Cas	T_{PM}^*		Z_{inv}^*		α^*		Z_{PM}^*	Coût total (C^*)		Remarque
	MHCP_B (1)	MHCP_BJ (2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)	(1)	(2)	
Base	**91,13**	**89,68**	**361,08**	**357,53**	**158,63**	**163,33**	**141,14**	**53,82**	**50,88**	**Cas de base**
1	92,43	89,94	395,30	366,00	173,82	166,81	148,00	45,48	42,91	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	89,43	88,54	317,33	314,19	139,64	146,07	108,56	61,12	58,13	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	91,23	89,82	350,92	346,74	154,21	159,32	132,61	53,47	50,80	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \downarrow$
4	91,01	89,55	369,48	366,00	162,26	166,45	148,28	54,13	50,91	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \uparrow$
5	91,08	89,65	359,69	356,23	157,74	162,69	140,13	53,57	50,63	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \downarrow$
6	91,17	89,71	362,36	358,80	159,43	163,98	142,10	54,08	51,14	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \uparrow$
7	89,11	85,99	355,96	352,19	157,71	162,04	110,53	48,49	45,03	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \downarrow$
8	93,03	93,19	365,95	363,83	159,45	164,80	183,52	59,00	56,34	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \uparrow$
9	92,68	92,91	365,02	364,61	159,33	164,97	191,02	53,23	50,55	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, Z_{PM}^* \uparrow, C^* \downarrow$
10	89,80	87,13	357,67	353,10	157,93	162,28	113,49	54,34	50,89	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, Z_{PM}^* \downarrow, C^* \uparrow$

- Variation du coût de Setup c_s (cas 5 et 6)

Les résultats des tableaux 3.5 et 3.6 montrent que l'influence de la variation du coût de Setup sur les paramètres de commande varie selon la structure de Setup adoptée. En ce qui concerne les politiques de commande **HCP**_B et **HCP**_BJ, l'augmentation du coût de Setup donne plus de préférence aux interventions de PM afin de réduire le nombre d'opération de Setup. Rappelons que ces politiques de commande adoptent le taux maximal de production tout au long de la disponibilité de la machine, c'est à dire qu'au moment où un seuil critique Z_{inv}^* est atteint, une opération de Setup est automatiquement exécutée. Par conséquent, si ${T_{PM}}^*$ et Z_{PM}^* pour la politique HCP_BJ diminuent, le nombre d'opérations de Setup diminue également. De plus, l'augmentation du nombre de PM réduit le risque de panne du système de production, d'où la diminution du besoin de possession des stocks tampons (Z_{inv}^* et a^* diminuent). Par contre, en comparaison avec les politiques **HCP**_B et **HCP**_BJ, l'effet du coût de Setup sur les paramètres de commande des politiques **MHCP**_B et **MHCP**_BJ est parfaitement inverse. Concernant ces dernières, elles n'effectuent aucune opération de Setup que si l'un des produits risque de tomber en pénurie, sinon la production est maintenue au taux de la demande. En clair, le nombre d'opération de Setup est proportionnel au niveau du seuil critique Z_{inv}^* et la borne du corridor a^*. Ainsi, quand le coût de Setup c_s augmente, les valeurs de Z_{inv}^* et a^* augmentent afin de réduire le nombre d'opérations de Setup. De plus, en raison de l'augmentation des niveaux des stocks tampons (augmentation de Z_{inv}^* et a^*), le risque de rupture de stock diminue et le système réduit la fréquence de PM par l'augmentation de ${T_{PM}}^*$ et Z_{PM}^*. Le contraire se produit quand c_s diminue.

- Variation du coût de PM c_{pm} (cas 7 et 8)

Lorsque le coût de PM augmente, l'intervalle entre les interventions de maintenance préventive ${T_{PM}}^*$ et le seuil de PM Z_{PM}^* augmentent dans le but d'éviter les actions de PM qui coûtent plus cher. Ainsi, le risque de pannes croît d'où le besoin d'augmenter le seuil critique Z_{inv}^* et de la borne du corridor a^*. Le coût total des politiques de commande augmente suivant l'augmentation de c_{pm}. Le contraire se produit lorsque c_{pm} diminue.

- Variation du coût de CM c_{cm} (cas 9 et 10)

Comparé à la variation du coût de PM, l'influence du coût de CM à un effet inverse sur les paramètres de commande. En effet, quand le coût de CM augmente, le système tend exécuter plus de PM en diminuant l'intervalle entre les interventions de maintenance préventive $T_{PM}{}^{*}$ et le seuil de PM Z_{PM}^{*}. Ainsi, le système évite de plus en plus de CM, donc de rupture de stock, d'où la réduction du seuil critique Z_{inv}^{*} et de la borne du corridor a^{*}. Une augmentation du coût total est aussi observée pour toutes les politiques de commande du problème quand c_{cm} croît. Le contraire se produit quand c_{cm} diminue.

Cette analyse de sensibilité présentée dans cette section, montre bien que la politique de commande MHCP_BJ est la plus avantageuse de toutes les autres politiques en termes de coût. Son amélioration par rapport à la politique MHCP_B varie entre 4,74 % jusqu'à 7,67 %, et entre 9,48 % jusqu'à 14,6 % par rapport à la politique HCP_BJ. Pour conclure sur la supériorité d'une politique par rapport aux autres, nous estimons que ces vingt cas étudiés dans cette section ne sont pas suffisants, et qu'il est évident que d'autres analyses comparatives seraient nécessaires.

3.4 Influence des paramètres du coût et de temps sur les politiques de commande

Dans cette section, nous procédons à une étude plus approfondie de l'influence de la variation de chaque paramètre de coût et de temps du système, sur les coûts des politiques de commande considérées dans ce chapitre. La façon dont ces politiques évoluent les unes par rapport aux autres est aussi analysée. Afin de comparer la variation du coût total encouru entre deux politiques de commande i et j, nous utilisons la différence de coût. Cette dernière est exprimée par : $DC(i,j) = (C_i^{*} - C_j^{*}) / C_j^{*}$, $i \neq j$.

3.4.1 Influence des paramètres de coût

Dans cette partie, une étude plus approfondie est réalisée pour déterminer et comparer l'influence de chaque paramètre de coût sur le coût total encouru des politiques de commande considérées dans ce chapitre. Les autres paramètres de temps sont fixés à leurs

valeurs définies dans le cas de base. Les figures 3.6, 3.7 et 3.8 présentent une comparaison du coût total relatif aux politiques HCP_B, HCP_BJ, MHCP_B et MHCP_BJ lors de la variation des paramètres de coût d'inventaire (c^+), de pénurie (c^-), de maintenance corrective (c_{cm}), de maintenance préventive (c_{pm}) et de Setup (c_s). Nous remarquons que le coût total correspondant à la politique MHCP_BJ est toujours inférieur à celui des autres politiques de commande.

La variation de c^+ affecte principalement les coûts d'inventaire ainsi que celui de maintenance (CM et PM) pour les modèles qui considère le saut de PM comme variable de décision. Nous remarquons que lorsque c^+ augmente, le système donne plus de préférence aux interventions de PM et réduit l'importance des sauts de ces dernières (${T_{PM}}^*$ et Z_{PM}^* diminuent), d'où la diminution de la différence de coût $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$ (figure 3.6 a). La diminution de $DC(\mathbf{HCP}\text{_B}, \mathbf{MHCP}\text{_B})$ et $DC(\mathbf{HCP}\text{_BJ}, \mathbf{MHCP}\text{_BJ})$ est également constatée. L'explication de ce phénomène est liée à la croissance de la fréquence des actions de PM (${T_{PM}}^*$ diminue) suite la croissance de c^+ (voir les tableaux 3.5 et 3.6). Effectivement, à cause de la structure de la stratégie de Setup pour les politiques de commande MHCP_B et MHCP_BJ, le fait d'exécuter plus de PM revient à générer plus de rupture de stock que les politiques HCP_B et HCP_BJ respectivement.

Comme déjà mentionné dans la section 3.3, le système; face à la croissance du coût de pénurie (c^-), diminue la valeur de ${T_{PM}}^*$ mais croît la valeur des seuils critiques optimaux Z_{inv}^* et Z_{PM}^* (s'il y a lieu) pour but d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock suite aux pannes du système. Ces dernières durent beaucoup plus longtemps que les interventions préventives. Il est intéressant de noter que la croissance de la valeur de Z_{PM}^* donne plus de signification aux sauts de PM, d'où l'augmentation des différences de coût $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$ (figure 3.6 b). La figure 3.6 (b) montre également que la valeur de $DC(\mathbf{HCP}\text{_B}, \mathbf{MHCP}\text{_B})$ et $DC(\mathbf{HCP}\text{_BJ}, \mathbf{MHCP}\text{_BJ})$ diminue quand c^- augmente. Ce phénomène est dû aux coûts de rupture de stock générés. En effet, les politiques **MHCP**_B et **MHCP**_BJ ne permettent pas l'exécution des opérations de Setup que lorsque le système risque une rupture de stock, dans le cas contraire, la production est

maintenue au taux de la demande. De l'autre coté, la machine sous les commandes des politiques **HCP**_B et **HCP**_BJ, fonctionne tout au long de sa période de disponibilité à capacité maximal. En conséquence, les politiques **HCP**_B et **HCP**_BJ engendrent moins de pénurie que les politiques **MHCP**_B et **MHCP**_BJ respectivement.

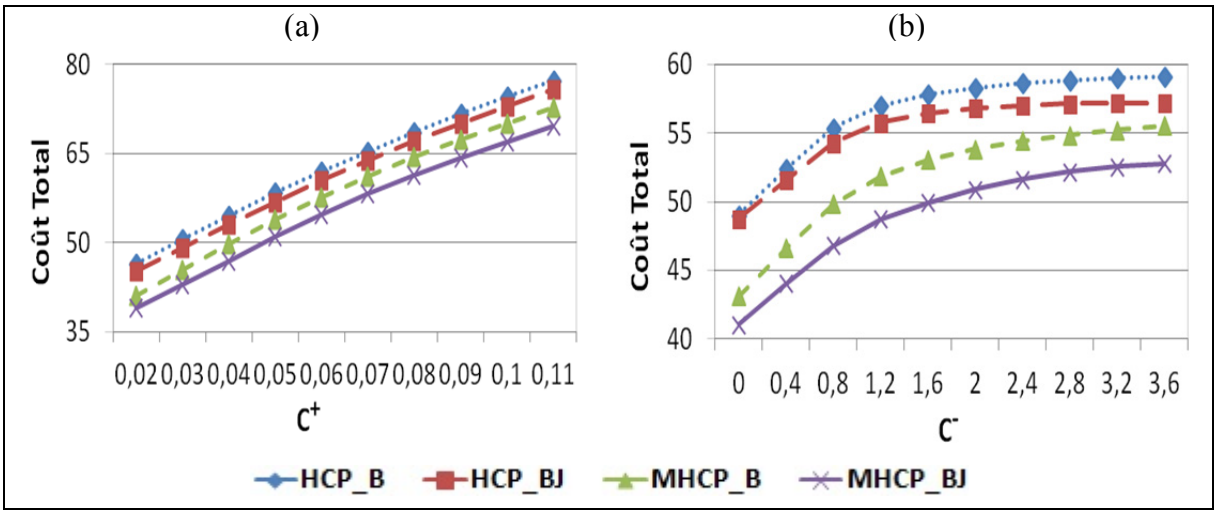


Figure 3.6 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts d'inventaire et de pénurie

La figure 3.7 présente; pour le cas de base, la variation du coût total des différentes politiques de commande considérées lorsque les paramètres du coût de CM (figure 3.7 a) et de PM (figure 3.7 b) varie de 2500 à 20000 et de 1000 à 5000 respectivement. Selon la figure 3.7 (a), les politiques avec sauts de PM devient moins intéressantes lors de l'augmentation du c_{cm} (voir les tableaux 3.5 et 3.6) puisque le fait de sauter une intervention de PM augmente le risque de tomber en panne avant la prochaine intervention préventive. En effet, les résultats obtenus montrent que les modèles HCP_**BJ** et MHCP_**BJ** engendrent plus de pannes que les politiques HCP_**B** et MHCP_**B** respectivement. D'où la réduction de DC(HCP_**B**, HCP_**BJ**) et DC(MHCP_**B**, MHCP_**BJ**). Dans le même cas, la valeur de DC(**HCP**_B, **MHCP**_B) et de DC(**HCP**_BJ, **MHCP**_BJ) diminue. Cependant, cette diminution cache le gain obtenu au niveau du coût de production (Coût d'inventaire, de pénurie et de Setup) par rapport à celui de la maintenance qui dépend du paramètre $T_{PM}{}^{*}$ (voir les tableaux 3.5 et 3.6).

D'autre part, la figure 3.7 (b) montre bien que l'influence de la variation de c_{pm} sur les politiques qui effectuent des sauts de PM est inverse par rapport à la variation de c_{cm} (voir les tableaux 3.5 et 3.6). Par contre, une réduction de la différence de coût due à la croissance du nombre de CM (puisque $T_{PM}{}^{*}$ augmente), est enregistrée entre **HCP**_B et **MHCP**_B et entre **HCP**_BJ et **MHCP**_BJ. Il pertinent de noter que lorsque c_{pm} augmente, le Saut des actions de la maintenance préventive devient plus significatif pour éviter des coûts supplémentaires de PM. Ce qui explique le dépassement du coût total de la politique **MHCP**_B de celui de la politique HCP_**BJ**.

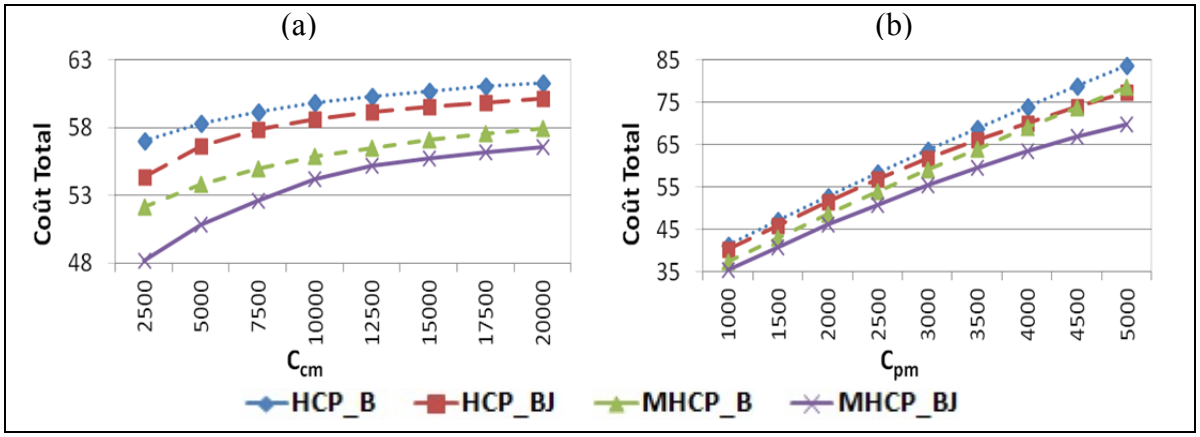


Figure 3.7 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts de CM et PM

Conçus dans le but principal d'éviter les opérations inutiles de Setup, la politique de commande **MHCP**_B croît sa différence de coût avec la politique **HCP**_B quand le coût de Setup augmente (figure 3.8). De même, la valeur de DC(**HCP**_BJ, **MHCP**_BJ) augmente. En effet, cette croissance est due essentiellement au nombre élevé d'opérations de Setup exécutées par les politiques **HCP**_B et **HCP**_BJ; qui utilisent une stratégie de Setup classique, dès qu'un niveau d'inventaire ($X_i, i \in \{1,2\}$) atteint son seuil critique (Z_{inv}). Tandis que les modèles **MHCP**_B et **MHCP**_BJ n'autorisent aucune opération de Setup que lorsque le système de production risque une rupture de stock. La figure 3.8 montre également que la croissance c_s de permet au coût total de la politique **HCP_BJ** de dépasser celui de la

politique **MHCP_B**. Ce phénomène est dû essentiellement à l'augmentation du coût de Setup pour la politique **HCP_BJ**.

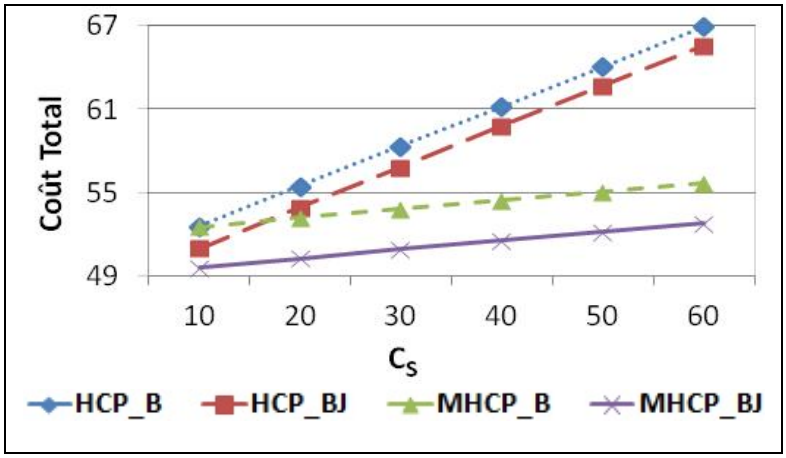


Figure 3.8 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents coûts de SETUP

3.4.2 Influence de la durée de maintenance corrective (CM) et de la maintenance préventive (PM)

L'objectif de cette partie est d'étudier l'effet du temps moyen et son écart-type pour accomplir des actions de CM ainsi que du temps moyen et son écart-type pour accomplir des actions de PM sur le coût des politiques de commande du problème. Les autres paramètres de coût et de temps Setup sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (section 3.3).

Selon les résultats présentés dans la figure 3.9 (a), nous remarquons que l'augmentation du temps moyen des actions de CM (MTTCR) permet au système de production d'exécuter plus d'actions de PM (Z_{PM}^* et T_{PM}^* diminuent) afin de réduire le risque de pannes. Ces derniers engendrent plus de pénurie pour les politiques avec une stratégie de Setup modifiée (**MHCP**_B et **MHCP**_BJ) que celles avec une stratégie de Setup classique (**HCP**_B et **HCP**_BJ), car les politiques de commande HCP_B et HCP_BJ utilisent constamment le taux de production maximal. D'où la diminution de la valeur de $DC(\textbf{HCP}_\text{BJ}, \textbf{MHCP}_\text{BJ})$ et de $DC(\textbf{HCP}_\text{BJ}, \textbf{MHCP}_\text{BJ})$. Dans le même contexte, la valeur de $DC(\text{HCP}_\textbf{B}, \text{HCP}_\textbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP}_\textbf{B}, \text{MHCP}_\textbf{BJ})$ diminuent, puisque le saut d'une intervention de PM augmente

d'avantage le risque de tomber en panne avant la prochaine intervention préventive. D'autres expériences ont été étudiées afin de comparer le coût total des quatre politiques de commande pour un MTTCR plus grand. Elles montrent qu'à la limite de faisabilité (MTTCR = 53 pour la politique MHCP_B), le coût de la politique de commande MHCP_BJ est toujours inférieur en comparaison avec les autres politiques.

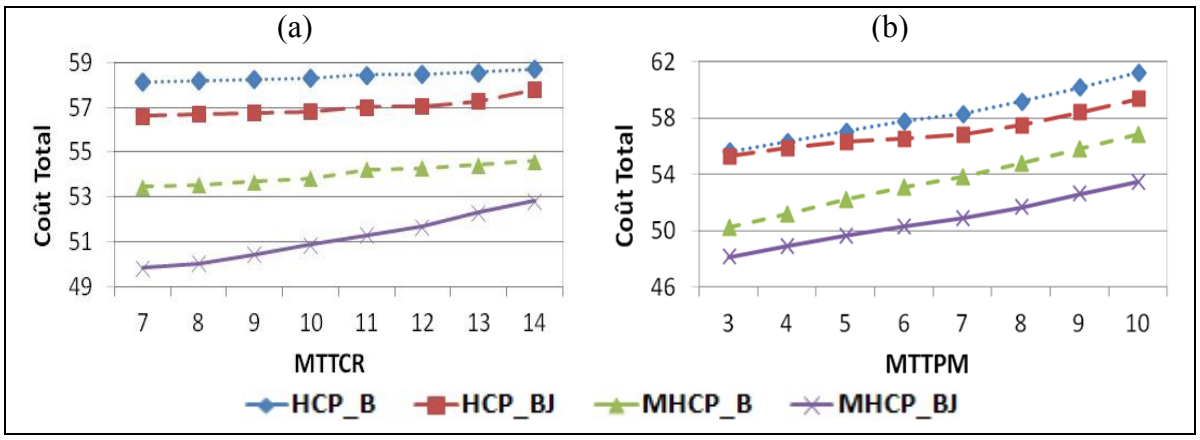


Figure 3.9 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents temps moyen d'opération de CM et PM

La figure 3.9 (b) montre que sauter des actions de PM; pour les politiques de commande HCP_**BJ** et MHCP_**BJ**, deviennent plus intéressant (Z_{PM}^{*} augmente) quand le temps moyen des actions de PM (MTTPM) augmente. D'où l'augmentation de la valeur de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$. En outre, la valeur de T_{PM}^{*} augmente pour toutes les politiques de commande suivant la croissance de MTTPM, afin d'éviter des coûts supplémentaires de PM mais aussi de pénurie (la durée moyenne de PM est plus longue). Ainsi, comme déjà expliqué dans le paragraphe précédent, les arrêts de maintenance qui sont de plus longue durée, réduisent la valeur de $DC(\mathbf{HCP}\text{_BJ}, \mathbf{MHCP}\text{_BJ})$ et de $DC(\mathbf{HCP}\text{_BJ}, \mathbf{MHCP}\text{_BJ})$. Cette réduction est causée par les coûts de rupture de stock générés.

D'après les figures 3.10 (a) et (b), la variabilité de la durée des actions de maintenance corrective et préventive; représentée par l'écart-type SDC et SDP respectivement, influence

les paramètres et le coût des politiques de commande. Nous signalons également que l'augmentation des écart-type SDC et SDP affecte les politiques de commande en un même sens que l'augmentation de MTTCR et MTTPM présentée dans le paragraphe précédent.

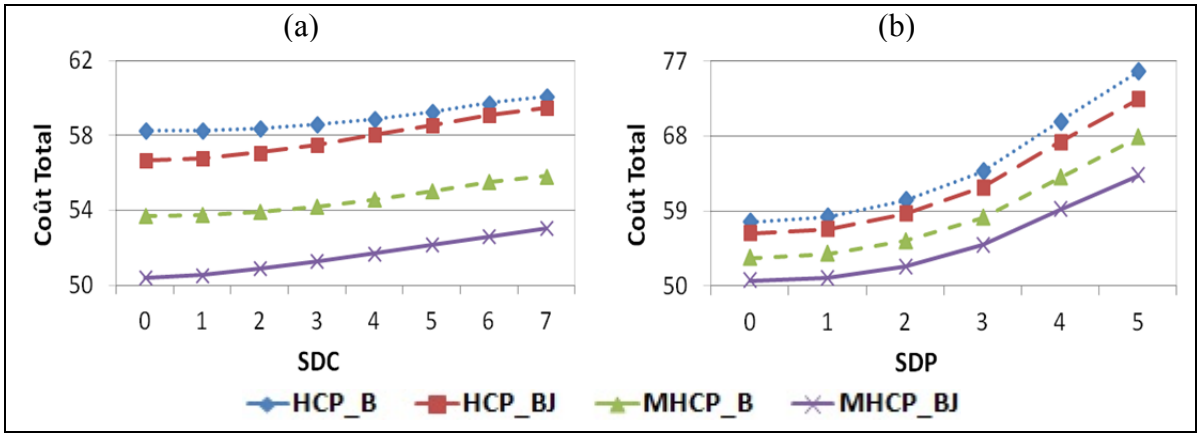


Figure 3.10 Comparaison du coût total des politiques de commande pour différents écart-types des temps d'opération de CM et PM

3.4.3 Influence de la durée de mise en course (Setup)

Dans cette section, nous analysons l'influence de la durée d'opération de Setup (T_S) sur le coût des politiques de commande du problème (figure 3.11). Tous les autres paramètres de coût et de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base. Signalons que la diminution du coût total encouru pour les politiques **HCP**_B et **HCP**_BJ présentée dans la figure 3.11, est due principalement à la réduction considérable du nombre d'opérations de Setup exécutés. En effet, ces politiques de commande qui utilisent le taux de production maximal tout au long de la disponibilité de la machine, engendrent moins d'opérations de Setup quand T_S augmente. Il est intéressant de noter que pour les politiques de commande avec une stratégie de Setup modifiée (**MHCP**_B et **MHCP**_BJ), l'augmentation de T_S se caractérise par une tendance de la valeur du paramètre α^* vers 1 (la valeur a^* croît en direction de $Z_{inv}{}^*$). Ce qui implique **HCP**_B ≅ **MHCP**_B et **HCP**_BJ ≅ **MHCP**_BJ quand T_S est très grand. Dans ce sens, le dépassement du coût total de la politique **MHCP_B** par rapport à celui de la politique **HCP_BJ** lorsque T_S augmente, est expliqué par deux événements principaux : la diminution remarquable du coût de Setup pour les politiques avec

une stratégie de Setup classique (HCP) et la croissance plus marquée du coût d'inventaire pour les politiques avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP). Cette croissance est due à l'augmentation du niveau d'inventaire dans le but d'éviter les coûts de pénurie. Rappelons que la stratégie de Setup modifiée (MHCP) a un risque de rupture de stocks plus grand lors des arrêts de l'activité de production que la stratégie HCP (voir section 4).

D'autre part, l'augmentation de la valeur de T_S croît le risque de pénurie, spécialement si les interventions de la maintenance (CM et PM) sont exécutées juste après une opération de Setup. Par conséquent, le système augmente la valeur de Z_{inv}^{*} , a^{*}. Ainsi, le risque de rupture de stock diminue et le système réduit la fréquence de PM par l'augmentation de T_{PM}^{*} et Z_{PM}^{*}. Cela implique une croissance de la signification des sauts des actions de PM. D'où l'augmentation de la valeur de DC(HCP_**B**, HCP_**BJ**) et DC(MHCP_**B**, MHCP_**BJ**).

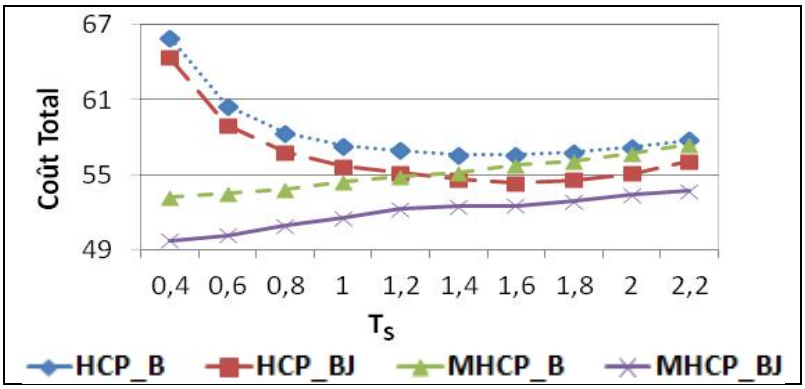


Figure 3.11 Comparaison du coût total des politiques pour différents temps moyen de Setup

En résumé, la comparaison des politiques de commande considérées dans ce travail en termes de coût, montre que pour une large gamme de configurations des paramètres de coût et temps du système, la politique de commande MHCP_BJ donne de meilleurs résultats que les autres politiques. Cet avantage est dû à sa capacité à éviter un grand nombre d'opérations inutiles de Setup et de PM.

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de commande de la production, du Setup (mise en course) et de la maintenance pour un système manufacturier composé d'une seule machine, sujette à des pannes et réparations aléatoires. Cette machine est capable de produire deux types de produits finis avec un délai et un coût de Setup non négligeables. L'objectif principal de ce travail consiste à proposer une structure de loi de commande combinée de production, de Setup et de maintenance. En se basant sur la littérature scientifique, quatre politiques de commande ont été adoptées. Ces dernières sont constituées d'une part, d'une politique de production et de Setup HCP ou MHCP telles que présentées dans le deuxième chapitre, dans le but de contrôler le taux de la production et les opérations de Setup, et d'autre part, d'une stratégie de maintenance préventive (PM) systématique de type bloc classique ou avec sauts. Notons que pour les stratégies de PM avec sauts, les interventions de PM peuvent être annulées si le niveau d'inventaire des produits finis est jugé non-suffisant. Ce travail nous a permis d'étudier l'effet des paramètres de coût et de temps du système sur les paramètres et le coût total encouru des politiques de commande considérées, et d'analyser la façon dont ces politiques évoluent les unes par rapport aux autres. La conclusion principale est que la politique de commande MHCP_BJ combinant la stratégie de Setup modifiée avec celle de maintenance préventive de type bloc avec sauts, donne les meilleurs résultats en termes de coût pour tous les configurations du système choisies. L'étude comparative menée dans ce chapitre démontre l'avantage de la politique MHCP_BJ qui permet d'éviter des opérations inutiles de Setup ainsi que de réduire le risque de rupture de stock et le gaspillage des composants relativement nouveaux lorsque les interventions de PM suivent immédiatement les actions de CM.

Représentant les différentes politiques de commande traitées dans ce travail, quatre modèles de simulation combinée par événements discrets/continus sont développés. Ces modèles permettent d'élaborer une représentation fidèle du comportement stochastique et dynamique du système et de relaxer plusieurs hypothèses simplificatrices considérées souvent dans la littérature, telles que les délais négligeable des actions de CM et de PM, la perte de la demande non satisfaite et l'occurrence des pannes durant la construction du stock tampon. Toutes les solutions optimales présentées dans ce chapitre sont obtenues via l'utilisation

d’une approche expérimentale basée sur les plans d’expériences, la simulation, l’analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Une analyse de sensibilité a été également réalisée et certains comportements intéressants ont été observés, confirmant ainsi la robustesse de l'approche utilisée et l'efficacité des politiques de commande adoptées.

CHAPITRE 4

POLITIQUES DE COMMANDE DE SYSTÈME DE PRODUCTION NON FIABLE COMBINANT LA PRODUCTION, LE SETUP ET LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE AVEC OU SANS OPPORTUNISME

Wang (2002) classe la fonction de la maintenance en deux grandes catégories : la maintenance corrective (CM) qui survient lorsque le système tombe en panne et la maintenance préventive (PM) qui se produit lorsque le système est en fonctionnement. Dans le domaine de la commande, les premiers modèles traitants les stratégies de maintenance sont développés indépendamment de la production. Barlow et Hunter (1960) ont présenté deux stratégies de la maintenance préventive. La première intitulée la politique de maintenance préventive de type âge (Age replacement preventive maintenance policy : ARP), elle repose sur le remplacement des unités au moment de la panne ou après une durée constante de fonctionnement. La deuxième stratégie est la politique de maintenance préventive de type bloc (Bloc replacement preventive maintenance policy : BRP), elle consiste à remplacer les unités lors de la panne ou suite à des intervalles fixes de temps, indépendamment de l'âge des unités.

De point de vue économique, Barlow et Proschan (1965) ont montré que la stratégie ARP est supérieure à celle BRP. Par contre, cette dernière est plus utilisée dans l'industrie, elle est plus pratique à mettre en œuvre et à gérer dans un contexte industriel que la stratégie ARP, puisqu'elle ne nécessite pas un suivi de l'âge des unités. De plus, la stratégie de maintenance BRP est plus gaspilleuse vu la possibilité de remplacer des composantes presque neuves quand les actions de PM surviennent juste après la fin des actions de réparation. Plusieurs approches ont été proposées afin de diminuer ce gaspillage. Barlow et Hunter (1960) proposent d'exécuter des réparations minimales lors de la panne pour ramener l'unité à son état fonctionnel jusqu'à la date prochaine de son remplacement préventif. D'autres modèles suggèrent de se servir des unités usagées au moment des remplacements correctifs au cas où l'unité tombe en panne juste avant l'intervention préventive (Bhat, 1969) et (Murthy et Nguyen, 1982). Des nouvelles unités moins fiables sont aussi considérées pour le

remplacement correctif (Tango, 1979). Berg et Epstein (1976) ont proposé une politique modifiée de la stratégie de maintenance de type bloc (MBRP), elle consiste à exécuter les actions de maintenance préventive à un intervalle constant si le temps écoulé depuis le dernier remplacement dépasse un seuil fixe. Dans le cas contraire, le remplacement préventif est annulé en gardant l'ancienne unité en fonctionnement. Archibald et Dekker (1996) apportent des améliorations à la politique MBRP en utilisant différentes lois statistiques autre que les distributions exponentielles et gammas. Les auteurs ont démontré que la politique MRBP se rapproche de la politique ARP en termes de coût de maintenance tout en gardant une simplicité quand à l'opération de son administration.

Pour la plupart de ces travaux, les durées des interventions de maintenance (PM et CM) sont présumées négligeables. Toutefois, cette hypothèse n'est pas réaliste puisque dans le domaine manufacturier, les arrêts des unités de production dû à la maintenance, diminuent la disponibilité du système et peuvent engendrer des situations de pénurie (Berthaut et al., 2011). D'où l'intérêt à combiner les avantages des stratégies de maintenance, avec des politiques de commande de la production. Cette combinaison permet d'optimiser simultanément les paramètres liés aux politiques de commande de production et de PM, et d'étudier la variation des niveaux d'inventaire de pièces produites en fonction des interventions de la maintenance (Boulet, 2007). Dans ce contexte, Gharbi et al. (2007) ont combiné la politique de commande de type seuil critique avec la politique ARP. Le système manufacturier étudié se compose d'une seule machine produisant un seul type de produits finis et dont le temps et le coût des interventions de maintenance sont non-négligeables. Boulet et al. (2007) ont étendu la politique de Gharbi et al. (2007) en utilisant une stratégie de type MBRP. En se basant sur le coût total encouru, Berthaut et al. (2011) ont comparé l'effet des paramètres de coût et de temps du système sur les politiques de maintenance MBRP, ARP et BRP lorsqu'elles sont combinées avec la politique à seuil critique classique (HPP). Pour le même système manufacturier composé d'une seule machine produisant un seul type de produits, Berthaut et al. (2010) ont développé une politique de commande sous-optimale de production et de maintenance dans le cas de la maintenance préventive systématique. Une étude de comparaison est également réalisée entre la politique de

commande obtenue et la politique HPP lorsqu'elle est combinée avec la stratégie de maintenance BRP. Par contre, la littérature scientifique ne contient aucun travail traitant la combinaison des politiques de commande de production et de Setup avec des stratégies de maintenance préventive.

La fonction de la maintenance qui est considérée jusque tout récemment comme purement réactives (actions correctives) ou bien établies à l'avance dans le temps (Wang, 2002), a continuellement évoluée et devenue une fonction stratégique dans les entreprises industrielles. Cette évolution a permis de reconsidérer l'influence des stratégies de maintenance sur l'organisation de l'entreprise, en tenant compte du besoin des décisions dynamiques basées sur le contrôle des performances globales du système manufacturier et l'anticipation de ses défaillances (Derigent et al., 2009). Levrat et al. (2008) expliquent que ce nouveau rôle de la maintenance existe pour améliorer l'éco-efficacité du cycle de vie du produit. Il exige la considération de l'intégration de la maintenance dans la planification des stratégies de production pour développer les tâches de la maintenance opportuniste, tout en conservant simultanément les performances du produit-production-équipement.

Le concept de maintenance opportuniste (OM) est bien connu dans l'industrie et sa pratique est en utilisation croissante. Selon Bouillaut (2007), Il consiste à prendre en compte les interactions entre les différents composants du système dans le but de profiter de l'arrêt d'un équipement (ou plus) en exécutant des actions préventives sur d'autres équipements du système si jugé nécessaire. Ainsi, pour le critère économique et celui de la disponibilité des ressources, la politique de OM est plus avantageuse quand le coût de regrouper les actions de maintenance est plus faible que de les exécuter séparément. Derigent et al. (2009) indiquent que cette politique est de nature anticipative, qui permet de réaliser des interventions d'entretien qui ne sont pas programmées auparavant, d'avancer ou de retarder des interventions de maintenance qui sont déjà planifiées dans le temps. Selon Dekker et al. (1997), la maintenance opportuniste est toute action qui combine les interventions de la maintenance préventive (PM) avec celles de la maintenance corrective (CM), elle est définie également comme étant le groupement des actions de maintenance sur différents composants

du système pour des raisons économiques (Berk et Moinzadeh, 2000). Dans ce sens, Ouali et al. (1999) propose une stratégie de OM pour une ligne de production composée de plusieurs machines non identiques et sans stocks tampons intermédiaires. Le fonctionnement de cette ligne est arrêté à chaque fois qu'une machine tombe de panne ou atteint sa durée de vie de remplacement. La stratégie proposée consiste à combiner les activités de PM avec celles de CM dans le but de réduire le coût d'entretien.

La maintenance opportuniste est aussi utilisée par Degbotse et Nachlas (2003) qui se sont basés sur le critère de disponibilité des équipements pour présenter une politique de maintenance préventive de type âge avec opportunisme. Ainsi, le composant « a » est remplacé en cas de panne, ou quand il atteint l'âge T(a) spécifié par la politique, ou encore lorsque le système est hors service et le composant a accumulé un âge d'au moins $\tau(a)$, avec $\tau(a) < T(a)$. Pour les systèmes complexes et coûteux, Pham et Wang (2000) expliquent qu'il n'est pas souhaitable de remplacer l'ensemble des composants du système simplement en raison de la défaillance d'un seul. Ils proposent deux modèles de maintenance opportuniste de paramètres (τ, T) avec $\tau(a) < T(a)$ où seul des réparations minimales sont effectuées sur les composants défectueux avant l'instant τ. Après cet instant, les interventions correctives sur les composants en panne sont combinées avec les interventions préventives des unités fonctionnelles mais qui sont détériorées. Si le système atteint l'instant T sans interventions corrective ou préventive, des actions de PM seront appliquées. Jhang et Sheu (1998) traitent un système manufacturier avec deux types de pannes qui dépendent de l'âge de la machine : des pannes secondaires dont les réparations sont minimales et des pannes de grande importance où des actions préventives sont obligatoires. Le système dispose aussi d'un plan de maintenance opportuniste qui consiste à des interventions préventives simultanées lorsqu'une opportunité se présente après un âge T de la machine. Cette opportunité est équivalente à un composant en arrêt que ce soit dû à la panne de ce dernier ou d'un autre élément dans le système.

Le rôle primordial que jouent les activités de maintenance dans le maintien du bon fonctionnement des outils de production et la qualité du produit, incitent plusieurs chercheurs

et industriels à les considérer comme une importance égale à celles de la production. En effet, dans un contexte économique et industriel, il est difficile d'accomplir des actions de PM, sans tenir compte des activités de production. Ce concept nécessite l'intégration de la planification de la maintenance dans la planification des stratégies de production pour but de développer des actions de OM bien synchronisées avec la production (Levrat et al., 2008). Budai et al. (2006) définissent une opportunité comme étant un événement difficile à prévoir à l'avance, qui ne se produit qu'occasionnellement et durant lequel les composants à être maintenus sont moins importants pour leur fonction que d'habitude. De plus, ces opportunités ne concernent pas uniquement l'occurrence de panne du système, mais aussi toute autre arrêt du processus de la production. Les auteurs expliquent également qu'un bon plan de maintenance permet l'intégration de la planification de l'entretien avec le planning de la production, et conduit à des économies considérables de temps ainsi que de coûts.

D'autres récents travaux se sont aussi intéressés aux interdépendances entre les aspects de la production, la maintenance et la qualité qui sont souvent été traités comme des problèmes distincts. Ben Daya (1999) a développé un modèle intégré pour l'optimisation conjointe de la quantité de la production économique, le plan économique des cartes de contrôle et le niveau de maintenance optimale. Comme expliqué par Budai et al. (2006), la planification de la production concerne généralement la détermination de la taille des lots et des besoins en capacité des stocks tampons, qui sont influencés par l'occurrence des pannes et la fluctuation de la demande. De l'autre coté, les actions de maintenance réduisent le risque de pannes et améliore la qualité, d'où le besoin d'intégrer ces trois aspects. L'usage des arrêts de la production dans l'amélioration de la performance globale du système est aussi envisagé dans plusieurs travaux, comme le cas de Levrat et al. (2008) qui ont proposé une approche pour l'intégration de la maintenance dans la planification de la production. Leur objectif est d'utiliser les critères de performance du produit et de fiabilité des composants afin de sélectionner; parmi les différents arrêts prévus de la production, le temps d'exécution des interventions de maintenance en préservant les conditions du produit attendu. Pour cela, les auteurs ont recours à des informations statiques et historiques sur le fonctionnement du système, mais aussi à l'information à temps réel qui rend l'approche dynamique. Cette idée

de tirer profits des arrêts de la production est considérée dans ce chapitre, où des décisions d'interventions préventives seront prises lors des opérations de Setup. Ces opérations nécessitent l'arrêt de la machine concernée pendant une durée non-négligeable.

Dans le cadre d'analyse des interactions entre les politiques de commande de la production, du Setup et de la maintenance, deux objectifs principaux feront l'objet de ce chapitre. Le premier objectif s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans le troisième chapitre en adoptant d'autres stratégies de maintenance préventive (PM). Il consiste à trouver une structure de loi de commande sous-optimale intégrant simultanément la production, le Setup et la PM pour un système manufacturier complexe composé d'une seule machine non fiable et non-flexible capable de produire deux types de produits finis distincts. Une étude comparative est ainsi effectuée pour évaluer la performance des différentes politiques de commande pour une large gamme de configurations du système. Dans ce sens, une approche expérimentale intégrant la simulation, les plans d'expérience, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse est utilisé pour optimiser les paramètres des politiques de commande en minimisant le coût total moyen encouru. Le deuxième objectif vise à introduire le concept de la maintenance opportuniste et à démontrer les gains générés lors de son intégration aux stratégies de maintenance classique dans notre contexte. Le but est de profiter des actions de Setup pour exécuter les actions de maintenance préventive dans le but de réduire le coût total encouru. Notons que les politiques utilisant la notion de la maintenance opportuniste prendront maintenant le nom de politiques avec opportunismes, alors que son absence représentera les politiques sans opportunisme.

4.1 Définition du problème et présentation des politiques avec ou sans opportunisme

Cette section présente une formulation mathématique de la dynamique du système et des politiques de commande intégrant la planification de la production, des stratégies de PM et des stratégies de setup telles présentées dans le deuxième chapitre. La structure du système de production étudié et les hypothèses supportées sont aussi décrites dans cette section.

4.1.1 Notation

La notation suivante sera utilisée dans tout ce chapitre. $\forall\, i \in I = \{1,2\}$

$\boldsymbol{P_i}$: Type du produit i, i ∈ I

$\boldsymbol{x_i(t)}$: Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit P_i au temps t

$\boldsymbol{d_i}$: Taux de la demande du produit P_i

$\boldsymbol{u_i}$: Taux de production du produit P_i

$\boldsymbol{U_i^{max}}$: Taux maximal de production du produit P_i

$\boldsymbol{Z_i}$: Niveau du seuil critique de l'inventaire du produit P_i

$\boldsymbol{a_i}$: Niveau de seuil de Setup (ou Borne du Corridor) du produit P_i

$\boldsymbol{T_A}$: Seuil d'âge constant des actions préventives pour la stratégie de PM de type âge

$\boldsymbol{T_B}$: Temps d'intervention pour la stratégie de PM de type bloc classique

$\boldsymbol{T_{BS1}}$: Temps d'intervention pour la stratégie de PM de type bloc avec sauts

$\boldsymbol{T_{BS2}}$: Seuil de temps permettant de sauter les interventions de PM

$\boldsymbol{T_O}$: Seuil de temps permettant l'avancement des interventions de PM

$\boldsymbol{T_{ij}^s}$: Temps nécessaire pour passer de la production de P_i à P_j (Setup)

$\boldsymbol{N_{ij}^s}$: Nombre d'opérations de Setup exécutées pour passer de la production de P_i à P_j

$\boldsymbol{c_i^+}$: Coût de mise en inventaire par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_i^-}$: Coût de rupture de stock par unité de temps par unité de produit P_i

$\boldsymbol{c_{ij}^s}$: Coût d'une opération de Setup pour passer de la production de P_i à $P_j, i \neq j$

$\boldsymbol{c_{pm}}$: Coût d'une opération de maintenance préventive (PM)

$\boldsymbol{c_{cm}}$: Coût d'une opération de maintenance corrective (CM)

4.1.2 Formulation du problème

Le système manufacturier considéré dans ce chapitre pour illustrer les interactions entre les politiques de commande de production, de Setup et de maintenance, se compose d'une seule machine non flexible sujette à des pannes et des réparations aléatoires. Cette machine produit deux types de produits finis qui doivent être conservés dans deux différents espaces de

stockage avant d'être livrés aux clients. Les stratégies de la maintenance préventive utilisées dans ce travail consistent principalement à des interventions préventives en vue de d'augmenter la disponibilité du système de production. En plus des interventions de la maintenance (CM ou PM), des arrêts de production sont aussi enregistrés quand le système procède à des actions de Setup pour passer de la production d'un type de produit finis à un autre. La figure 4.1 résume la structure globale du système manufacturier étudié. La ligne pointillée représente l'introduction du concept de la maintenance opportuniste qui appelle à l'intégration de la planification de la maintenance dans la planification des stratégies de production. Dans notre cas, il s'agit d'améliorer la synchronisation entre les interventions de maintenance préventive et l'activité de production, plus particulièrement les arrêts programmés de Setup.

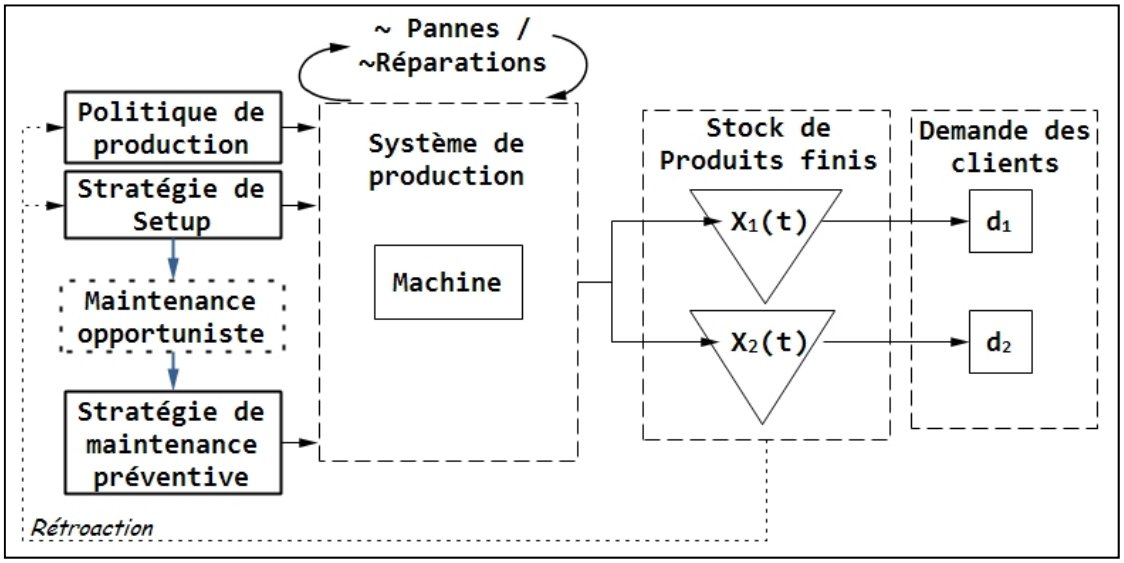


Figure 4.1 Système manufacturier étudié

L'état du système est modélisé par deux composantes, d'une part, le niveau d'inventaire cumulatif des deux produits $X = (x_1, x_2) \in R^2$ qui correspond à une variable continue dans le temps et d'autre part, l'état discret de la machine $\zeta(t) \in M=\{0,1,\ldots,5\}$:

$$\zeta(t) = \begin{cases} 1 : \text{si la machine est opérationnelle} \\ 2 : \text{si la machine est en panne (CM)} \\ 3 : \text{si la machine est en maintenance préventive (PM)} \\ 4 : \text{si la machine est en arrêt Setup et en CM} \\ 5 : \text{si la machine est en arrêt Setup et en PM} \end{cases}$$

L'équation différentielle représentant la dynamique des stocks des produits finis $\dot{X}(t) = \left(\dot{x_1}(t), \dot{x_2}(t)\right) \in R^2$, est exprimée en fonction du taux de production de la machine $u_i(.), i \in \{1,2\}$ ainsi que la demande clientèle $d_i, i \in \{1,2\}$.

$$\begin{cases} \dot{x_1}(t) = u_1(t,\zeta) - d_1\,, & x_1(0) = x_1 \\ \dot{x_2}(t) = u_2(t,\zeta) - d_2\,, & x_2(0) = x_2 \end{cases} \tag{4.1}$$

Où x_1 et x_2 désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire des produits finis P_1 et P_2. La contrainte de capacité des machines de fabrication suivante doit être satisfaite à chaque instant :

$$0 \leq u_i \leq U_i^{max} * \text{Ind}\{\zeta(t) = 1\}, \qquad \forall i \in \{1,2\} \tag{4.2}$$

Avec,

$$\text{Ind}\{\zeta(t) = \delta\} = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = \delta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Comme expliqué dans le troisième chapitre, les activités de Setup sont modélisées par deux paramètres à savoir : l'instant τ_k pendant lequel le système débute la $k^{ème}$ ($k = 1,2, \ldots$) action de Setup et le paramètre ij qui marque la transition de la production du produit fini i vers j. Par conséquent, les variables de décision des politiques de commande combinant la production, le Setup et la maintenance sont : les taux de production de la machine $u_i(.)$, $i \in \{1,2\}$, la séquence des opérations de Setup φ définie par $\varphi = \{(\tau_0, i_0 i_1), (\tau_1, i_1 i_2), \ldots\}$ et les paramètres du temps T des stratégies de la maintenance préventive tels présentés dans la section suivante.

Soit $\Gamma(.)$ l'ensemble des décisions admissibles. L'objectif du problème de commande optimale stochastique est d'optimiser les paramètres de commande du système qui minimisent la fonction du coût moyen total actualisé $J(.)$ sur un horizon infini.

$$J(X,\zeta,u_1,u_2,\varphi,T) = E\left[\int_0^{\infty} e^{-\rho t} g(.)dt + \sum_{j=0}^{\infty} e^{-\rho \tau_j} C^{s}_{i_j i_{j+1}}\right] \quad (4.3)$$

Avec, ρ est le taux d'escompte, $g(.)$ est la fonction du coût instantané d'inventaire et de pénurie, elle est définie comme suit :

$$g(X,\zeta) = c_i^+ x_i^+(t) + c_i^- x_i^-(t) + c_{cm} E^+_{cm}(t) + c_{pm} E^+_{pm}(t) \quad (4.4)$$

Où,

$$\begin{cases} x_i^+ = \max(0, x_i) & \text{si } x_i \geq 0 \\ x_i^- = \max(-x_i, 0) & \text{si } x_i < 0 \end{cases}$$

Et,

$$E^+_{cm}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = 2 \text{ ou } 4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \qquad E^+_{pm}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \zeta(t) = 3 \text{ ou } 5 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$v(X,\zeta,t^s) = \inf_{(T^{pm},U,\varphi)\in\Gamma(\alpha)} J(X,\zeta,u_1,u_2,\varphi,T) \; ; \; \forall X \in R^2, \zeta \in M \quad (4.5)$$

Pour en savoir plus de détails sur la formulation analytique du problème d'optimisation, nous référons nos lecteurs à consulter les articles de Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2010). En plus de ces deux derniers, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique notamment les résultats de Bai et Elhafsi (1997) dans le but de proposer une structure de loi de commande intégrant simultanément la production, le Setup et la maintenance préventive sans passer par la modélisation analytique et numérique. Outre les deux politiques de commande de la production et du Setup (HCP et MHCP) utilisées dans le deuxième chapitre et présentés par les équations (4.6)-(4.13), trois stratégies de PM sont adoptées dans ce travail : la politique de PM de type âge, de type bloc classique et de type bloc avec sauts dont

les interventions préventives sont exécutées seulement si l'âge de la machine depuis la dernière action de maintenance est inférieur à un seuil de temps donné. Je note que les politiques de production et de setup et les stratégies de PM adoptées ne sont pas couplées. De nouvelles politiques de commande sont également développées en intégrant la notion de la maintenance opportuniste. Cette dernière a pour but d'améliorer la synchronisation entre la planification de la maintenance préventive et les opérations de Setup, profitant ainsi des arrêts de l'activité de production.

- Politique de commande de production et de Setup classique (HCP)

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_2 = Z_2) \text{ et } (x_1 < Z_1) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_1 = Z_1) \text{ et } (x_2 < Z_2) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.9)$$

- Politique de commande de production et de Setup modifiée (MHCP)

Soit b_i le niveau de stock nécessaire pour effectuer les actions de Setup avant de tomber en pénurie.

$$u_1(.) = \begin{cases} U_1^{max} * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 < Z_1 \\ d_1 * \text{Ind}\{S_{21} = 1\} & \text{si } x_1 = Z_1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$u_2(.) = \begin{cases} U_2^{max} * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 < Z_2 \\ d_2 * \text{Ind}\{S_{12} = 1\} & \text{si } x_2 = Z_2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$S_{21} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_2 > a_2) \text{ et } (x_1 < b_1) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$S_{12} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_1 > a_1) \text{ et } (x_2 < b_2) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.13)$$

Les politiques étudiées se répartissent en deux grandes catégories : avec opportunisme si elles utilisent le concept de la maintenance opportuniste et sans opportunisme sinon. Ces politiques doivent combiner au moins une politique de commande de production et de Setup (HCP ou MHCP) avec une stratégie de la maintenance préventive.

4.1.3 Politiques de commande sans opportunisme

Le premier objectif de ce travail est de comparer la performance de six politiques de commande de production, de Setup et de maintenance pour une large gamme de combinaisons de coûts et de temps du système. Chacune d'elles intègre une des politiques de commande de production et de Setup telles formulées par (4.6) - (4.13) avec une des stratégies de PM adoptées. Rappelons que les politiques de commande de production et de Setup permettent de définir les règles de passage de la fabrication d'un type de produits à un autre et d'assurer la continuité des activités de la production lors des actions de maintenance via le recours aux stocks tampons. Les stratégies de PM sont utilisées principalement pour augmenter la disponibilité du système de production et réduire la probabilité de défaillance et les effets nuisibles des pannes qui durent généralement plus longtemps, et sont largement couteux en comparaison à des arrêts prévus de la production.

En se basant sur la littérature scientifique notamment le travail de Berthaut et al. (2011), trois stratégies de PM sont adoptées dans ce chapitre, nous citons :

- La stratégie de PM de type âge classique qui repose sur des interventions préventives des machines dès que ces derniers atteignent un certain âge constant T_A. Par contre, si une machine tombe en panne avant cet âge, alors la maintenance corrective (CM) est accomplie pour la réparer. Cette politique de maintenance possède alors un seul paramètre de commande à savoir T_A.

- La stratégie de PM de type bloc classique consiste à effectuer des interventions préventives à des intervalles de temps prédéterminés kT_B, $k = 1,2,3, ...$, et à la panne.

- La troisième est la stratégie de PM du type bloc avec sauts. Cette dernière tient plutôt compte du temps de la dernière intervention de maintenance (CM ou PM) avant de valider ou non, l'exécution des interventions préventives. Ainsi, aux instants kT_{BS1}, $k = 1,2,3, ...$, si le composant est en état de réparation ou si l'âge de la machine depuis la dernière action de maintenance est inférieur à un seuil de temps T_{BS2} ($\hat{A}ge_Machine(t) \leq T_{BS2}$), alors l'intervention de PM est annulée. Notons que la condition suivante est toujours vérifiée $T_{BS2} \leq T_{BS1}$. Cette politique est une sorte de compromis entre la politique de type âge et celle de type bloc. L'avantage à faire un saut des interventions préventives consiste principalement en la réduction du risque de pénurie et du gaspillage des composants relativement nouveaux, lorsqu'une action de PM suit immédiatement une action de CM. Il est intéressant de noter que lorsque la valeur de T_{BS2} tend vers zéro, toutes les interventions de PM ne sont plus ignorées. C'est-à-dire que la stratégie de PM de type bloc classique représente une situation particulière de la structure plus générale de la stratégie de PM avec sauts.

Les figures 4.2 et 4.3 concernent le cas d'une seule machine non-flexible produisant deux types de produits finis avec une capacité de production supérieure au taux de la demande des clients. Elles présentent un exemple pratique de la trajectoire des inventaires pour les trois stratégies de maintenance préventive considérées dans ce chapitre, lorsqu'elles sont combinées à la stratégie de Setup HCP de paramètres Z_1 et Z_2 (voir le deuxième chapitre).

La figure 4.2 montre qu'à la fin des actions de maintenance (CM ou PM) ①, le système est rétabli dans un mode fonctionnel reprenant ainsi l'activité de la production. L'utilisation de la stratégie de Setup HCP (voir deuxième chapitre) implique qu'au moment où l'un des niveaux de stock de produits finis atteint son seuil critique Z_i $i \in \{1,2\}$, une opération de Setup est exécutée pour passer à la fabrication de l'autre type de produit ②. Suite à la structure de la

politique de PM de type âge classique, les interventions préventives sont exécutées après un certains âge constant T_A ($T_p \geq T_A$) ③, ou au moment de la panne ($T_p \leq T_A$) ④.

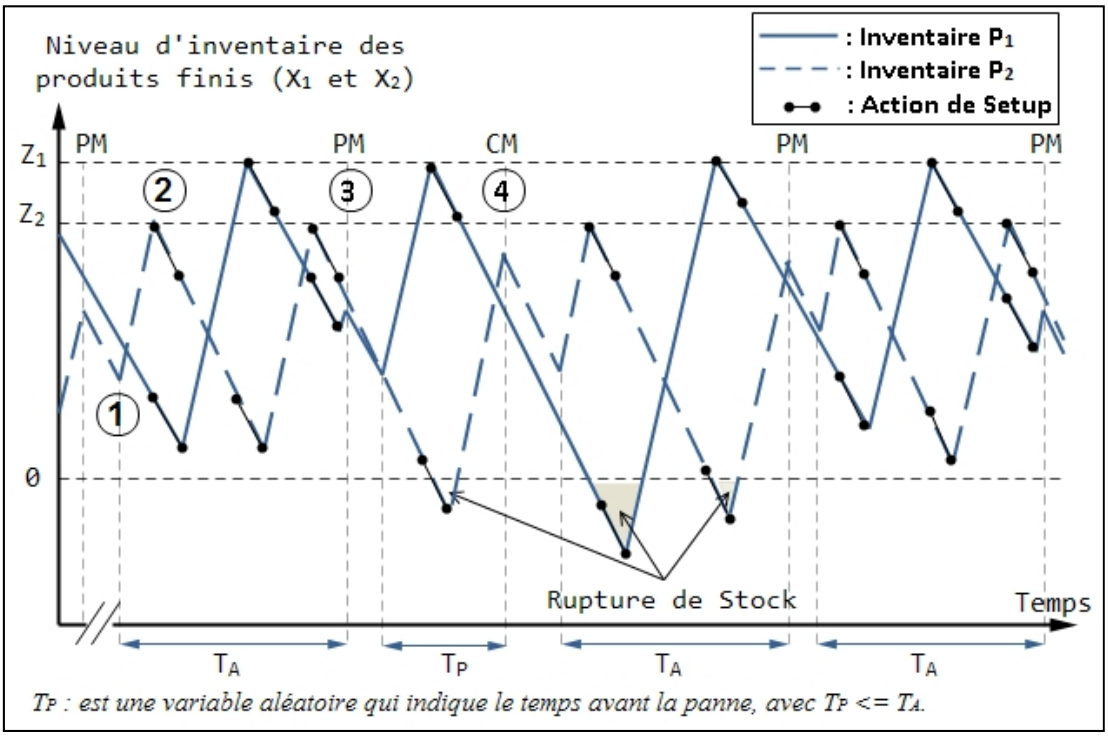


Figure 4.2 Trajectoires du stock tampon sous les commandes de la stratégie de PM de type âge combinées à la stratégie de Setup HCP.

Comme dans le cas de la figure 4.2, la figure 4.3 montre que le système reprend directement l'activité de la production juste après la fin des actions de maintenance (CM ou PM) ①. Un autre arrêt de la production est aussi nécessaire afin d'exécuter une opération de Setup lorsque le niveau d'inventaire d'un des produits finis est atteint ② (politique HCP). En ce qui concerne la politiques de PM de type bloc, les actions préventives sont exécutées chaque $kT, k = 1,2, \ldots$ sauf si l'âge de la machine depuis la dernière action de maintenance est inférieur à un seuil de temps T_{BS2} ($\hat{A}ge_Machine(t) \leq T_{BS2}$) ③, avec $\zeta(t) = 1$ ou 2 (i.e. la machine est opérationnelle ou en Setup). D'autres annulations des interventions de PM peuvent être également appliquées sous les commandes de la politique de PM de type bloc avec sauts. Il est question du cas lorsque la machine se trouve dans un état de réparation suite à une panne ($t = 5T$) ④. Notons que les actions de maintenance, qu'elles soient correctives

ou préventives, diminuent le niveau d'inventaire du produits finis jusqu'à ce que la machine soit rétablie dans son état fonctionnel. Des coûts de pénurie peuvent être engendrés quand le niveau de d'inventaire descend au-dessous de la valeur zéro.

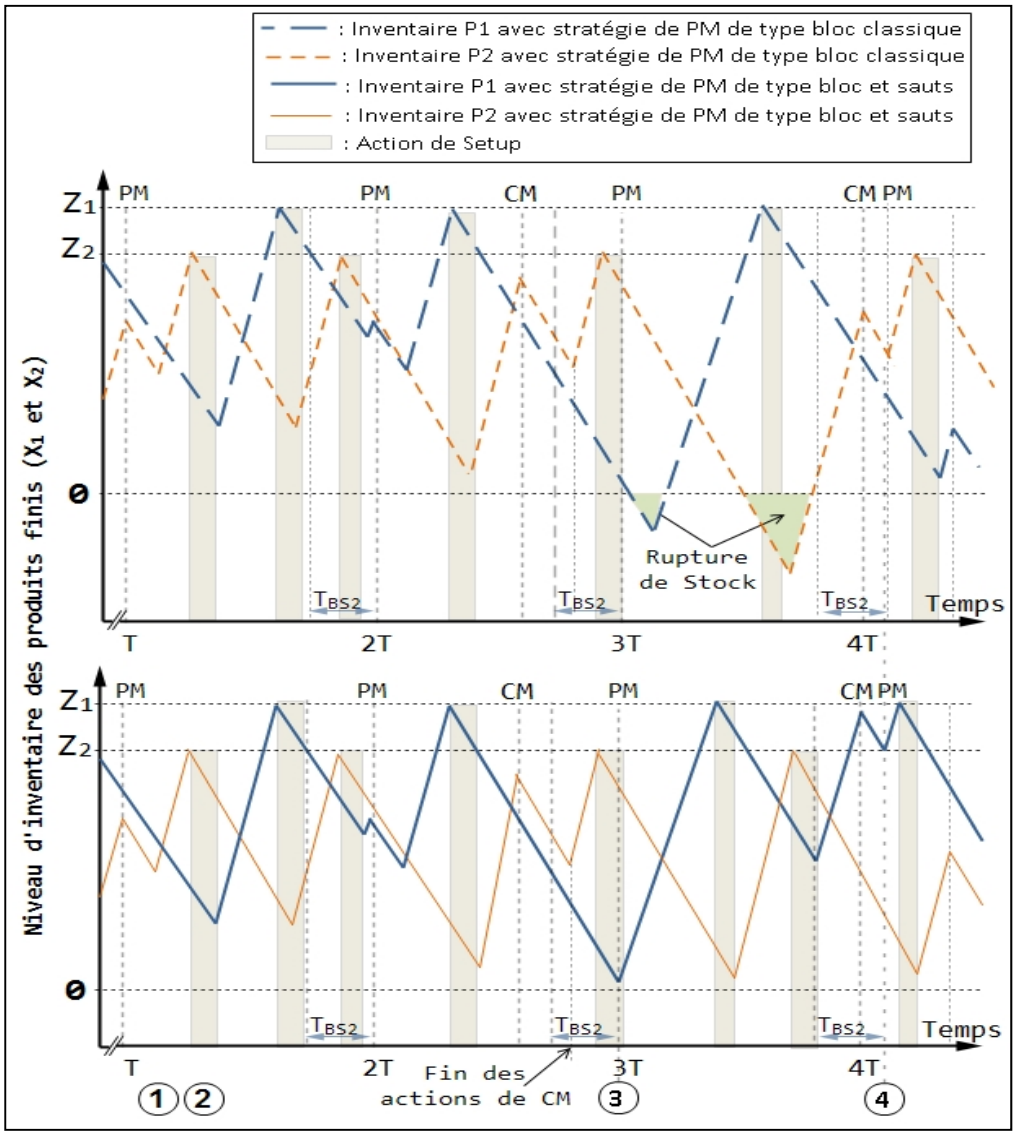


Figure 4.3 Trajectoires des inventaires sous les commandes des stratégies de PM de type bloc classique et avec sauts combinées à la politique HCP.

4.1.4 Politiques de commande avec opportunisme

Le deuxième objectif de notre travail vise à introduire le concept de la maintenance opportuniste dans les politiques de commande, pour une meilleure synchronisation entre les interventions de la maintenance préventive (PM) et l'activité de production. Ce concept de la maintenance opportuniste consiste à tirer parti de quelques arrêts du système de production lors des opérations de Setup afin d'appliquer des interventions de PM. Une nouvelle variable de décision T_O; qui dépend de l'âge de la machine, est alors considérée dans le but d'optimiser les activités de coordination des interventions préventives avec les opérations de Setup. Il est question d'établir les conditions optimales permettant d'autoriser l'avancement; dans le temps, des interventions de la PM et de les combiner avec les opérations de Setup. Le but principal de cette procédure vise à réduire la durée des arrêts et la non-disponibilité du système de production, et donc à diminuer le risque de rupture de stock. Afin d'illustrer le concept de la maintenance opportuniste développé dans ce chapitre, la figure 4.4 présente; pour un cas pratique d'une seule machine non-flexible produisant deux types de produits finis, la trajectoire des niveaux d'inventaire pour un modèle avec opportunisme et un autre sans opportunisme. Tous les deux, combinent la stratégie de PM de type bloc classique avec la stratégie de Setup HCP de paramètre Z_1 et Z_2.

La figure 4.4 montre qu'une fois le système de production est rétabli dans son mode fonctionnel ①; que ce soit après des interventions de la maintenance ou après des arrêts programmés du système, la production est reprise suivant la directive de la stratégie de Setup HCP. Ainsi, dès que le niveau d'inventaire d'une des produits finis atteint son seuil critique Z_i i $\in \{1,2\}$, une opération de Setup est exécutée pour passer à la fabrication de l'autre type de produit ②. Le rôle principal de la maintenance opportuniste consiste; comme le montre la figure 4.4, à mieux synchroniser les interventions de PM avec la planification de la production dans le but de réduire le risque de rupture de stock. Il est question de vérifier si le temps de lancement des opérations de Setup; pour un type de produits finis, se trouve dans l'intervalle $[kT - T_O;\ kT], k = 1,2,3, \ldots$. Si c'est le cas, les prochaines interventions de PM seront anticipées pour tirer profit de ces arrêts de la production ③.

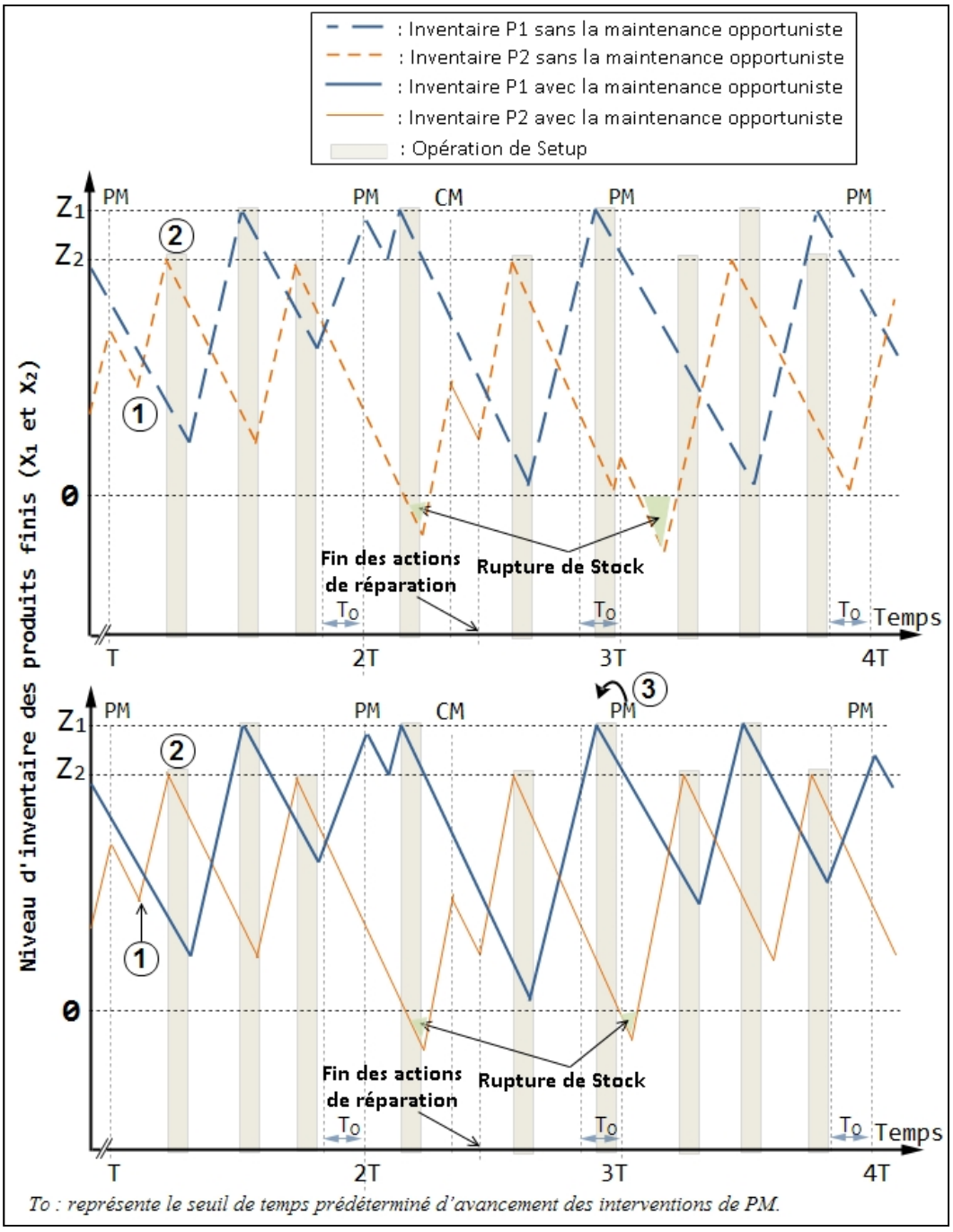


Figure 4.4 Variation des inventaires avec et sans opportunisme, intégrant la stratégie de PM de type bloc classique et la stratégie de Setup HCP.

Le tableau 4.1 présente l'abréviation des six politiques sans opportunisme considérées dans ce chapitre. Nous signalons que les politiques avec opportunisme; intégrant la notion de la

maintenance opportuniste, sont exprimées par les même abréviations que les politiques sans opportunisme en ajoutant le caractère « O » à la fin du mot.

Tableau 4.1 Abréviation des politiques de commande étudiées

	Stratégie de maintenance préventive		
	de type âge	de type bloc	de type bloc avec sauts
Politique de commande de production et de Setup classique (HCP)	HCP_A	HCP_B	HCP_BJ
Politique de commande de production et de Setup modifiée (MHCP)	MHCP_A	MHCP_B	MHCP_BJ

Nous terminons cette section par la présentation des hypothèses supportées dans ce travail :

- Toutes les interventions de maintenance; quelles soient correctives ou préventives, correspondent à des actions préventives qui restaurent le composant à un état comme neuf;

- L'activité de détection de la panne de la machine est pratiquement instantanée et les interventions de réparations sont immédiatement lancées sur la machine;

- La demande des clients et le temps des opérations de Setup nécessaire pour passer de la production d'un type de produit à un autre sont considérés constants. En conséquence, le paramètre b_i ($b_i = d_i * T_{ij}^s$; $\forall i, j \in \{1,2\}$ avec $i \neq j$) devient une variable constante;

- Les actions de maintenance et celles de Setup peuvent être exécutées simultanément dans le temps sans aucune restriction en ce qui concerne les modèles avec opportunisme, mais séparément dans le cas des modèles sans opportunisme.

Ce travail vise à proposer une structure de loi de commande sous-optimale combinant la production, le Setup et la maintenance. En intégrant le concept de la maintenance opportuniste, douze politiques de commande au total sont considérées. Ces politiques doivent

être optimisées en vue de mener une étude comparative de l'effet du des variables de coût et de temps du système sur les paramètres de commande et le coût total moyen encouru. Dans ce sens, une approche expérimentale (Gharbi et al., 2011) intégrant la simulation et des méthodes statistiques d'optimisation a été utilisée. La section suivante, présente plus en détails les étapes de l'approche adoptée.

4.2 Approche de résolution

Dans cette section, nous présentons les étapes principales de l'approche de résolution que nous avons utilisée afin de déterminer expérimentalement les paramètres de commande optimaux minimisant le coût total moyen encouru chaque politique considérée. Cette approche est basée sur le travail de Gharbi et al. (2011), elle combine l'outil de la simulation, les plans d'expérience, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Une fois les politiques de commande considérées seront optimisées, nous étudierons l'influence de différents variables du système (coût pénurie, coût de maintenance préventive ou corrective), coût de Setup, temps de maintenance et temps de Setup) sur le coût total et les paramètres de chaque politique de commande. L'évolution de ces politiques les unes par rapport aux autres sera également discutée.

- Étape 1 : Structure des politiques de commande

Comme présenté dans la section 4.1, cette étape consiste à formuler analytiquement la dynamique du système manufacturier étudié et l'expression du coût total moyen prévu qui représente le critère de comparaison de notre étude. Outre les hypothèses supportées, cette étape consiste également à identifier; en se basant sur des travaux déjà développés dans la littérature, la structure des politiques de commande étudiées ainsi que ses paramètres à optimiser.

- Étape 2 : Modélisation par Simulation

Dans cette étape, en vue de représenter la dynamique du système manufacturier, des modèles de simulation combinés continus/discrets sont développés via l'utilisation du langage SIMAN (logiciel ARENA) avec des sous-programmes du langage C++. Chaque modèle de

simulation utilise une seule politique de commande de la production, de Setup et de maintenance, comme une entrée pour conduire plusieurs d'expériences et ainsi évaluer la performance du système manufacturier. La section 4.2.1 présente plus en détails les modèles proposés.

- Étape 3 : Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse

Cette étape consiste à optimiser la variable de réponse du système (coût total) qui dépend de plusieurs variables de décision. D'abord, un plan d'expérience est utilisé pour définir la manière dont les paramètres de commande (variables indépendantes) de la politique concernée doivent être variés. Ensuite, les effets des facteurs et de leurs interactions significatifs sur le coût total encouru (variable dépendante) sont obtenus à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA). Par la suite, l'utilisation de la méthodologie de surface de réponse permettra de définir la relation entre la variable dépendante et les facteurs principaux et leurs interactions significatifs obtenus auparavant. Le modèle résultant est ensuite optimisée afin de déterminer la meilleure combinaison des paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru pour chaque politique.

4.2.1 Simulation

La conception des modèles de simulation s'est élaborée sous forme de plusieurs réseaux en interactions entre eux, dont chacun remplie une mission spécifique (activités de production, événements de pannes, interventions de réparations, interventions de la maintenance préventive, opérations de Setup, etc.). Ainsi, le modèle de simulation pourra imiter fidèlement le comportement du système de production sous les conditions réelles d'opération. En total, douze (12) modèles de simulation combinés par événements continus/discrets sont développés en utilisant le langage de simulation SIMAN avec des sous-programmes écrits en langage C++ (Pegden et al., 1995). La partie continue est consacrée essentiellement au calcul du niveau instantané des inventaires de produits finis, tandis que la partie discrète modélise la planification de la production, du Setup, de la maintenance préventive, de l'occurrence des pannes, les actions de réparations et les directives de la maintenance opportuniste si adoptée, etc.. En ce qui concerne le choix de

cette approche, il repose principalement sur la continuité des flux de production, la nature impulsive de la dynamique du système manufacturier, mais également sur sa capacité à raccourcir beaucoup le temps d'exécution par rapport aux modèles purement discrets (Lavoie et al., 2007). Étant commandés par les politiques de commande définies dans le tableau 4.1, les programmes conçus sont ensuite exécutés par le logiciel de simulation ARENA afin d'évaluer la performance du système manufacturier. L'avantage de ces modèles de simulation se résume dans leur capacité à limiter les hypothèses simplificatrices nécessaires à la résolution analytique et à reproduire fidèlement le comportement du système de production sous les conditions réelles d'opération. La figure 4.5 représente le schéma-bloc des modèles de simulation développés.

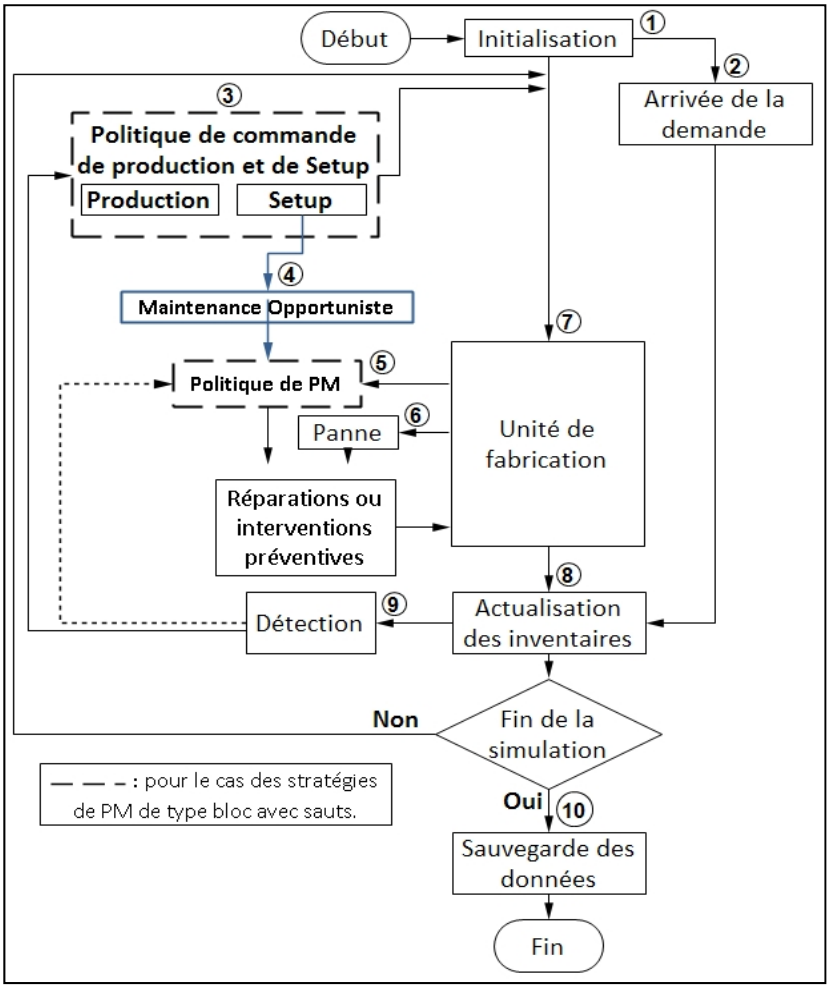


Figure 4.5 Schéma-bloc des modèles de simulation

La structure des modèles de simulation; comme le montre la figure 4.5, comporte plusieurs réseaux en interactions entre eux, et dont chacun remplie une mission spécifique (planification de la production, événements de pannes et de réparations, arrivée de la demande, etc.). La modélisation de notre système manufacturier consiste en dix étapes :

- Bloc ① : Initialisation

Il permet d'initialiser les variables du modèle (taux de production, taux de demande, la capacité de la machine, etc.) ainsi que les paramètres minimaux et maximaux d'avancement dans temps pour l'intégration des variables cumulatives et les erreurs permises. Nous considérons aussi dans cette étape la durée de simulation et la fin de la période Warm-Up, à partir du quelle les données statistiques sont collectées.

- Bloc ② : Arrivée de la demande

Il affecte directement le niveau d'inventaire des deux types de produits finis à chaque instant. En effet, nous nous servons des contrôles effectués de façon continue afin de déterminer s'il s'agit d'une rupture de stock ou pas. Nous signalons que les taux de la demande clientèle sont utilisés comme une entrée dans les équations différentielles des inventaires.

- Bloc ③ : Politique de commande de production et de Setup

Il permet d'appliquer la loi de commande de la politique de production et de Setup considérée (section 4.1.2). Ainsi, le choix du type de produit à fabriquer et les taux de production sont déterminées en fonction du niveau des inventaires (voir bloc *Détection* ⑨).

- Bloc ④ : Maintenance Opportuniste

Il fonctionne seulement pour les modèles intégrant la notion de la maintenance opportuniste. Ainsi, si le temps de lancement d'une opération de Setup se trouve proche de l'instant programmé pour les actions de PM ($\tau_i \in [T_{PM}\text{-}T_O; T_{PM}]$ Avec τ_i est l'instant pendant lequel le système débute l'action de Setup d'ordre i), alors la prochaine intervention de PM sera anticipée et synchronisée avec l'opération de Setup pour tirer profit de cet arrêt de la production et réduire le risque de rupture de stocks.

- Bloc ⑤ : Politique de PM

Il définit le temps des interventions de la maintenance préventive, et décide de l'application des interventions de PM selon la structure de la stratégie de PM adoptée (voir section 4.1.3). En ce qui concerne la stratégie de PM avec sauts, le modèle peut annuler une intervention de PM si seulement l'âge de la machine depuis la dernière action de maintenance soit inférieur au seuil de temps T_{BS2}.

- Bloc ⑥ : Pannes

Il définit les temps de pannes et les temps de réparations de la machine. Les modèles de simulation sont développés de telle façon à admettre toute les distributions de probabilité possible (~Panne et ~Réparation).

- Bloc ⑦ : Unité de fabrication

Il représente l'activité de la machine de fabrication en fonction des commandes de la politique adoptée (section 4.1). Notons qu'à chaque instant, l'état de disponibilité de la machine est utilisé pour déterminer le taux de production exprimé sous forme d'équation d'état dans le langage C++. Les produits finis représentent la sortie de ce bloc.

- Bloc ⑧ : Actualisation des inventaires

Il agit sur le niveau des inventaires des produits finis à chaque instant. Effectivement, la variation des inventaires dépend des taux de production de la machine et de la demande clientèle. Lorsqu'un type de produit n'est pas en rupture de stock, sa production augmente son niveau d'inventaire, mais dans le cas contraire, elle se contente de satisfaire sa demande en arriérage en diminuant la rupture de stock.

- Bloc ⑨ : Détection

Il contrôle de façon continue les inventaires des deux types de produits finis et envoie des signaux à chaque déclenchement d'un franchissement des seuils au bloc politique de

commande. Ces derniers se composent; en plus des paramètres (b_1, b_2), des valeurs optimale des seuils critiques (Z_1, Z_2) et des bornes du Corridor (a_1, a_2).

- Bloc ⑩ : Sauvegarde des données

Il se met en marche juste avant la fin de la simulation et permet d'enregistrer toutes les informations nécessaires pour calculer la valeur du coût total encouru (4.3).

4.2.2 Validation des modèles de simulation

Afin de valider le modèle de simulation équivalent, une représentation graphique de la variation de la somme des inventaires instantanés des deux types de produits finis pour la politique HCP_AO a été générée (voir figure 4.6). Cette politique utilise la stratégie de PM de type âge et celle de production et de Setup classique (HCP).

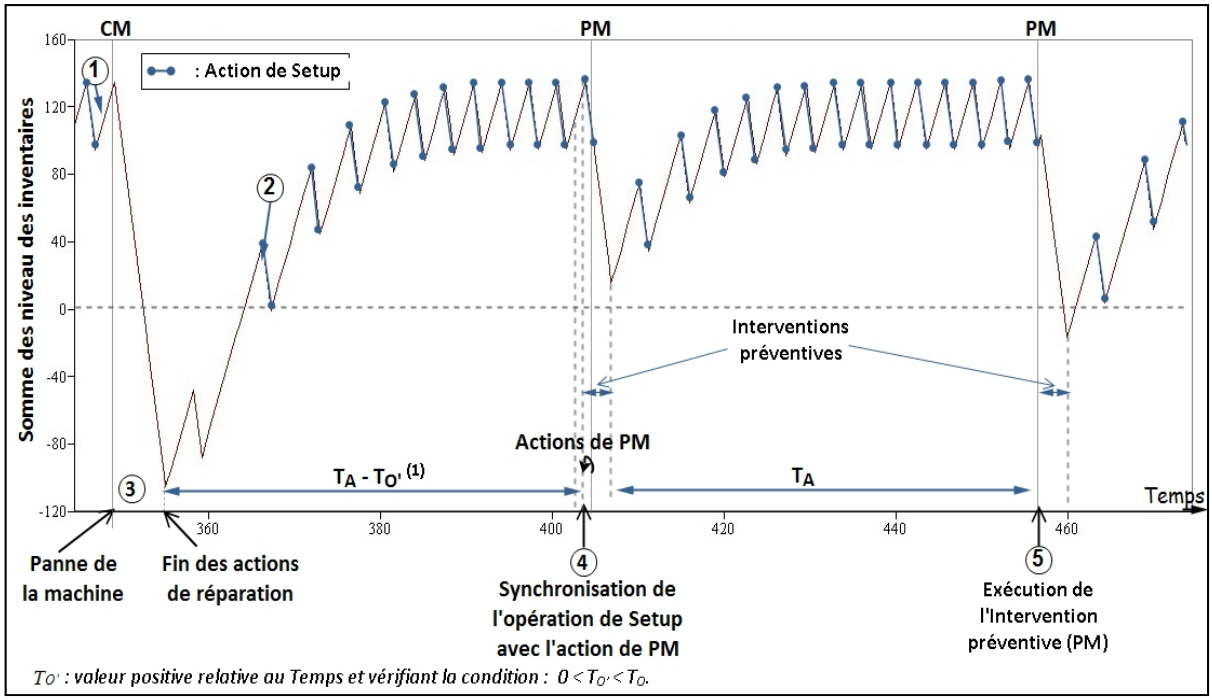


Figure 4.6 Variation de la somme des inventaires des deux produits finis pour Z_1=Z_2=100, $T_A = 50$ et T_O=1,25 sous les commande de la politique HCP_AO

Pour fin de simplification, la courbe étudiée illustre la variation de la somme des inventaires des deux types de produits finis ($x_1(t) + x_2(t)$). Ainsi, nous pouvons mieux observer les phénomènes liés à la maintenance. La simulation du système est réalisée pour T_A=50, T_O=1,25 et Z_1=Z_2=100. Quand la machine est entrain de restaurer le stock tampon d'un des produits finis, le niveau d'inventaire de l'autre produit diminue en satisfaisant sa demande clientèle, mais la somme des deux inventaires augmente au taux $U_i^{max} - d_j, i, j \in \{1,2\}^2$ et $i \neq j$ ①. Notons également que durant les opérations de Setup, la somme des inventaires diminue au taux $d_1 + d_2$ ②. D'après la figure 4.6, si la machine tombe en panne avant d'atteindre l'âge T_A, alors des actions correctives (CM) sont accomplies ③. Toutefois, la machine subie des interventions préventives dès celle-ci atteint l'âge T_A ⑤. De plus, en raison de réduire le risque de pénurie, les interventions préventives peuvent être avancées dans le temps afin de les combinées avec les opérations de Setup ④, à condition que le temps de lancement de celles-ci appartient à l'intervalle $[T_A - T_O;\ T_A]$, avec T_O : Seuil de temps prédéterminé d'avancement des interventions de PM.

La section suivante présente les résultats de nos expérimentations et la procédure d'optimisation des paramètres de commande des politiques considérées qui minimisent le coût total encouru. Une étude comparative entre les différentes politiques de commande traitées dans ce travail est présentée dans une section plus loin.

4.2.3 Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse

Dans cette section, nous recueillons les données fournies par les modèles de simulation pour les traitées par la suite via des méthodes mathématiques statistiques, dans le but d'optimiser les paramètres de commande et le coût total encouru des différentes politiques étudiées. Ainsi, les objectifs de la démarche d'optimisation consistent à : 1) obtenir la relation entre d'une part les variables dépendante du système (i.e. Coût total) et d'autre part, ses facteurs d'entrée (les paramètres de commande de la politique étudiée) ainsi que leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie, et 2) calculer les valeurs optimales des paramètres de la politique (facteurs d'entrée) qui minimisent le coût total moyen encouru. Un exemple

numérique est considéré afin d'illustrer l'approche expérimentale combinant la simulation, les plans d'expérience, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Notons que pareil dans les deuxième et troisième chapitres, les deux types de produits finis sont supposés identiques impliquant ainsi que : $c_1^+ = c_2^+ = c^+$, $c_1^- = c_2^- = c^-$, $c_{12}^s = c_{21}^s = c_s$, $T_{12}^s = T_{21}^s = T^S$, $N_{12}^s = N_{21}^s = N_s$, $U_1^{max} = U_2^{max} = U_{max}$, $d_1 = d_2 = d$. En conséquence, la valeur des seuils critiques et les seuils de Corridor (bornes du Corridor) est équivalente pour les deux types de produits finis ($Z_1 = Z_2 = Z_{inv}$, $a_1 = a_2 = a$ et $b_1 = b_2 = b$). D'autre part, les paramètres b_1 et b_2 sont utilisés pour représenter la durée juste nécessaire pour passer de la fabrication d'un type de produits à un autre avant de tomber en pénurie, ils dépendent du taux de la demande ($d_i, i \in \{1,2\}$) et de la durée de Setup ($T_{ij}^s, i, j \in \{1,2\},\ i \neq j$) qu'on peut calculer à partir de $b_i = d_i * T_{ij}^s,\ \forall i, j \in \{1,2\}^2$ et $i \neq j$. Par conséquent, la valeur des paramètres $b_1\ et\ b_2$ est constante puisque le taux de la demande et les temps des opérations de Setup sont fixes (voir les hypothèses adoptées dans la fin de la section 4.1.4).

Dans le but d'assurer que les conditions suivantes sont toujours vérifiées : $a < Z_{inv}$, $T_{BS2} < T_{BS1}$ et $T_O < T_i$, avec $i \in \{A, B, BS1\}$ conformément à la stratégie de maintenance préventive utilisée, trois nouvelles variables $\alpha, \beta_S\ et\ \beta_O$ sont considérés dans cette étude. Ces variables remplacent respectivement les paramètres de commande $a, T_{BS2}\ et\ T_O$ dans les plans d'expérience et se définissent par l'ensemble d'équations (4.14).

$$\begin{cases} a = \alpha * Z_{inv} \\ T_{BS2} = \beta_S * T_{BS1} \\ T_O = \beta_O * T_i, i \in \{A, B, BS1\} \text{ selon la stratégie de PM utilisée} \end{cases} \qquad \alpha, \beta_S, \beta_O \in [0,1] \quad (4.14)$$

Il est intéressant de remarquer que la politique de commande HCP_B (MHCP_B) est un cas particulier de la politique HCP_BJ (MHCP_BJ) dans lequel $T_{BS2} = 0$. Le tableau 4.2 présente les paramètres de données du système.

Tableau 4.2 Paramètres de simulation

Paramètres	c^+	c^-	c_s	c_{cm}	c_{pm}	T^S	U_{max}	d	$T_p{}^{(1)}$	$T_{acm}{}^{(1)}$	$T_{apm}{}^{(1)}$
Valeurs	0,1	2	50	6000	2000	1	58	20	Log-N (100;50)	Log-N (10;1)	Log-N (5;0,5)

(1) *T_s, T_{acm} et T_{apm} indiquent les distributions de probabilité du temps avant la pannes et les durées des actions de CM et PM respectivement*.

Pour chaque politique de commande combiné de production, de Setup et de maintenance, nous considérons une seule variable dépendante (coût total moyen encouru) et deux, trois, quatre ou cinq variable indépendantes selon la politique de commande adoptée : (T_A, Z_{inv}) pour HCP_A, (T_A, Z_{inv}, a) pour MHCP_A, (T_B, Z_{inv}) pour HCP_B, (T_B, Z_{inv}, a) pour MHCP_B, ($T_{BS1}, Z_{inv}, T_{BS2}$) pour HCP_BJ et ($T_{BS1}, Z_{inv}, a, T_{BS2}$) pour MHCP_BJ. Rappelons que le paramètre de commande T_O est également étudié chaque fois que la maintenance opportuniste est utilisée. En se basant sur les travaux de Gharbi et al. (2006) et de Berthaut et al. (2011), nous supposons que la fonction valeur (4.5) est convexe et nous adoptons les plans factoriels complets 3^2 (2 facteurs ayant chacun 3 modalités) pour les politiques de commande HCP_A et HCP_B, 3^3 pour les politiques MHCP_A, MHCP_B, HCP_BJ, HCP_AO et HCP_BO, et le plan de Box-Behnken pour les politiques à quatre facteurs (MHCP_BJ, MHCP_AO, MHCP_BO et HCP_BJO) ainsi que celle disposant de cinq facteurs (MHCP_BJO). De plus, cinq réplications ont été effectuées pour chaque combinaison de facteurs, impliquant l'exécution de 45 ($3^2 * 5$) simulations les politiques de commande de deux facteurs, 135 ($3^3 * 5$) pour celles de trois facteurs, 135 aussi pour celles ayant quatre facteurs utilisant le plan Box-Behnken, et finalement 230 simulations pour la politique à cinq facteurs : MHCP_BJO. A propos de la durée de simulation des politiques de commande, elle est égale à $T_\infty = 500.000$ unités de temps afin d'assurer l'atteinte du régime permanent. Plusieurs expériences de simulation préliminaires ont été effectuées afin de sélectionner les plages du domaine expérimental en fonction des paramètres et des distributions utilisées lors des simulations. Ces dernières sont présentées dans les tableaux 4.3 et 4.4.

Tableau 4.3 Niveaux des variables indépendantes pour les politiques sans opportunisme

Politique de commande	Facteur	Niveau inférieur	Centre	Niveau supérieur
HCP_A	T_A	38	51	64
	Z_{inv}	176	215	254
HCP_B	T_B	37	50,5	64
	Z_{inv}	180	226	272
MHCP_A	T_A	40	55	70
	Z_{inv}	240	282	320
	α	0,3	0,58	0,86
MHCP_B	T_B	38	52	66
	Z_{inv}	192	244	290
	α	0,39	0,63	0,87
HCP_BJ	T_{BS1}	41	54	67
	Z_{inv}	156	189	222
	β_S	0,08	0,46	0,84
MHCP_BJ	T_{BS1}	45	58	71
	Z_{inv}	208	276	344
	α	0,35	0,61	0,87
	β_S	0,07	0,455	0,84

En utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics, une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) est effectuée sur les données de la simulation, afin d'obtenir et de comprendre les effets des variables indépendantes (la période des actions préventives ($T_A, T_B \; ou \; T_{BS1}$), le niveau d'inventaire (Z_{inv}), la borne du Corridor (α) et les seuils de temps $\beta_S \; et \; \beta_O$ permettant le saut et l'avancement des interventions de PM respectivement) sur le coût total encouru. Les effets quantifiés des principaux facteurs, les interactions et les effets quadratiques, ainsi que la valeur R^2 ajustée (les coefficients de corrélation ajustée) pour chaque politique de commande considérée. Les effets quantifiés des principaux facteurs, les interactions et les effets quadratiques, ainsi que la valeur des coefficients de corrélation ajustée (R^2) sont calculés pour chaque politique de commande. La figure 4.7 présente les résultats de l'analyse de variance pour les deux politiques de commande MCHP_BJ et MCHP_BJO.

Tableau 4.4 Niveaux des variables indépendantes pour les politiques avec opportunisme

Politique de commande	Facteur	Niveau inférieur	Centre	Niveau supérieur
HCP_AO	T_A	35	49	63
	Z_{inv}	140	185	230
	β_O	0,0	0,04	0,08
HCP_BO	T_B	35	49	63
	Z_{inv}	140	185	230
	β_O	0,0	0,035	0,07
MHCP_AO	T_A	38	52	66
	Z_{inv}	200	260	320
	α	0,34	0,61	0,88
	β_O	0,0	0,04	0,08
MHCP_BO	T_B	38	52	66
	Z_{inv}	200	260	320
	α	0,34	0,61	0,88
	β_O	0,0	0,04	0,08
HCP_BJO	T_{BS1}	41	54	67
	Z_{inv}	156	189	222
	β_S	0,08	0,46	0,84
	β_O	0,0	0,04	0,08
MHCP_BJO	T_{BS1}	38	52	66
	Z_{inv}	200	260	320
	α	0,34	0,61	0,88
	β_S	0,12	0,48	0,84
	β_O	0,0	0,04	0,08

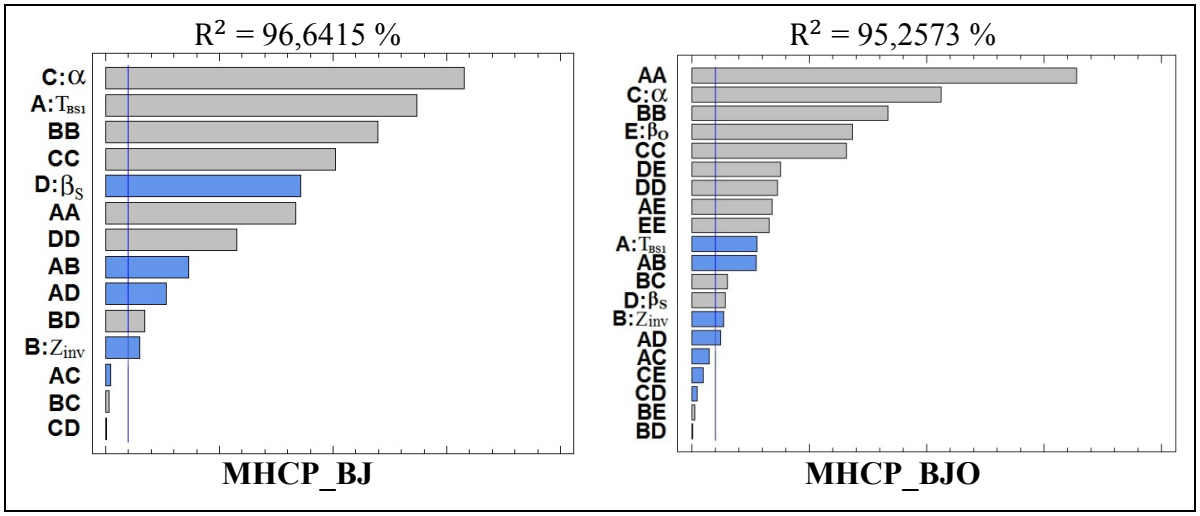


Figure 4.7 Diagramme de Pareto pour les politiques MCHP_BJ et MCHP_BJO

D'après la figure 4.7, la variabilité du modèle de simulation (les coefficients de corrélation ajustée) pour les deux politiques de commande MHCP_BJ et MHCP_BJO expliquent plus de 95 % de la variabilité du coût total correspondant. Cette figure montre également qu'à l'exception des interactions des facteurs $T_{BS1}.\alpha, Z_{inv}.\alpha$ et $\alpha.\beta_S$ pour la politique MHCP_BJ et les interactions $T_{BS1}.\alpha$, $Z_{inv}.\beta_S$, $Z_{inv}.\beta_O$, $\alpha.\beta_S$ et $\alpha.\beta_O$ pour la politique MHCP_BJO, tous les principaux facteurs ($T_{BS1}, Z_{inv}, \alpha, \beta_S$ et β_O), leurs interactions et les effets quadratiques ($T_{BS1}^2, Z_{inv}^2, \alpha^2, \beta_S^2$ et β_O^2) sont significatifs à un niveau de signification de 95 %. Notons que le troisième ordre des interactions et tous les autres effets sont négligés ou ajouté à l'erreur. Les résultats de l'analyse de la variance pour les autres politiques de variance aboutissent aux mêmes conclusions, avec des valeurs du R^2 ajusté qui sont beaucoup plus importantes qui atteint par exemple 98,679 % pour la politique HCP_A.

Le logiciel Statgraphics nous a permis également d'effectuer d'autres analyse statistiques comme le calcul des coefficients de régression, la génération des surfaces de réponse, et l'analyse des résidus qui nous a permis de vérifier la conformité de nos modèles. La méthodologie de surface de réponse est réalisée dans le but d'optimiser le coût total moyen encouru (variable dépendante) en fonction des variables significatives. Les équations (4.15) – (4.26) représentent la fonction de surface de réponse de la réponse (coût total encouru) du système calculées par Statgraphics, pour les différentes politiques de commande étudiées.

Le tableau 4.5 résume les résultats obtenus suite à l'optimisation des paramètres des politiques de commande minimisant le coût total moyen encouru. Nous remarquons que pour les paramètres de coût apposés au système (tableau 4.2), la politique de commande MHCP_BJ est meilleure que les autres politiques sans opportunisme puisqu'elle engendre le coût le plus faible. Ce résultat met en évidence l'avantage de combiner la stratégie de Setup modifiée avec la possibilité d'application des sauts des actions de la maintenance préventive, lorsque l'âge de la machine depuis la dernière action de maintenance est inférieur à un seuil de temps T_{BS2} ($\hat{A}ge_Machine(t) \leq T_{BS2}$). Nous rappelons que l'objectif de cette combinaison consiste à éviter les opérations inutiles de Setup, et à réduire le risque de rupture de stock et le gaspillage des composants relativement nouveaux, lorsque des actions de CM et PM sont

consécutives dans le temps. Plus encore, les résultats du tableau 4.5 démontrent que l'introduction de la notion de la maintenance opportuniste donne de meilleurs résultats en termes de coût pour toutes les politiques de commande étudiées, démontrant ainsi l'importance de synchroniser la planification de la maintenance préventive avec les opérations de Setup.

Tableau 4.5 Résultats d'optimisation des politiques de commande

	Modèle	$T_i^{*(1)}$	Z_{inv}^*	a^*	T_{BS2}^*	T_O^*	**Coût Total**	**I.C. à 95 %**
Politiques sans opportunisme	HCP_A	43,55	196,87	-	-	-	**89,57**	[89,46 ; 89,81]
	HCP_B	44,48	202,32	-	-	-	**92,78**	[92,39 ; 92,84]
	HCP_BJ	48,95	200,61	-	26,86	-	**88,81**	[88,62 ; 88,96]
	MHCP_A	48,73	266,79	117,39	-	-	**85,23**	[84,93 ; 85,42]
	MHCP_B	48,44	267,76	140,89	-	-	**88,70**	[88,54 ; 89,18]
	MHCP_BJ	51,39	267,36	126,36	30,24	-	**84,70**	[84,45 ; 84,82]
Politiques avec opportunisme	HCP_AO	46,82	195,14	-	-	1,13	**88,48**	[88,31 ; 88,72]
	HCP_BO	46,58	201,99	-	-	0,76	**91,26**	[91,18 ; 91,83]
	HCP_BJO	50,36	194,77	-	25,61	0,62	**87,59**	[87,43 ; 87,91]
	MHCP_AO	49,28	269,55	139,58	-	1,32	**84,62**	[84,45 ; 84,90]
	MHCP_BO	48,67	278,81	144,89	-	1,55	**87,04**	[86,95 ; 87,52]
	MHCP_BJO	55,58	275,52	120,04	39,83	0	**83,94**	[83,87 ; 84,41]

(1) $i \in \{A, B, BS1\}$ *selon la structure de la stratégie de maintenance préventive utilisée*

Afin de valider les résultats obtenus, d'autres analyses sont effectuées où nous avons considéré les paramètres de commande optimaux de chaque politique comme entrée pour conduire des expériences de simulation. $n = 20$ réplications ont été adoptées. Nous confirmons que la valeur du coût optimal pour chaque politique de commande (tableau 4.5) appartient bien à l'intervalle de confiance I.C. à 95 % ($\overline{C.T.} \pm t_{1-(\alpha/2)}^{n-1}\sqrt{S^2/n}$) équivalent (voir la section 1.3.3 du premier chapitre).

Les fonctions de surface de réponse des politiques sans opportunisme sont présentées comme suit :

$$C_{HCP_A} = 155{,}625 - 0{,}611789 \cdot T_A - 0{,}535692 \cdot Z_{inv} - 2{,}43787 \cdot 10^{-3} \cdot T_A \cdot Z_{inv} + 1{,}25345{*}10^{-2} \cdot T_A^{\,2} + 1{,}63007 \cdot 10^{-3} \cdot Z_{inv}^2 \quad (4.15)$$

$$C_{HCP_B} = 172{,}269 - 1{,}59766 \cdot T_B - 0{,}434534 \cdot Z_{inv} - 3{,}69485 \cdot 10^{-3} \cdot T_B \cdot Z_{inv} + 2{,}63631 \cdot 10^{-2} \cdot T_B^{\,2} + 1{,}47999 \cdot 10^{-3} \cdot Z_{inv}^2 \quad (4.16)$$

$$C_{HCP_BJ} = 201{,}909 - 1{,}2935 \cdot T_{BS1} - 0{,}798129 \cdot Z_{inv} - 5{,}01217 \cdot \beta_S - 2{,}21445 \cdot 10^{-3} \cdot T_{BS1} \cdot Z_{inv} - 0{,}248 \cdot T_{BS1} \cdot \beta_S + 2{,}41 \cdot 10^{-2} \cdot Z_{inv} \cdot \beta_S + 1{,}9146.10^{-2} \cdot T_{BS1}^2 + 2{,}22.10^{-3} \cdot Z_{inv}^2 + 11{,}25 \cdot \beta_S^2 \quad (4.17)$$

$$C_{MHCP_A} = 178{,}899 - 0{,}771721 \cdot T_A - 0{,}523683 \cdot Z_{inv} - 22{,}7657 \cdot \alpha - 1{,}76429.10^{-3} \cdot T_A \cdot Z_{inv} + 5.10^{-3} \cdot T_A \cdot \alpha - 2{,}83163.10^{-2} \cdot Z_{inv} \cdot \alpha + 1{,}27233.10^{-2} \cdot T_A^{\,2} + 1{,}16596.10^{-3} \cdot Z_{inv}^2 + 34{,}174 \quad (4.18)$$

$$C_{MHCP_B} = 254{,}648 - 2{,}81169 \cdot T_B - 0{,}597547 \cdot Z_{inv} - 67{,}838 \cdot \alpha - 2{,}00259.10^{-3} \cdot T_B \cdot Z_{inv} + 7{,}718.10^{-2} \cdot T_B \cdot \alpha + 5{,}05.10^{-2} \cdot Z_{inv} \cdot \alpha + 3{,}41.10^{-2} \cdot T_B^2 + 1{,}24_.10^{-3} \cdot Z_{inv}^2 + 48{,}059 \cdot \alpha^2 \quad (4.19)$$

$$C_{MHCP_BJ} = 165{,}298 - 0{,}949349 \cdot T_{BS1} - 0{,}336511 \cdot Z_{inv} - 37{,}86 \cdot \alpha - 7{,}703 \cdot \beta_S - 1{,}355.10^{-3} \cdot T_{BS1} \cdot Z_{inv} - 2{,}58876.10^{-2} \cdot T_{BS1} \cdot \alpha - 0{,}216683 \cdot T_{BS1} \cdot \beta_S - 3{,}931.10^{-3} \cdot Z_{inv} \cdot \alpha + 2{,}17532.10^{-2} \cdot Z_{inv} \cdot \beta_S - 0{,}164835 \cdot \alpha \cdot \beta_S + 141208.10^{-2} \cdot T_{BS1}^2 + 7{,}39169.10^{-4} \cdot Z_{inv}^2 + 42{,}6763 \cdot \alpha^2 + 11{,}1345 \cdot \beta_S^2 \quad (4.20)$$

Les fonctions de surface de réponse des politiques avec opportunisme sont :

$$C_{HCP_AO} = 203{,}016 - 1{,}56779\,.\,T_A - 0{,}767019.Z_{inv} - 250{,}088\,.\,\beta_O - 2{,}09048.10^{-3}.T_A.Z_{inv} + 2{,}151.T_A.\beta_O + 0{,}610.Z_{inv}.\beta_O + 2054.10^{-2}.T_A{}^2 + 2{,}1786.10^{-3}.Z_{inv}^2 + 629{,}167.\beta_O^2 \quad (4.21)$$

$$C_{HCP_BO} = 252{,}282 - 3{,}10422.T_B - 0{,}854311.Z_{inv} - 299{,}359.\beta_O - 2{,}38016.10^{-3}.T_B.Z_{inv} + 2{,}532.T_B.\beta_O + 0{,}8157.Z_{inv}.\beta_O + 3{,}803.10^{-2}.T_B{}^2 + 2{,}356.10^{-3}.Z_{inv}^2 + 510{,}20.\beta_O^2 \quad (4.22)$$

$$C_{HCP_BJO} = 191{,}589 - 1{,}903.T_{BS1} - 0{,}555.Z_{inv} + 0{,}709\,.\beta_S - 345{,}44.\beta_O - 4{,}18.10^{-3}.T_{BS1}.Z_{inv} - 0{,}310178.T_{BS1}.\beta_S + 4{,}82137.T_{BS1}.\beta_O - 8{,}24916.10^{-3}.Z_{inv}.\beta_S + 8{,}345.10^{-2}.Z_{inv}.\beta_O + 104{,}17.\beta_S.\beta_O + 2{,}796.10^{-2}.T_{BS1}^2 + 1{,}975.10^{-3}.Z_{inv}^2 + 14{,}9736.\beta_S^2 + 134{,}05.\beta_O^2 \quad (4.23)$$

$$C_{MHCP_AO} = 183{,}766 - 1{,}21115.T_A - 0{,}394814.Z_{inv} - 59{,}4526\,.\alpha - 52{,}27.\beta_O - 1778.10^{-3}.T_A.Z_{inv} + 4{,}62228.10^{-2}.T_A.\alpha + 1{,}28902.T_A.\beta_O + 4{,}62563.10^{-2}.Z_{inv}.\alpha - 0{,}100116.Z_{inv}.\beta_O - 20{,}9791.\alpha.\beta_O + 1{,}65643.10^{-2}.T_A^2 + 8{,}55384.10^{-4}.Z_{inv}^2 + 43{,}712.\alpha^2 + 497{,}299.\beta_O^2 \quad (4.24)$$

$$C_{MHCP_BO} = 248{,}757 - 2{,}79189.T_B - 0{,}516794.Z_{inv} - 74{,}6176\,.\alpha - 146{,}601.\beta_O - 2{,}38604.10^{-3}.T_B.Z_{inv} + 0{,}124824.T_B.\alpha + 2{,}02698.T_B.\beta_O + 6{,}45645.10^{-2}.Z_{inv}.\alpha - 3{,}74537.10^{-2}.Z_{inv}.\beta_O + 8{,}97634.\alpha.\beta_O + 3{,}4185.10^{-2}.T_B^2 + 1{,}07699.10^{-3}.Z_{inv}^2 + 48{,}3559.\alpha^2 + 842{,}523.\beta_O^2 \quad (4.25)$$

$$C_{MHCP_BJO} = 208{,}426 - 2{,}47744.T_{BS1} - 0{,}346617.Z_{inv} - 30{,}7658.\alpha - 5{,}29491\,.\beta_S - 220{,}808.\beta_O - 1{,}58036.10^{-3}.T_{BS1}.Z_{inv} - 0{,}122354.T_{BS1}.\alpha - 0{,}130456.T_{BS1}.\beta_S + 2{,}95536.T_{BS1}.\beta_O + 4{,}5679.10^{-2}.Z_{inv}.\alpha - 1{,}04167.10^{-3}.Z_{inv}.\beta_S + 239583.10^{-2}.Z_{inv}.\beta_O - 1{,}10597.\alpha.\beta_S - 21{,}2963.\alpha.\beta_O + 127{,}431.\beta_S.\beta_O + 2{,}74915.10^{-2}.T_{BS1}^2 + 7{,}64352.10^{-3}.Z_{inv}^2 + 29{,}6639 + 9{,}2464.\beta_S^2 + 679{,}167.\beta_O^2 \quad (4.26)$$

4.3 Analyse des politiques de commande sans opportunisme

4.3.1 Analyse de sensibilité générale

Une analyse de sensibilité des politiques de commande est effectuée afin de comparer les coûts encourus et de valider le comportement des politiques de commande quand les paramètres du coût varient. Le tableau 4.6 résume les combinaisons des paramètres de coût considérés dans l'analyse de sensibilité. Ces combinaisons sont toutes dérivées du scénario de base. Les résultats sont présentés dans les tableaux 4.7 et 4.8 et résument la réaction des paramètres optimaux et du coût total encouru des politiques de commande face à la variation des paramètres de coût du système. Le tableau 4.7 contient les résultats concernant les politiques de commande fonctionnant avec une stratégie de Setup classique (HCP), tandis que le tableau 4.8 comporte les politiques avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP).

Tableau 4.6 Combinaison des paramètres de coût pour l'analyse de sensibilité

Scénario	c^+	c^-	c_s	c_{pm}	c_{cm}
Base	**0,1**	2	50	2000	6000
1	**0,08**	2	50	2000	6000
2	**0,12**	2	50	2000	6000
3	0,1	**1,8**	50	2000	6000
4	0,1	**2,2**	50	2000	6000
5	0,1	2	**40**	2000	6000
6	0,1	2	**60**	2000	6000
7	0,1	2	50	**1900**	6000
8	0,1	2	50	**2100**	6000
9	0,1	2	50	2000	**5000**
10	0,1	2	50	2000	**7000**

Les résultats de l'analyse de sensibilité présentés dans les tableaux 4.7 et 4.8 montrent que l'approche proposée dans ce chapitre est robuste, et que les paramètres optimaux de toutes les politiques de commande évoluent dans le même sens en fonction de la variation des paramètres de coût, à l'exception du paramètre de coût de Setup dont l'effet varie dépendamment de la structure de la stratégie de Setup adoptée (HCP ou MHCP).

Tableau 4.7 Analyse de sensibilité pour les politiques sans opportunisme et une stratégie de Setup classique (HCP)

Cas	$T_i^{*(1)}$			Z_{inv}^*			T_{BS2}^*	Coût total (C^*)			Remarque
	HCP_B	HCP_A	HCP_BJ	HCP_B	HCP_A	HCP_BJ	HCP_BJ	HCP_B	HCP_A	HCP_BJ	
Base	**44,48**	**43,55**	**48,95**	**202,32**	**196,87**	**200,61**	**26,86**	**92,78**	**89,57**	**88,81**	**Cas de base**
1	45,83	45,32	49,81	216,98	209,99	209,70	27,38	87,43	84,36	83,52	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	43,03	41,67	48,03	187,77	183,92	191,71	26,29	97,55	94,26	93,74	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	44,90	44,11	49,51	195,71	190,87	196,12	27,72	91,87	88,71	88,09	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
4	44,08	43,02	48,41	207,70	201,84	204,32	26,06	93,56	90,31	89,44	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
5	44,89	44,21	49,39	202,82	197,37	200,83	27,37	90,86	87,56	86,79	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
6	44,05	42,88	48,48	201,79	196,38	200,43	26,31	94,69	91,56	90,82	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
7	43,26	41,22	47,36	200,81	195,13	199,95	25,04	90,56	87,57	86,89	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \downarrow$
8	45,61	45,67	50,42	203,72	198,47	201,26	28,61	94,93	91,45	90,65	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \uparrow$
9	46,27	48,06	52,16	204,59	200,25	201,98	30,93	91,72	87,97	87,14	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
10	42,81	39,30	46,02	200,23	193,74	199,39	23,47	93,70	90,72	90,16	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$

Tableau 4.8 Analyse de sensibilité pour les politiques sans opportunisme et une stratégie de Setup modifiée (MHCP)

Cas	$T_i^{*(1)}$			Z_{inv}^*			α^*			T_{BS2}^*	Coût total (C^*)			Remarque
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(c)	(a)	(b)	(c)	
Base	**48,4**	**48,7**	**51,4**	**267,8**	**266,8**	**267,4**	**140,9**	**117,4**	**126,4**	**30,2**	**88,70**	**85,23**	**84,70**	**Cas de base**
1	48,8	50,0	52,2	278,9	279,5	285,7	145,6	126,6	137,0	30,1	83,28	79,76	79,09	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	48,0	47,2	50,4	256,7	252,4	247,9	135,8	106,7	115,1	30,3	93,82	90,28	89,80	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	48,9	49,2	52,2	263,1	261,2	259,3	138,9	113,5	122,1	31,6	87,63	84,30	83,87	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
4	48,0	48,3	50,5	271,6	271,2	273,8	142,5	120,4	129,7	29,0	89,70	86,09	85,42	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
5	48,4	48,5	51,2	266,2	264,7	264,6	139,6	115,1	124,2	30,2	87,82	84,31	83,80	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \downarrow$
6	48,5	48,9	51,6	269,3	268,8	270,0	142,1	119,6	128,5	30,3	89,58	86,13	85,58	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \uparrow$
7	47,7	46,8	49,3	267,1	265,3	265,8	140,8	116,6	125,4	28,1	86,71	83,49	82,88	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \downarrow$
8	49,2	50,5	53,3	268,4	268,1	268,8	141,0	118,1	127,2	32,4	90,66	86,88	86,42	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \uparrow$
9	49,8	53,2	56,2	268,9	270,2	271,0	141,0	119,2	128,5	36,0	87,28	83,07	82,69	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
10	47,1	44,3	47,0	266,6	263,4	264,0	140,8	115,6	124,4	25,7	90,00	86,91	86,18	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$

Avec, (a) : MHCP_B, (b) : MHCP_A et (c) : MHCP_BJ. (1) $i \in \{A, B, BS1\}$ selon la structure de la stratégie de PM utilisée

D'après les tableaux 4.7 et 4.8, nous remarquons que la valeur du paramètre T^*_{BS2}est influencée par la structure de la stratégie de Setup adoptée (HCP ou MHCP), elle est plus élevée pour les politiques avec une stratégie HCP. Effectivement, si le niveau d'inventaire des produits finis sous les commandes de la stratégie de Setup modifiée (MHCP) atteint le seuil critique pour un produit fini donné, le taux de production est adapté au taux de la demande en attendant que l'autre produit s'approche de la rupture de stock pour exécuter une opération de Setup. Tandis que la stratégie de Setup classique (HCP) adopte un taux de production maximal tout au long du fonctionnement de la machine (voir deuxième chapitre). De ce fait, le risque de rupture de stock pour les politiques; dont la structure de la stratégie de Setup est de type modifié (MHCP), est plus élevé que celles avec une stratégie de Setup classique (HCP), d'où le besoin de réduire le nombre des actions de maintenance pour les premières. Dans le même sens, pour se protéger contre la rupture de stock au cas où l'intervention de PM est programmée juste après des actions de CM, les politiques de commande HCP_**B** et MHCP_**B** utilisent des seuils critiques Z^*_{inv} et a^* plus élevés que celles de HCP_**BJ** et MHCP_**BJ** respectivement, puisque ces deux dernières peuvent sauter des interventions de PM. La réaction des paramètres de commande ainsi que celle du coût total encouru est analysée comme suit :

- Variation du coût d'inventaire c^+ (cas 1 et 2)

Lorsque le coût d'inventaire augmente, des niveaux d'inventaire moyens plus faibles doivent être adoptés, et donc le seuil critique Z^*_{inv} et la borne du corridor a^* de toutes les politiques de commande diminuent dans le but d'éviter des coûts supplémentaires de l'inventaire. La réduction de Z^*_{inv} et a^* augmente le risque de rupture de stock menant ainsi le système à diminuer le seuil d'âge pour des actions préventives T^*_A, l'intervalle entre les interventions de maintenance préventive ($T^*_B \; et \; T^*_{BS1}$) ainsi que le seuil de temps permettant les sauts de PM T^*_{BS2}. L'augmentation du coût total des politiques de commande est due principalement à l'augmentation du coût de possession des stocks de sécurité. Le contraire se produit lorsque c^+ diminue.

- Variation du coût de pénurie c^- (cas 3 et 4)

L'influence de la variation du coût de pénurie sur les niveaux des stocks tampons est inverse comparée avec la variation du coût d'inventaire. Quand le coût de pénurie augmente, le niveau d'inventaire moyen requis augmente afin d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock suite aux arrêts de l'activité de la production. D'où l'augmentation de la valeur de Z_{inv}^* et a^*. L'augmentation de la fréquence de PM (diminution de la valeur de T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et T_{BS2}^*) de toutes les politiques de commande a pour but de réduire le nombre de pannes qui durent plus longtemps. Notons également que lorsque c^- croît, le coût total encouru augmente. Le contraire se produit quand c^- diminue.

- Variation du coût de Setup c_s (cas 5 et 6)

D'après les tableaux 4.7 et 4.8, l'effet de la variation du coût de Setup sur les paramètres de commande varie selon la structure de Setup adoptée. Pour le cas d'une stratégie de Setup classique HCP (tableau 4.7), quand le coût de Setup augmente, la valeur de $T_A^*, T_B^* \; et \; T_{BS1}^*$ et T_{BS2}^* diminue, donnant ainsi plus de préférence aux interventions de PM pour but de réduire le nombre d'opération de Setup. En effet, cette stratégie de Setup classique (HCP) impose le taux maximal de production durant toute la période de disponibilité de la machine. Ainsi, dès qu'un seuil critique Z_{inv}^* est atteint, une opération de Setup est automatiquement exécutée. L'augmentation du nombre des actions de PM réduit le risque de panne du système de production, d'où la diminution du niveau des stocks tampons (Z_{inv}^* et a^* diminuent).

En comparaison avec les politiques de commande avec une stratégie de Setup classique HCP, l'augmentation du coût de Setup a un effet inverse sur les paramètres de commande des politiques avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP), puisque ces dernières n'effectuent aucune opération de Setup que si l'un des produits risque de tomber en pénurie, sinon la production est maintenue au taux de la demande. C'est-à-dire que le nombre d'opération de Setup varie en fonction du niveau du seuil critique Z_{inv}^* et la borne du corridor a^*. Par conséquent, lorsque le coût de Setup c_s augmente, les valeurs de Z_{inv}^* et a^* augmentent afin de réduire le nombre d'opérations de Setup (tableau 4.8). Notons également qu'en raison de l'augmentation des niveaux des stocks tampons (augmentation de Z_{inv}^* et a^*), le risque de

rupture de stock diminue et le système réduit la fréquence de PM (T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et T_{BS2}^* augmentent). Le contraire se produit quand c_s diminue.

- Variation du coût de PM c_{pm} (cas 7 et 8)

Lorsque le coût de PM augmente, la valeur des paramètres T_A^*, T_B^* , T_{BS1}^* et T_{BS2}^* augmentent dans le but d'éviter les actions de PM qui coûtent plus cher. C'est-à-dire que le nombre moyen de CM augmente alors que le nombre de PM diminue. Cette situation croît le risque de pannes et donc la rupture de stock. D'où le besoin d'augmenter le seuil critique Z_{inv}^* et de la borne du corridor a^*. Le coût total des politiques de commande augmente suivant l'augmentation de c_{pm}. Le contraire se produit lorsque c_{pm} diminue

- Variation du coût de CM c_{cm} (cas 9 et 10)

La variation du coût de CM à un effet inverse sur les paramètres de commande comparée à celle du coût de PM. Effectivement, les tableaux 4.7 et 4.8 montrent que lorsque le coût de CM augmente, le système donne plus de préférence aux interventions de PM en diminuant la valeur de T_A^*, T_B^* , T_{BS1}^* et T_{BS2}^*. Par conséquent, le risque de rupture de stock diminue puisque le système évite de plus en plus de CM. D'où la réduction du seuil critique Z_{inv}^* et de la borne du corridor a^*. Le coût total des politiques de commande augmente en fonction de l'augmentation de c_{cm}. Le contraire se produit quand c_{cm} diminue.

4.3.2 Effets des paramètres de coût et de temps sur les politiques sans opportunisme

D'après les résultats des tableaux 4.7 et 4.8, la politique de commande MHCP_BJ est la politique la plus avantageuse en termes de coût pour les différentes combinaisons de coût apposées au système. Dans la section suivante, nous procédons à une étude plus approfondie de l'évolution des politiques sans opportunisme face à la variation des paramètres de coût de pénurie, de Setup et de CM ainsi que les paramètres de temps des opérations de Setup et des interventions de CM. Tous les résultats obtenus sont présentés en fonction du paramètre du système utilisé ainsi que la stratégie de Setup adoptée (HCP ou MHCP) par la politique de

commande. Comme déjà remarqué dans les deuxième et troisième chapitres ainsi que dans la section 4.3.1, les politiques de commande avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP) sont plus avantageux en termes de coût que leurs équivalentes ayant une stratégie de Setup classique (HCP). Ce phénomène est dû essentiellement au nombre élevé d'opérations de Setup donc au coût de Setup, généré par les politiques ayant une structure de Setup classique (HCP). Nous rappelons que ces politiques fonctionnent avec une capacité maximale tout au long de la disponibilité de la machine, de telle façon que dès que l'un des niveaux de stock de produits finis atteint son seuil critique, une opération de Setup est exécutée automatiquement. Notons que dans le reste du chapitre, nous utilisons la différence de coût afin de comparer la variation du coût total encouru entre deux politiques de commande i et j, cette différence est exprimée par : $DC(i,j) = (C_i^* - C_j^*) / C_j^*$, i ≠ j.

4.3.2.1 Effets des paramètres de coût

Cette partie présente une étude comparative dans le but de déterminer et comparer l'influence des paramètres de coût de pénurie (c^-), de CM (c_{cm}) et de Setup (c_s) sur le coût total des politiques sans opportunisme. Pour chaque analyse (voir Figures 4.8, 4.9 et 4.10), un seul paramètre de coût varie et tous les autres paramètres de coût et de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (voir tableau 4.2).

Comme déjà mentionné dans la section 4.3.1, lorsque le coût de pénurie c^- augmente, le système réagit par l'augmentation de Z_{inv}^* et a^* afin d'éviter des coûts supplémentaires de pénurie lors des interventions de la maintenance (corrective ou préventive), mais aussi en donnant plus de préférence aux actions de PM ($T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et\ T_{BS2}^*$ diminuent). Cette réaction qui croît la signification des sauts de PM, explique l'écart croissant de DC(HCP_**B**, HCP_**BJ**) et DC(MHCP_**B**, MHCP_**BJ**) puisque les politiques HCP_**BJ** et MHCP_**BJ** peuvent annuler des interventions de PM si l'âge de la machine ne dépasse pas le seuil T_{BS2}^*.

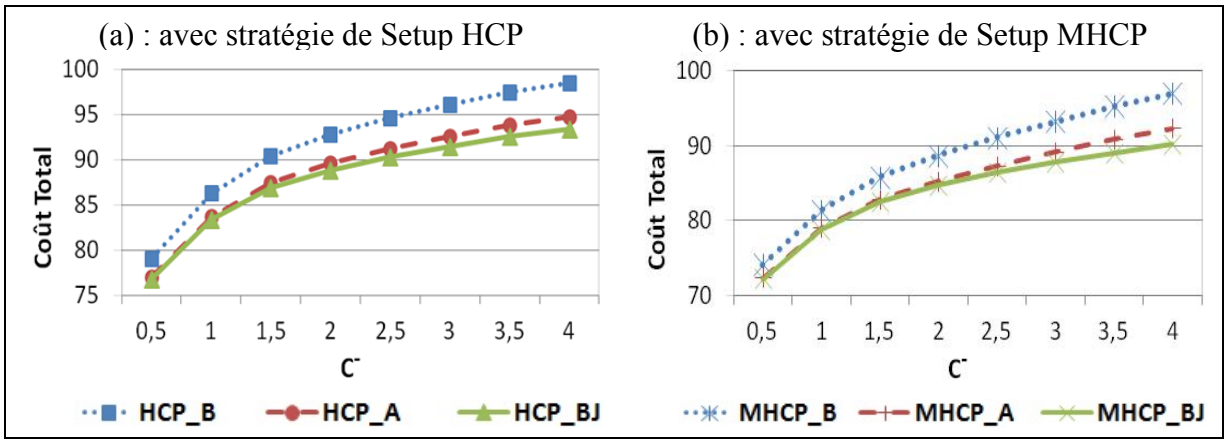


Figure 4.8 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents coûts de pénurie

La figure 4.8 montre aussi que la différence de coût entre les politiques de commande HCP_**B** et HCP_**A** (DC(HCP_**B**, HCP_**A**)) et entre MHCP_**B** et MHCP_**A** (DC(MHCP_**B**, MHCP_**A**)) augmente quand c^- augmente. En effet, à cause des interventions de PM qui s'effectuent juste après la réparation de la machine, les politiques de commande avec une stratégie de PM de type bloc classique engendrent plus de pénurie que les politiques avec une stratégie de PM de type âge, et cela malgré la réduction du nombre des pannes (T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* diminuent). Rappelons que les politiques de commande avec une stratégie de PM de type âge n'exécutent les actions préventives que si la machine atteint un certain âge constant T_A.

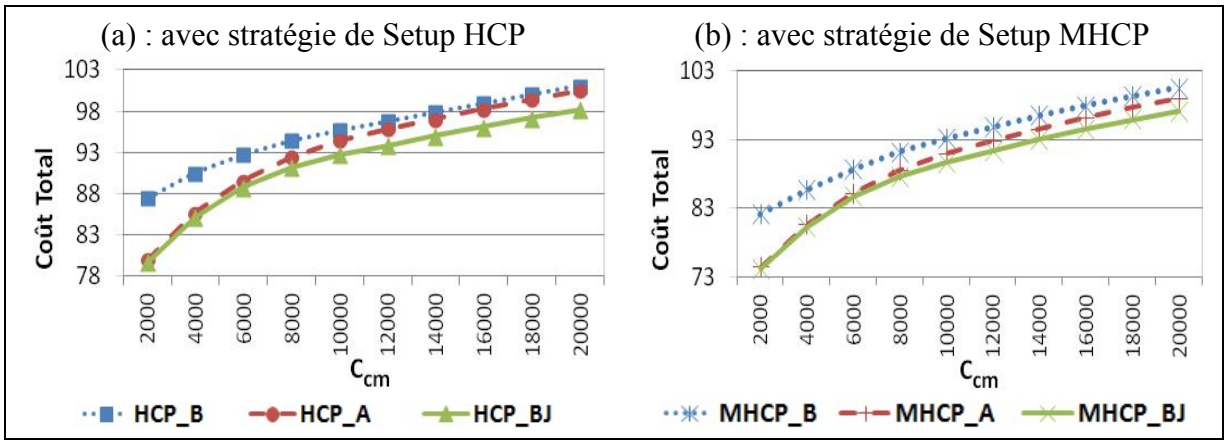


Figure 4.9 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents coûts de CM

La figure 4.9 présente l'évolution du coût total des politiques sans opportunisme lorsque seul le paramètre du coût de CM (c_{cm}) varie de 2000 à 20000. Elle montre que $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{A})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{A})$ diminuent quand c_{cm} augmente. Ce phénomène est expliqué par la diminution du nombre de pannes de la machine au dépend de la PM (voir les tableaux 4.7 et 4.8), et donc par la réduction des interventions de PM qui sont programmées juste après la fin d'une action de réparation. Cette situation implique aussi la diminution de la signification des sauts des actions de PM, d'où la diminution de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$.

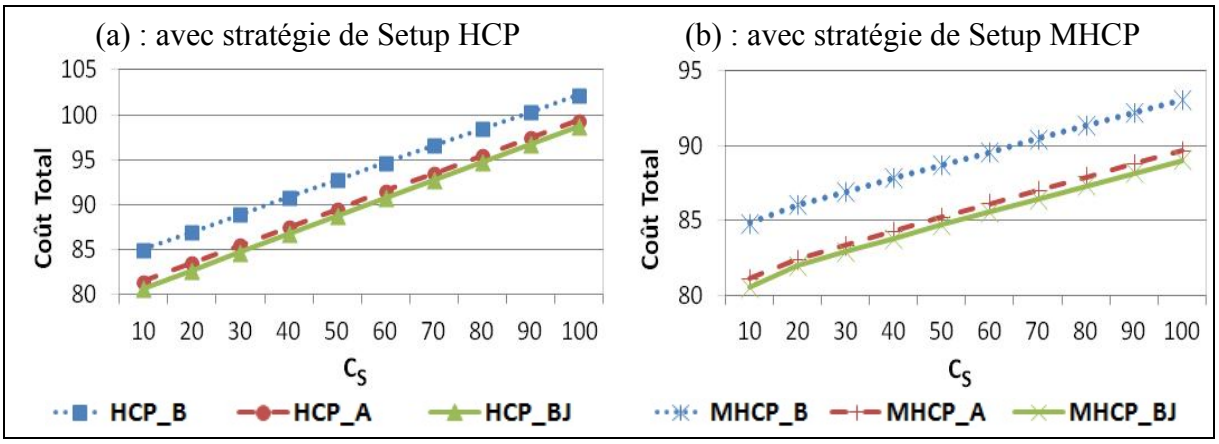


Figure 4.10 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents coûts de Setup

La figure 4.10 (a et b) montre que les politiques de commande qui permettent des sauts d'interventions de PM (HCP_**BJ** et MHCP_**BJ**) sont plus avantageux en termes de coût que les autres politiques, quelles que soit la structure de la stratégie de Setup et la valeur du coût de Setup adoptées. Par contre, la différence de coût total entre une politique sans opportunisme et une stratégie de Setup classique (HCP) et son équivalente avec une stratégie modifiée (MHCP), augmente. Cette croissance est due essentiellement au nombre élevé d'opérations de Setup exécutées par les modèles de stratégie de Setup classique (HCP) dès qu'un niveau d'inventaire $X_i, i \in \{1,2\}$ atteint son seuil critique Z_{inv}. Tandis que les modèles avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP) n'autorisent aucune opération de Setup que lorsque le système de production risque une rupture de stock.

Comme déjà expliqué dans la section 4.3.1, l'influence de la variation de c_s sur les politiques sans opportunisme varie selon la structure de Setup adoptée. Pour le cas des politiques avec une stratégie de Setup classique (HCP), quand c_s augmente, la valeur de $T_A^*, T_B^* \, et \, T_{BS1}^*$ et T_{BS2}^* diminue, donnant ainsi plus de préférence aux interventions de PM pour but de réduire le nombre d'opération de Setup. En conséquence, la signification des sauts des interventions de PM et le nombre de pannes diminuent (nombre d'actions de PM qui sont programmées juste après une action de CM diminue), d'où la réduction de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{A})$ et $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$. De l'autre coté, le nombre d'opérations de Setup pour les politiques avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP) varie en fonction du niveau du seuil critique Z_{inv}^* et la borne du corridor a^* (voir section 4.3.1). D'après les résultats obtenus, la croissance de la valeur de c_s, augmente celle de $Z_{inv}^*, a^*, T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^*$ et T_{BS2}^* pour les politique avec une stratégie de Setup modifiée. Cette réaction permet de réduire la valeur de $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{A})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$ au dépend de la politique MHCP_**B** qui bénéficie de niveaux d'inventaire plus important. Ces inventaires sont utilisés pour réduire le risque de pénurie. Rappelons que les politiques avec une stratégie de PM de type bloc classique engendrent plus de pénurie que les politiques de commande utilisant une stratégie de PM de type âge ou de type bloc avec Sauts.

4.3.2.2 Effets de la durée de maintenance corrective et de la durée de mise en course

L'objectif de cette section est d'étudier l'influence du temps moyen des actions de CM et son écart-type ainsi que du temps moyen des opérations de Setup, sur le coût des politiques sans opportunisme. Les autres paramètres de coût de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (voir tableau 4.2).

Comme fut le cas pour la variation du c_{cm} lors de l'analyse de sensibilité (section 4.3.1), l'augmentation du temps moyen des actions de CM (MTCR) permet au système de production d'exécuter plus d'interventions de PM ($T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et \, T_{BS2}^*$ diminuent) afin d'éviter des coûts supplémentaires de pénurie lors des pannes qui sont plus longues. La figure 4.11 (a et b) montre bien que l'exécution de plus en plus d'interventions de PM réduit

la valeur de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{A})$, $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{A})$, $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BJ})$ et $DC(\text{MHCP_}\mathbf{B}, \text{MHCP_}\mathbf{BJ})$. Ce phénomène est dû principalement à la réduction du nombre de pannes et donc les interventions de PM qui sont programmées juste après une action de réparation. D'autres parts, les actions de réparation engendrent plus de pénuries pour les politiques de commande avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP) que leurs équivalentes dont la structure de la stratégie de Setup est classique (HCP), puisque ces dernières utilisent constamment le taux de production maximal. Par conséquent, la différence de coût entre une politique de commande avec une stratégie de Setup modifiée et son équivalente ayant une stratégie de Setup classique, diminue suivant l'augmentation de la durée de moyenne de CM.

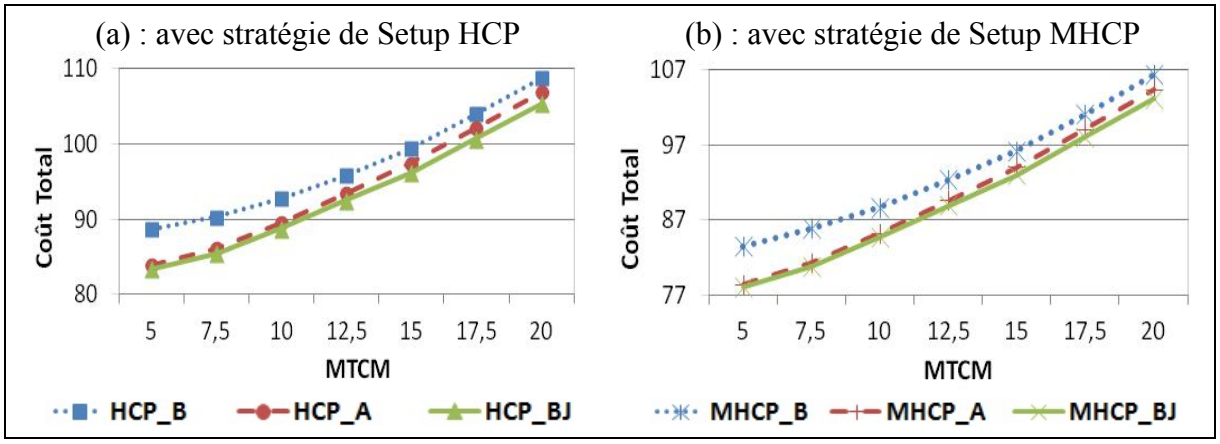


Figure 4.11 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents MTCM

Dans cette partie, nous présentons l'effet de la variabilité de la durée des actions de maintenance corrective; exprimée par l'écart-type SDC, sur le coût total des différents politiques sans opportunisme (figure 4.12). L'augmentation de la valeur de cette variabilité influence les paramètres de commande ainsi que le coût total des politiques de commande de la même manière que lorsque le temps moyen des actions de CM augmente (voir paragraphe précédent pour plus de détails).

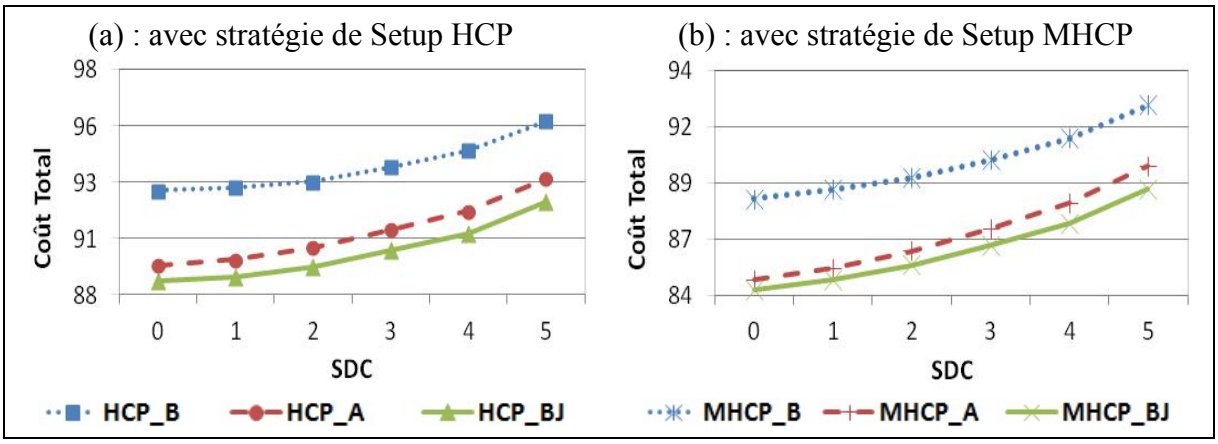


Figure 4.12 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents SDC

La figure 4.13 présente l'influence de la durée d'opération de Setup (T^S) sur le coût total des politiques sans opportunisme. Tous les autres paramètres de coût et de temps sont fixés à leurs valeurs sont définies dans le cas de base. Nous remarquons que le coût total des politiques de commande avec une stratégie de Setup classique (HCP) diminue quand T^S augmente de 0,2 à 1,0. Ce phénomène est causé par la diminution considérable du nombre d'opérations de Setup exécutés. En effet, ces politiques utilisent constamment le taux de production maximal. Il est intéressant de noter aussi que l'augmentation de T^S correspond à une tendance de la valeur du paramètre α^* vers 1 (la valeur a^* croît en direction de Z^*_{inv}) pour les politiques ayant une stratégie de Setup modifiée (MHCP). Ce qui implique HCP_A ≅ MHCP_A, HCP_B ≅ MHCP_B et HCP_BJ ≅ MHCP_BJ quand T_S est très grand.

D'autre part, l'augmentation de la valeur de T_S croît le risque de pénurie, spécialement si les interventions de la maintenance (CM et PM) sont exécutées juste après une opération de Setup. Par conséquent, le système augmente la valeur de Z^*_{inv} , a^*. Ainsi, le risque de rupture de stock diminue, d'où la réduction de la fréquence de PM par l'augmentation de T^*_A, T^*_B, T^*_{BS1} et T^*_{BS2}. Cette situation croît le nombre de panne du système et donc le nombre d'interventions de PM exécutées juste après la réparation de la machine. D'où l'augmentation de DC(HCP_**B**, HCP_**A**), DC(MHCP_**B**, MHCP_**A**), DC(HCP_**B**, HCP_**BJ**) et DC(MHCP_**B**, MHCP_**BJ**).

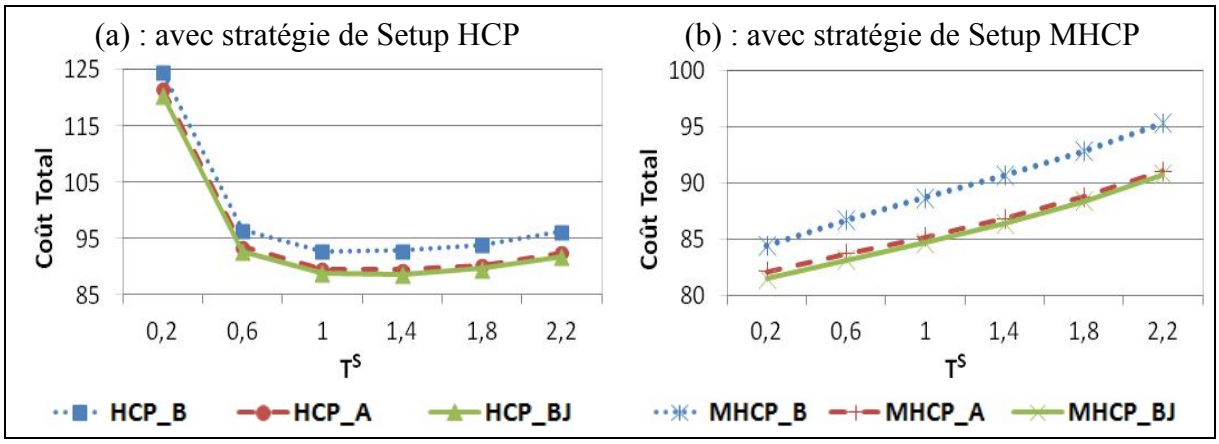


Figure 4.13 Coût total des politiques sans opportunisme pour différents T^S

4.3.2.3 Résumé

Nous concluons que le coût total correspondant à la politique de commande MHCP_BJ est strictement inférieur à celui des autres politiques sans opportunisme pour toutes les combinaisons des paramètres du système testées. Ainsi, il est plus avantageux d'un point de vue économique, de considérer un facteur indépendant qui autorise ou non les interventions de PM selon l'âge de la machine. Cependant cette amélioration est proportionnelle à la valeur des paramètres de coût et temps du système. Notons également que grâce à leur capacité de réduire le nombre d'opérations de Setup, les politiques de commande avec une stratégie de Setup modifiée (MHCP) sont plus rentables que leurs équivalentes ayant une stratégie de Setup classique (HCP).

En raison de réaliser plus d'économie, nous avons conçu des modèles qui améliorent la synchronisation entre la planification de la maintenance préventive (PM) et les opérations de Setup. Ces modèles consistent à tirer parti de quelques arrêts de l'activité de la production lors des actions de Setup pour effectuer des interventions de PM et ainsi réduire le risque de rupture de stock. Par conséquent, une nouvelle variable de décision T_O; qui dépend de l'âge de la machine, est alors considérée dans le but d'optimiser les activités de coordination des interventions de PM avec les opérations de Setup. La section prochaine est dédiée aux politiques avec opportunisme. Elle fera l'objet de plusieurs analyses afin de comparer le

comportement et le coût total encouru des politiques de commande pour différentes combinaisons des paramètres de coût et de temps du système.

4.4 Analyse des politiques de commande avec opportunisme

4.4.1 Analyse de sensibilité générale

Nous procédons dans cette section à une analyse de sensibilité des politiques avec opportunisme en fonction des paramètres de coût du système. Les objectifs sont de démontrer la robustesse de l'approche de résolution et d'analyser la réaction de ces politiques. Le tableau 4.6; présenté dans la section 4.3.1, résume les configurations des paramètres de coût du système adoptées pour mener notre analyse de sensibilité. La réaction des paramètres de commande optimaux et du coût total encouru face à la variation des paramètres de coût du système, est présentée dans les deux tableaux 4.9 et 4.10.

Les tableaux 4.9 et 4.10 montrent que l'approche adoptée dans ce travail est robuste. Nous remarquons que pour les différentes combinaisons de paramètres de coûts du système adoptées, la politique de commande MHCP_BJO est la plus avantageuse en termes de coût parmi toutes les autres politiques avec opportunisme. D'après les tableaux 4.9 et 4.10, la valeur des seuils Z_{inv}^{*} et a^{*} pour les politiques de commande avec une capacité de saut d'interventions de PM : HCP_**BJO** et MHCP_**BJO**, est plus faible que leurs équivalente HCP_**BO** et MHCP_**BO** respectivement. Cette capacité permet aux deux premières de mieux se protéger contre la rupture de stock au cas où l'intervention de PM est programmée juste après une action de CM.

Tableau 4.9 Analyse de sensibilité pour les politiques avec opportunisme et une stratégie de Setup classique (HCP)

Cas	$T_i^{*(1)}$			Z_{inv}^*			T_{BS2}^*	T_O^*			Coût total (C^*)			Remarque
	(A)	(B)	(C)	(A)	(B)	(C)	(C)	(A)	(B)	(C)	(A)	(B)	(C)	
Base	**46,58**	**46,82**	**50,36**	**201,99**	**195,14**	**194,77**	**25,61**	**0,76**	**1,13**	**0,62**	**91,26**	**88,48**	**87,59**	**Cas de base**
1	47,29	47,81	51,81	211,65	205,09	206,13	27,81	1,07	1,34	0,76	85,90	83,26	82,37	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, T_O^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	45,84	45,77	48,83	192,40	185,24	183,45	23,34	0,46	0,93	0,49	96,26	93,32	92,37	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, T_O^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	47,03	47,28	50,74	197,93	190,69	189,90	26,27	0,72	1,07	0,52	90,52	87,72	86,89	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \uparrow, T_O^* \downarrow, C^* \downarrow$
4	46,17	46,37	49,99	205,31	198,72	198,69	24,97	0,80	1,18	0,72	91,91	89,14	88,20	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \downarrow, T_O^* \uparrow, C^* \uparrow$
5	46,76	47,09	50,63	201,83	195,16	195,03	25,86	0,83	1,17	0,64	89,23	86,35	85,49	$T_i^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, T_O^* \uparrow, C^* \downarrow$
6	46,40	46,53	50,08	202,18	195,09	194,45	25,33	0,69	1,08	0,61	93,28	90,59	89,69	$T_i^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, T_O^* \downarrow, C^* \uparrow$
7	45,73	45,34	48,74	201,10	193,92	192,86	23,01	0,87	1,26	0,81	89,17	86,66	85,72	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, T_O^* \uparrow, C^* \downarrow$
8	47,39	48,18	51,88	202,86	196,23	196,53	28,15	0,65	1,01	0,44	93,31	90,22	89,38	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, T_O^* \downarrow, C^* \uparrow$
9	47,90	49,78	53,78	203,20	197,34	198,72	31,73	0,63	0,92	0,20	90,04	86,63	85,91	$T_i^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, T_O^* \downarrow, C^* \downarrow$
10	45,33	44,02	47,45	200,91	193,03	191,37	20,77	0,86	1,30	0,92	92,37	90,03	88,94	$T_i^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, T_O^* \uparrow, C^* \uparrow$

(1) $i \in \{A, B, BS1\}$ selon la structure de la stratégie de maintenance préventive utilisée.

(A) : HCP_BO, (B) : HCP_AO et (C) : HCP_BJO.

Tableau 4.10 Analyse de sensibilité pour les politiques avec opportunisme et une stratégie de Setup modifié (MHCP)

Cas	$T_i^{*(1)}$			Z_{inv}^*			α^*			T_{BS2}^*	T_0^*			Coût total (C^*)			Remarque
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	
Base	**48,7**	**49,3**	**55,6**	**278,8**	**269,6**	**275,5**	**144,9**	**139,6**	**120,0**	**39,8**	**1,55**	**1,32**	**5,2 E-07**	**87,04**	**84,62**	**83,94**	**Cas de base**
1	49,2	50,1	56,3	291,2	286,1	289,8	150,3	146,7	124,1	41,2	1,59	1,40	2,8 E-06	81,36	78,94	78,34	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
2	48,1	48,1	54,8	266,2	251,1	254,0	138,9	129,0	111,8	39,0	1,52	1,04	5,5 E-08	92,40	89,85	89,03	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
3	49,1	49,8	55,8	273,7	262,8	262,8	142,6	136,4	115,2	40,2	1,50	1,23	3,9 E-08	86,22	83,79	83,01	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
4	48,2	48,8	55,4	283,0	275,2	278,1	146,7	142,1	120,4	39,4	1,59	1,39	7,3 E-05	87,79	85,37	84,75	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
5	48,6	49,1	55,4	277,1	267,1	268,8	143,4	137,8	116,1	40,0	1,57	1,33	2,9 E-06	86,20	83,75	83,03	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
6	48,7	49,4	55,7	280,5	272,0	280,0	146,3	141,3	123,6	39,6	1,52	1,30	1,6 E-07	87,88	85,48	84,80	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$
7	47,9	47,7	54,7	277,9	268,0	271,1	144,8	139,3	117,7	38,8	1,57	1,37	2,3 E-06	85,06	82,92	82,32	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \downarrow$
8	49,4	50,7	56,2	279,7	271,0	271,2	144,9	139,8	120,6	40,6	1,53	1,26	5,6 E-08	88,99	86,26	85,48	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \uparrow$
9	50,2	52,9	57,7	280,6	273,2	273,4	145,0	140,1	121,2	43,0	1,53	1,20	6,9 E-08	85,60	82,46	81,69	$T^* \uparrow, Z_{inv}^* \uparrow, \alpha^* \uparrow, T_{BS2}^* \uparrow, C^* \downarrow$
10	47,2	45,8	52,9	277,1	266,1	269,5	144,8	139,0	119,8	36,5	1,57	1,41	3,0 E-06	88,35	86,40	85,93	$T^* \downarrow, Z_{inv}^* \downarrow, \alpha^* \downarrow, T_{BS2}^* \downarrow, C^* \uparrow$

Avec, (a) : MHCP_BO, (b) : MHCP_AO et (c) : MHCP_BJO.

(1) $i \in \{A, B, BS1\}$ selon la structure de la stratégie de maintenance préventive utilisée.

La réponse des paramètres de commande et du coût total encouru est semblable à celle présentée dans la section 4.3.1, voici la réaction enregistrée du système :

- Variation du coût d'inventaire c^+ (cas 1 et 2)

Quand c^+ augmente, la valeur du seuil critique (Z^*_{inv}) et de la borne du corridor (a^*) pour toutes les politiques de commande, diminue afin d'éviter des coûts supplémentaires de l'inventaire. La réduction de Z^*_{inv} et a^* augmente le risque de rupture de stock menant ainsi le système à diminuer le seuil d'âge pour des actions préventives T^*_A, les temps prédéterminés d'intervention de PM (T^*_B et T^*_{BS1}), le seuil de temps prédéterminé permettant de sauter les actions de PM T^*_{BS2}, ainsi que l'intervalle autorisant l'avancement des interventions de PM pour les combiner avec les opérations de Setup (T^*_O), pour avoir plus d'interventions de PM que de CM. Le contraire se produit lorsque c^+ diminue.

- Variation du coût de pénurie c^- (cas 3 et 4)

Quand c^- augmente, le système cherche à éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock en augmentant la valeur de Z^*_{inv}, a^* et la fréquence de PM (diminution de la valeur des paramètres T^*_A, T^*_B, T^*_{BS1} et T^*_{BS2}). Notons que l'augmentation de T^*_O croît le nombre d'opération de synchronisation des interventions de PM avec les opérations de Setup, permettant ainsi de tirer profit de certains arrêts de Setup pour exécuter des actions de PM dans le but de réduire le risque de la rupture de stock. Le contraire se produit lorsque c^- diminue.

- Variation du coût de Setup c_s (cas 5 et 6)

L'effet de la variation de c_s sur les paramètres de commande varie selon la structure de la stratégie de Setup adoptée par la politique avec opportunisme. Cet effet est parfaitement identique à celui des politiques sans opportunisme (voir section 4.4.1 pour plus de détails). Nous remarquons également que face à l'augmentation de c_s, le système diminue la valeur du paramètre T^*_O quelque soit la stratégie de Setup utilisée (HCP ou MHCP). En effet, le système cherche à augmenter la durée des arrêts de production destinés aux actions de maintenance dans le but de réduire le nombre d'opérations de Setup.

- Variation du coût de PM c_{pm} (cas 7 et 8)

Comme dans le cas des politiques sans opportunisme (voir section 4.4.1). Quand c_{pm} augmente, le système tend à croitre le nombre des interventions de CM et d'éviter celles de PM qui coûtent plus cher en augmentant la valeur de T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et T_{BS2}^* et en diminuant celle de T_O^*. Dans ce cas, le risque de rupture de stock augmente, d'où le besoin d'augmenter la valeur de Z_{inv}^* et de a^*. Le contraire se produit quand c_{pm} diminue.

- Variation du coût de CM c_{cm} (cas 9 et 10)

Quand c_{cm} augmente, le système donne plus de préférence aux interventions de PM en diminuant le seuil d'âge pour des actions préventives T_A^*, les temps prédéterminés d'intervention de PM ($T_B^* \; et \; T_{BS1}^*$), le seuil de temps prédéterminé permettant de sauter les actions de PM T_{BS2}^*, et en augmentant la valeur du paramètre T_O^*. Cette situation réduit le risque de pénurie, d'où la réduction du seuil critique Z_{inv}^* et de la borne du corridor a^* pour toutes les politiques de commande. Le contraire se produit lorsque c_{cm} diminue.

4.4.2 Influence des paramètres de coût et de temps sur les politiques avec opportunisme

La section suivante a pour objectif de déterminer comment les coûts des politiques avec opportunisme évoluent suite à la variation des paramètres de coût de pénurie, de Setup et de PM ainsi que les paramètres de temps des opérations de Setup et des interventions de maintenance préventive. Tous les résultats obtenus sont présentés selon la variable de coût ou de temps du système utilisée ainsi que la structure de la stratégie de Setup adoptée (HCP ou MHCP). Comme déjà observé et expliqué dans la section 4.3.2, le coût total généré par une politique avec opportunisme et une stratégie de Setup modifiée (MHCP) est plus faible que celui de la politiques équivalente ayant une structure de Setup classique (MHCP). Rappelons que la différence de coût entre deux politiques de commande i et j est exprimé par : $DC(i,j) = (C_i^* - C_j^*) / C_j^*$, $i \neq j$.

4.4.2.1 Influence des paramètres de coût

L'objectif de cette partie est de comparer l'effet des paramètres de c^- (figure 4.14), de c_{cm} (figure 4.15) et de c_s (figure 4.16) sur le coût total des politiques avec opportunisme. A chaque fois, un seul paramètre de coût varie et tous les autres paramètres de coût et de temps du système sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (voir tableau 4.2).

En raison les pénuries face à l'augmentation de c^-, le système donne plus de préférence aux interventions de PM ($T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et\ T_{BS2}^*$ diminuent) et augmente la valeur de Z_{inv}^*, a^* et T_O^*. Dans cette situation, la figure 4.14 montre que la valeur des différences de coût DC(HCP_**BO**, HCP_**AO**) et DC(MHCP_**BO**, MHCP_**AO**) augmente. Cela est dû aux interventions de PM qui s'effectuent juste après la réparation de la machine, permettant ainsi aux politiques de commande avec une stratégie de PM de type bloc classique d'engendrer plus de pénurie que leur équivalente avec une stratégie de PM de type âge. Rappelons que les politiques de commande HCP_AO et MHCP_AO n'exécutent les actions préventives que si la machine atteint un certain âge constant T_A^*. D'autre part, la diminution de T_{BS2}^* et la croissance de la fréquence des actions de PM qui croît la signification des sauts de PM, augmente la valeur de DC(HCP_**BO**, HCP_**BJO**) et DC(MHCP_**BO**, MHCP_**BJO**).

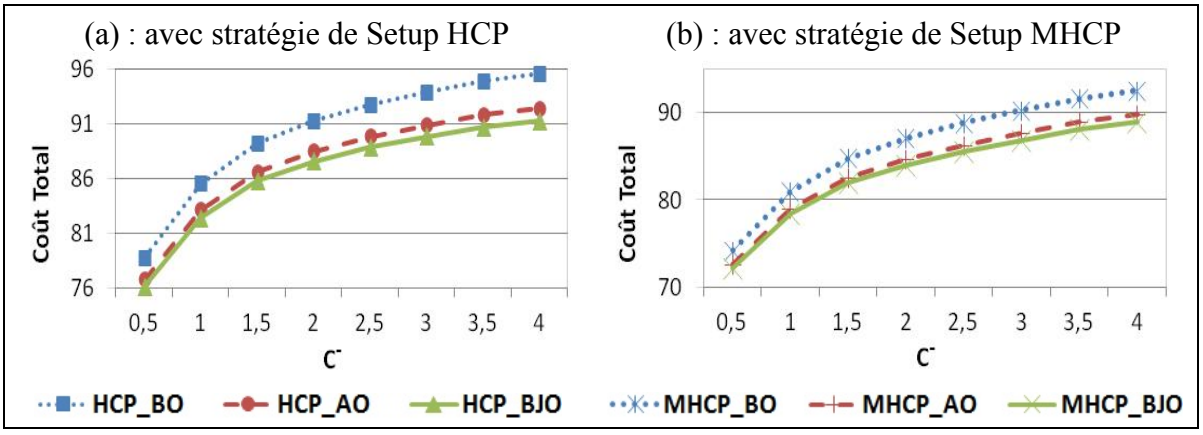


Figure 4.14 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents coûts de pénurie

La figure 4.15 présente la variation du coût total des politiques avec opportunisme lorsque seul le paramètre de c_{pm} croît de 1000 jusqu'à 6000. D'après les résultats obtenus, quand c_{pm} augmente, la valeur de DC(HCP_**BO**, HCP_**AO**), de DC(MHCP_**BO**, MHCP_**AO**), de DC(HCP_**BO**, HCP_**BJO**) et de DC(MHCP_**BO**, MHCP_**BJO**) augmentent considérablement suite à la diminution de la signification des sauts de actions de PM et du nombre des interventions de PM qui sont programmées juste après la fin des actions de réparation. En effet, face à l'augmentation de c_{pm}, le système tend à croitre le nombre des interventions de CM et d'éviter celles de PM qui sont plus couteuses (voir les tableaux 4.9 et 4.10).

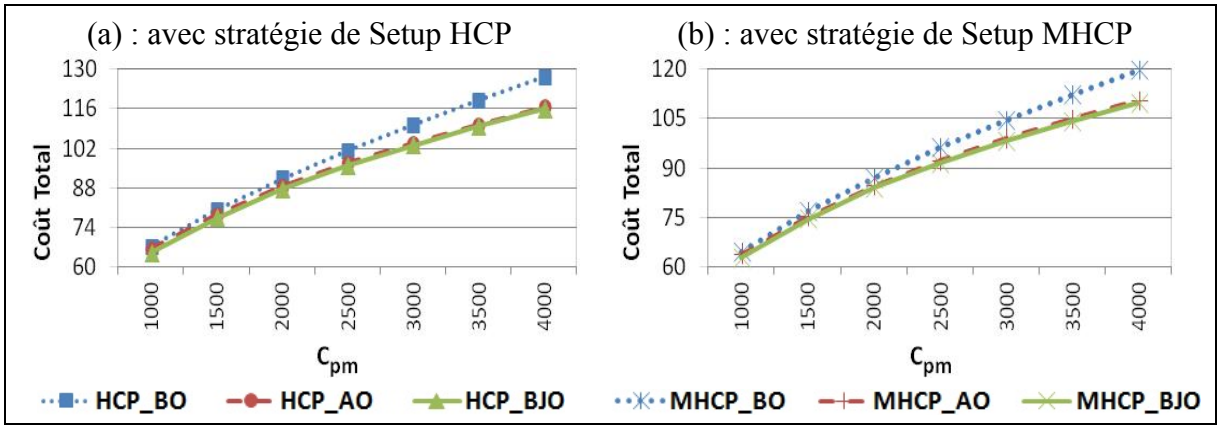


Figure 4.15 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents coûts de PM

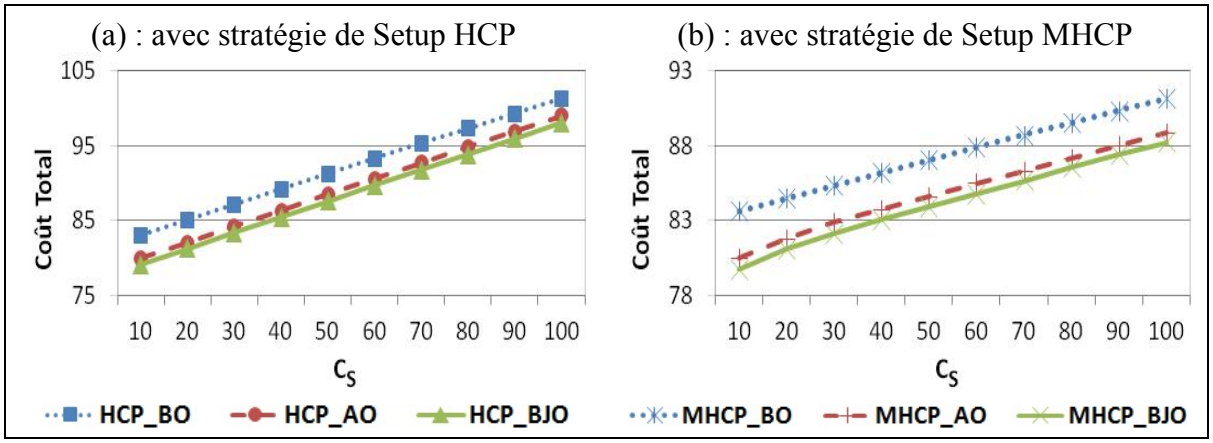


Figure 4.16 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents coûts de Setup

La figure 4.16 présente l'influence de la variation de c_s sur le coût total des différents politiques avec opportunisme. Nous remarquons que la réaction des paramètres et du coût total encouru de ces politiques de commande, est identique à celle présentée lors de l'analyse des politiques sans opportunisme (voir la section 4.3.2.1 pour plus de détails).

4.4.2.2 Influence de la durée de PM et de la durée de mise en course

Dans cette section, nous présentons dans les figures 4.17, 4.18 et 4.19 l'effet de la variation du temps moyen des actions de PM (MTPM), de son écart-type (SDP) et du temps moyen pour accomplir des opérations de Setup (T^S) sur le coût des politiques avec opportunisme. A l'exception du paramètre du temps considéré dans l'analyse, les autres paramètres de coût de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (voir tableau 4.2).

D'après la figure 4.17, nous remarquons que lorsque la valeur de MTPM s'approche de celle de la durée des opérations de Setup (MTPM décroît de 3 à 1 avec $T^S = 1$), le coût total des politiques avec opportunisme augmente. Ce phénomène est causé par l'augmentation considérable du nombre d'opérations de Setup. D'où la convexité des courbes du coût total encouru. La figure 4.17 montre aussi que l'augmentation du temps moyen des actions de PM (MTPM), croît la valeur de DC(HCP_**BO**, HCP_**BJO**) et de DC(MHCP_**BO**, MHCP_**BJO**), car le fait d'annuler les interventions de PM devient de plus en plus intéressant. En effet, le système réagit en diminuant la fréquence des interventions de PM ($T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et\ T_{BS2}^*$ augmentent) qui durent plus longtemps, et en augmentant Z_{inv}^*, a^* et T_O^* pour but d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock. Il est intéressant de noter aussi que lorsque MTPM augmente, la valeur du paramètre α^* tend vers 1 (la valeur a^* croît en direction de $Z_{inv}{}^*$) pour les politiques ayant une stratégie de Setup modifiée. Ainsi, HCP_BO ≅ MHCP_BO et HCP_BJO ≅ MHCP_BJO quand MTPM est très grand. De même, l'augmentation de MTPM croît la valeur de DC(HCP_**BO**, HCP_**AO**) et de DC(MHCP_**BO**, MHCP_**AO**). En effet, ce résultat est dû à la croissance du nombre de pannes (car $T_A^*, T_B^*, T_{BS1}^* et\ T_{BS2}^*$ augmentent) et ainsi avoir plus d'interventions PM qui suivent immédiatement la fin d'une action de réparation. Par conséquent, une politique avec une stratégie de PM de type bloc

classique va générer encore plus de rupture de stock que son équivalente fonctionnant avec une stratégie de PM de type âge.

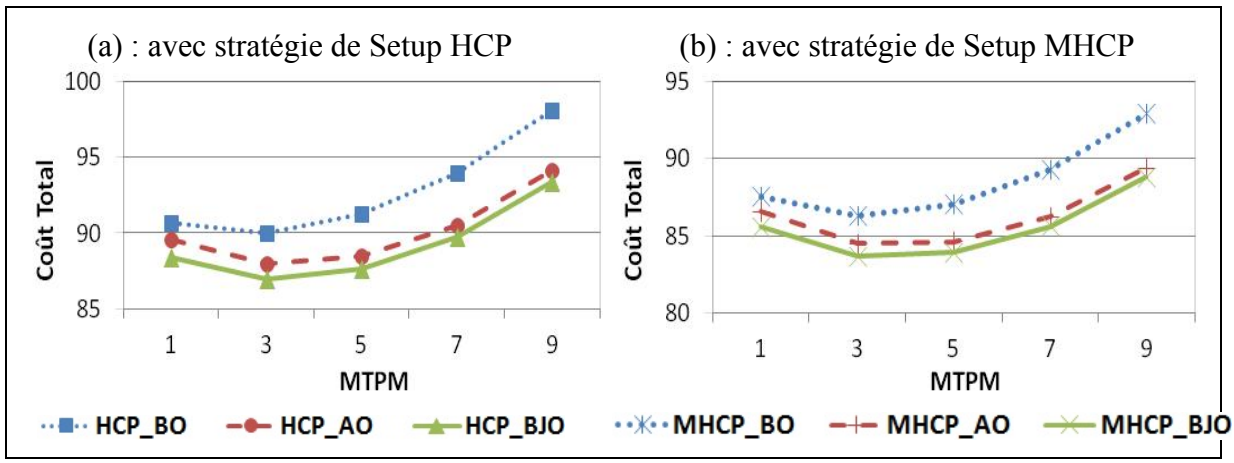


Figure 4.17 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents MTPM

La figure 4.18 présente l'effet de la variabilité de la durée des interventions de maintenance préventive; exprimée par l'écart-type SDP, sur le coût total des différents politiques avec opportunisme. Nous remarquons que l'augmentation de la valeur de cette variabilité influence le coût total des politiques avec opportunisme et les paramètres de commande de la même façon que lorsque le temps moyen des actions de PM augmente (voir paragraphe précédent pour plus de détails).

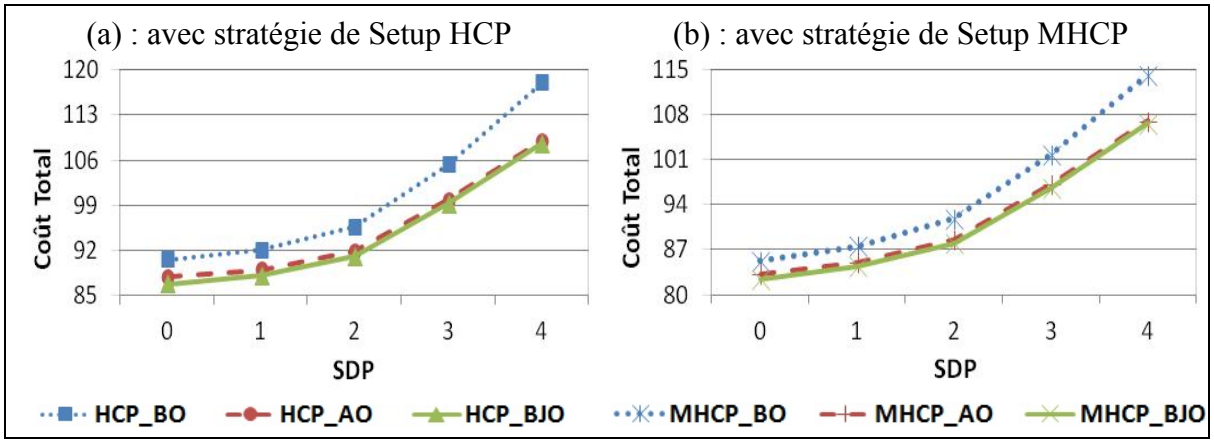


Figure 4.18 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents SDP

La figure 4.19 présente l'effet de la variation de la durée d'opération de Setup (T^S) sur le coût total des différents politiques avec opportunisme. Les résultats obtenus sont tous identiques à ceux présentés dans l'analyse des politiques sans opportunisme (voir section 4.3.2.2).

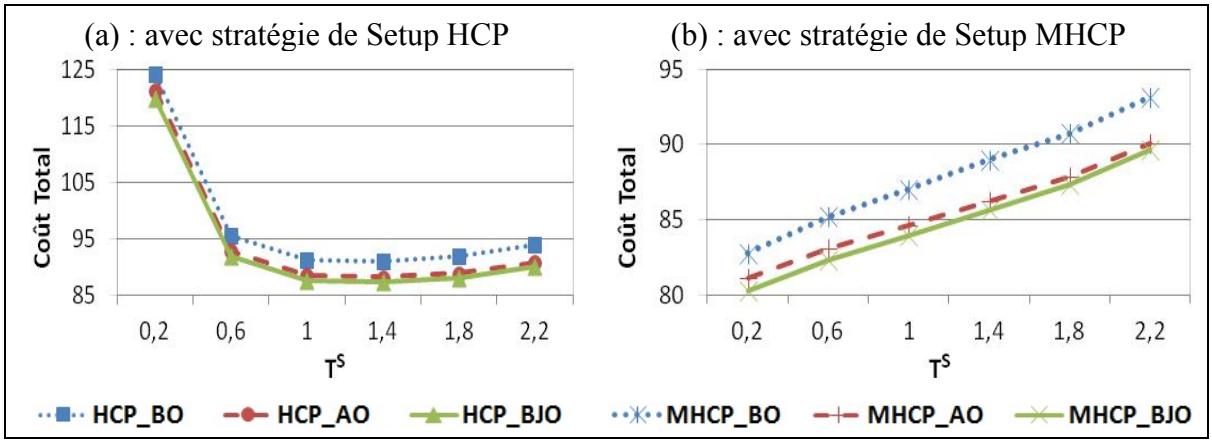


Figure 4.19 Coût total des politiques avec opportunisme pour différents T^S

4.4.2.3 Résumé

L'analyse de l'influence des paramètres de coût et de temps sur le coût total des politiques avec opportunisme, nous a permis de démontrer que la politique MHCP_BJO donne de meilleurs résultats en termes de coût que toutes les autres politiques utilisant le concept de la maintenance opportuniste. Toutefois, ces améliorations varient en fonction de la valeur des paramètres de coût et temps du système. La politique MHCP_BJO utilise la stratégie de Setup modifiée (MHCP) qui contrôle le niveau des inventaires ainsi que le risque de rupture de stock pour une meilleure gestion de Setup. En plus des avantages économiques de la maintenance opportuniste, elle considère également l'âge de la machine pour la planification des interventions de PM. Il est intéressant de noter que toutes les analyses effectuées dans cette section confirment les résultats obtenus dans les deuxième et troisième chapitres. Nous rappelons que le coût total des politiques avec opportunisme et une stratégie de Setup modifiée (MHCP), est toujours inférieur à celui des politiques équivalentes dont la structure de la stratégie de Setup est de type classique (HCP).

La section suivante consiste à présenter les résultats de l'effet des paramètres de coût et de temps sur la différence de coût entre la politique sans opportunisme HCP_**B** et son équivalente qui utilise la maintenance opportuniste (HCP_**BO**). Cette comparaison nous permettra de déterminer l'évolution des améliorations apportées par l'introduction du concept de la maintenance opportuniste. Les résultats obtenus seront généralisés sur l'ensemble des politiques sans opportunisme et leurs équivalentes utilisant la maintenance opportuniste.

4.5 Comparaison entre la politique sans opportunisme HCP_B et son équivalente avec opportunisme HCP_BO

L'objectif de cette section est d'étudier pour une large gamme de configurations des paramètres de coût et de temps, la variation du coût total encouru des politiques sans opportunisme en comparaison avec le coût total de leurs équivalentes qui utilisent la maintenance opportuniste. En raison de la similitude des résultats obtenus, nous présentons dans ce travail l'influence des paramètres du système sur la différence de coût entre les deux politiques de commande HCP_**B** et HCP_**BO**, et les conclusions de cette étude sont généralisées sur l'ensemble des politiques de commande. La structure de cette différence de coût est formulée par : $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO}) = \left(C^*_{HCP_B} - C^*_{HCP_BO}\right)/C^*_{HCP_BO}$.

4.5.1 Influence des paramètres de coût

La figure 4.20 présente la variation de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ lorsque les paramètres du coût de pénurie c^- (Figure 4.20 a) et de maintenance préventive c_{pm} (Figure 4.20 b) augmentent de 0,5 à 4 (c^-/c^+ varie de 5 à 40) et de 1000 à 4000 respectivement. Tous les autres paramètres de coût et de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base.

D'après la figure 4.20 (a), la valeur de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ augmente quand c^- augmente. Ce phénomène est dû principalement à l'augmentation de la valeur de T^*_O, permettant ainsi de profiter davantage des arrêts d'opérations de Setup. Cette situation consiste à réduire les durées de non-disponibilité de la machine, d'où la diminution de la rupture de stock. Rappelons que lorsque c^- augmente, le système de production tente de se protéger contre des

coûts supplémentaires de pénurie, par l'augmentation de la valeur de Z_{inv}^{*}, de a^{*}, et de T_O^{*} et ainsi que la fréquence des interventions de PM (T_B^{*} diminue).

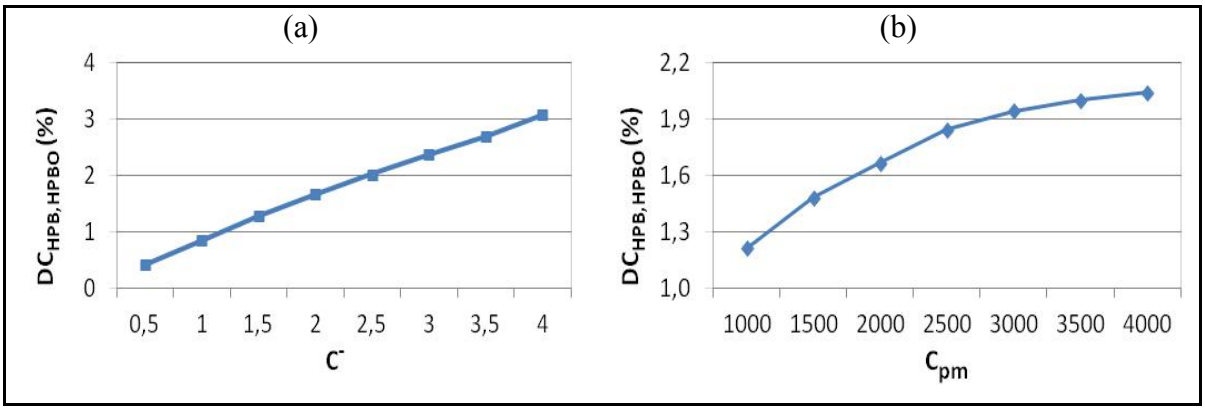


Figure 4.20 Variation de la différence de coût entre les politiques de commande HCP_B et HCP_BO en fonction des coûts de pénurie et de PM

Nous avons déjà observé dans la section 4.4.1 comment l'augmentation de c_{pm} influence les paramètres de commande du système en augmentant la valeur du paramètre T_B^{*} et en diminuant celle de T_O^{*}. Effectivement, l'objectif principal est d'éviter les interventions de PM qui coût plus cher, ce qui mène à avoir plus de pannes du système. Cette situation augmente l'importance de la politique avec opportunisme (HCP_**BO**) qui réalise plus gains économique en diminuant le risque de rupture de stock par rapport à la politique sans opportunisme HCP_**B**, d'où l'augmentation de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ (figure 4.20 b).

La figure 4.21 montre que la valeur $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ diminue quand c_s augmente. Effectivement, dans le but de réduire le nombre d'opérations de Setup lors de l'augmentation de c_s, le système réduit la valeur de T_O^{*} (la combinaison des actions de PM avec celles de Setup devient moins intéressante) et augmente la fréquence des interventions de PM (T_B^{*} diminue).

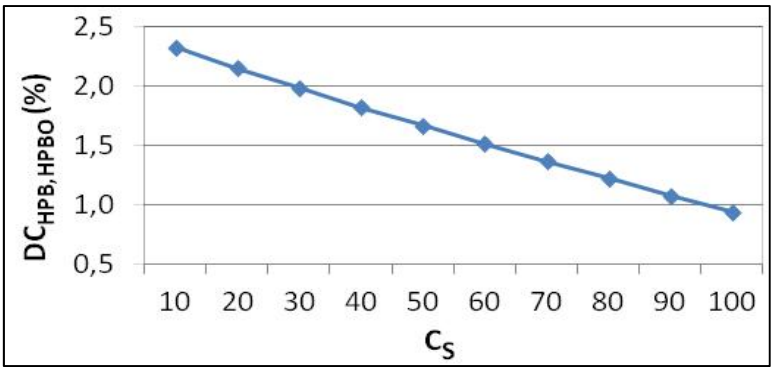


Figure 4.21 Variation de la différence de coût entre HCP_B et HCP_BO en fonction de c_s

4.5.2 Influence de la durée de PM et de la durée de Setup

L'objectif de cette section est de déterminer l'effet des paramètres du temps moyen des actions de PM (MTPM) (figure 4.22 a), de son écart-type (SDP) (figure 4.22 b) et de temps moyen d'opération de Setup (T^S) (figure 4.23) sur la différence du coût total entre les politiques HCP_**B** et HCP_**BO** (DC(HCP_**B**, HCP_**BO**)). Dans chaque analyse, un seul paramètre de temps varie et tous les autres paramètres de coût et de temps sont fixés à leurs valeurs définies dans le cas de base (voir tableau 4.2).

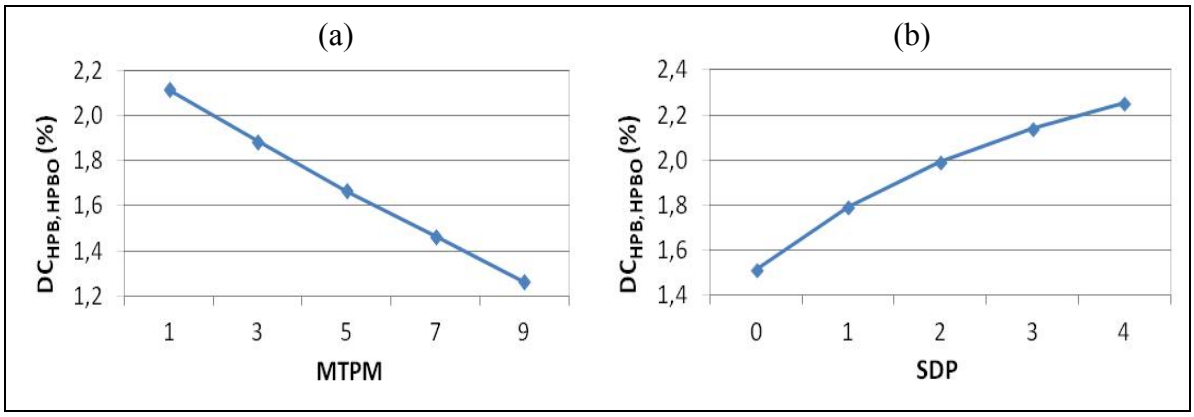


Figure 4.22 Variation de la différence de coût entre les politiques HCP_B et HCP_BO en fonction des durées d'actions de PM (MTPM) et de son écart-type (SDP)

La figure 4.22 (a) montre que l'augmentation de MTPM a pour effet de réduire la valeur de DC(HCP_**B**, HCP_**BO**). L'augmentation de MTPM permet au système de réduire la fréquence

des interventions de PM (T_B^* augmente) qui durent plus longtemps, et d'accroître le niveau de Z_{inv}^* et de a^* ainsi que la valeur de T_O^* pour but d'éviter des coûts supplémentaires de rupture de stock. Ainsi, en plus de la réduction du nombre des interventions de PM, l'augmentation de l'écart entre la durée des opérations de Setup (T^S) et MTPM, diminue la signification de la combinaison des actions de PM avec celles de Setup. D'où la réduction des gains de la maintenance opportuniste.

La variation de SDP a un effet inverse sur la différence de coût entre les deux politiques de commande HCP_**B** et HCP_**BO** que celle du paramètre MTPM. Selon les résultats présentés dans la figure 4.22 (b), la valeur de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ augmente suivant l'augmentation de SDP. Ce phénomène est dû essentiellement au fait que la politique sans opportunisme HCP_**B** a besoin de plus d'inventaires pour faire face à la variabilité du temps moyen des interventions de PM et réduire le risque de pénurie que la politique avec opportunisme HCP_**BO**. Cette dernière augmente la valeur de T_O^* afin de tirer profit des opérations de Setup et de réduire le risque de rupture de stocks, et cela malgré la diminution de la fréquence des actions de PM (T_B^* augmente). Par conséquent, la combinaison des actions de PM avec celles de Setup devient de plus en plus importante avec l'augmentation de SDP, d'où l'augmentation de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$.

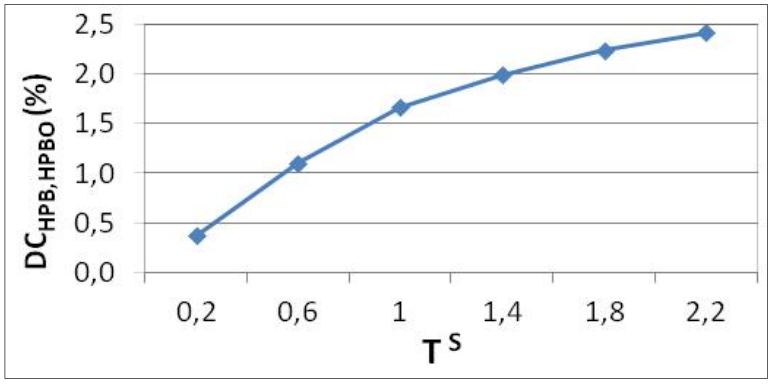


Figure 4.23 Variation de la différence de coût entre les politiques HCP_B et HCP_BO en fonction de T^S

Comme prévu, la valeur de $DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$ augmente lorsque T^S augmente. Ce résultat est justifié par la diminution de l'écart entre la valeur de MTPM et celle de T^S. Ainsi, la combinaison des actions de PM avec celles de Setup devient plus intéressante, puisqu'elle permet au système d'accélérer le processus de restauration du niveau des stocks tampons et réduire d'avantage de risque de pénurie.

4.5.3 Résumé

La politique avec opportunisme HCP_**BO** est plus rentable que la politique sans opportunisme HCP_**B**, et leur différence de coût ($DC(\text{HCP_}\mathbf{B}, \text{HCP_}\mathbf{BO})$) varie selon l'évolution des paramètres du système. Le même résultat est obtenu lorsque qu'une comparaison de la différence de coût est effectuée entre une politique sans opportunisme est son équivalente qui utilise la maintenance opportuniste. Ainsi, les améliorations apportées par la maintenance opportuniste en termes de couts, restent valides pour l'ensemble des politiques sans opportunisme. Cela confirme que l'intégration de la planification de la maintenance dans la planification des stratégies de production est plus avantageuse de point de vue économique.

En conclusion, une étude comparative des différentes politiques de commande combinées est réalisée dans le but de proposer une structure de loi de commande sous-optimale intégrant simultanément la production, le Setup et la maintenance pour un système manufacturier composé d'une seule machine. Cette dernière est sujette à des pannes et des réparations aléatoires et elle est capable de produire deux types de produits finis avec un délai et un coût de Setup non négligeables. Cette étude permet d'étudier l'effet des paramètres de coût et du temps du système sur les paramètres de commande optimaux et le coût total encouru.

En plus de la politique à seuil critique (Hedging point policy HPP), la politiques de commande HCP classique (Hedging Corridor Policy) et de la politique MHCP (Modified Hedging Corridor Policy) telle que présentée dans le deuxième chapitre, trois stratégies de la maintenance préventive (PM) sont adoptées. Il est question de la maintenance de type âge, de type bloc et de type bloc avec sauts dont les interventions de PM sont exécutées soit à la

panne, soit à des intervalles de temps prédéterminé, à condition que le temps écoulé depuis la dernière action de maintenance soit supérieur à un seuil de temps donné. En introduisant la notion de la maintenance opportuniste, nous avons développé de nouvelles politiques permettant de réaliser plus d'économie et d'augmenter la satisfaction clientèle. Elles consistent à tirer parti des arrêts du système lors des actions de Setup afin d'exécuter des interventions préventives.

Les résultats obtenus démontrent que la politique avec opportunisme MHCP_BJO (qui combine la stratégie de maintenance de type bloc avec sauts, la stratégie de Setup modifiée et la notion de la maintenance opportuniste) est meilleure que toutes les autres politiques en termes de coût. Cependant, cet avantage est relatif puisque l'amélioration apportée varie selon l'évolution des paramètres du système. Ce travail est réalisé en adoptant une approche intégrant la simulation combinée événement continus / discrets, à des techniques statistiques d'optimisation comme les plans d'expériences, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Cette approche permet d'optimiser expérimentalement les paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru. Des analyses de sensibilité ont été également réalisées.

CONCLUSION

Ce travail a permis de traiter deux problématiques. La première est consacrée à la commande optimale de la production et de la sous-traitance avec plusieurs réponses pour une problématique générale de l'industrie pharmaceutique. Tandis que la deuxième traite les interactions entre des politiques de commande de la production, du Setup (mise en course) et de la maintenance. Le concept de la maintenance opportuniste fut aussi intégré et de nouvelles politiques de commande avec opportunisme ont été développées en vue de réaliser plus d'économie et de croître le niveau de service à la clientèle.

En ce qui concerne le premier chapitre, une politique de commande de la production et de la sous-traitance a été proposée en tenant compte de deux variables dépendantes : le coût et la satisfaction des clients. La considération simultanée du coût comme un critère de décision et de la contrainte de la satisfaction des clients a pour but rejoindre les préoccupations des décideurs. Le système manufacturier considéré est composé de deux installations de fabrication de capacité différente dont chacune est sujette à des pannes et des réparations aléatoires et est capable de fabriquer deux types de produits finis (M_2P_2). De plus, le recourt à la sous-traitance; dont le délai de livraison des commandes urgentes est non-négligeable et aléatoire, est nécessaire pour compenser le manque de capacité de production des installations par rapport à la demande clientèle. Une approche de résolution expérimentale a été utilisée afin d'optimiser les paramètres de commande qui minimisent le coût total tout en respectant la contrainte de la satisfaction des clients. Ainsi, nous avons démontré l'avantage économique de notre politique de commande et de notre approche de résolution en comparaison avec celles proposées par Dror et al. (2009), sur le cas particulier qu'ils ont traité. Des expériences supplémentaires ont été aussi accomplies permettant de déterminer la relation et l'effet du coût de pénurie du produit « générique » et de la satisfaction des clients, sur les paramètres de commande du système.

Pour introduire des stratégies de Setup et de maintenance préventive (PM), nous avons choisis un système manufacturier moins complexe M_1P_2. Il se compose d'une seule machine

capable de produire deux types de produits finis avec un délai et un coût de Setup non négligeables. Cette machine est sujette à des pannes et réparations aléatoires. L'objectif est de trouver une structure de loi de commande sous-optimale intégrant simultanément la production, le Setup et la maintenance préventive. La deuxième partie de notre travail s'inscrit dans ce sens. Elle consiste à des études comparatives effectuées dans le but d'étudier l'effet d'une large gamme de configurations du système sur les paramètres optimaux des différentes politiques de commande considérées minimisant le coût total encouru. La complexité du problème nous a conduis à le diviser en trois chapitres en débutant par analyser des situations plus simples jusqu'à la considération de toutes les interactions des politiques de commande présentées ci-dessus. Le deuxième chapitre consiste en deux politiques de commande basées sur des stratégies de production et de Setup (HCP et MHCP) déjà proposées dans la littérature scientifique. Des analyses de comparaison plus profondes ont été menées pour tirer des conclusions méthodiques montrant ainsi que la politique de commande MHCP est plus économique que la politique HCP. Toutefois, leur différence de coût diminue dans certaines situations comme l'augmentation du coût de pénurie, du temps de Setup et du temps moyen des actions de la maintenance corrective. Par la suite, dans le troisième chapitre, nous avons étendu les politiques de commande étudiées dans le deuxième chapitre par l'intégration de deux stratégies de maintenance basées sur le niveau des stocks tampons. Enfin, dans le quatrième chapitre, en plus de tenir en compte d'autres stratégies de maintenance basées sur l'âge de la machine, de nouvelles extensions ont été développées par l'entremise du concept de la maintenance opportuniste. Ce concept consiste à tirer profit des arrêts de l'activité de production lors des actions de Setup afin d'accomplir les interventions de maintenance préventive. Les résultats obtenus démontrent que la politique combinant la stratégie de maintenance de type bloc avec sauts, la stratégie de Setup modifiée (MHCP) et le concept de la maintenance opportuniste est la plus avantageuse en termes de coût. Cependant, cet avantage est relatif puisque l'amélioration apportée varie selon l'évolution des paramètres du système.

Une approche expérimentale est utilisée dans les deux parties de ce mémoire. Elle intègre des techniques d'optimisation statistiques telles que les plans d'expérience, l'analyse de la

variance et la méthodologie de surface de réponse, avec l'outil de la simulation. Ce dernier permet d'élaborer une représentation fidèle du comportement stochastique et dynamique du système, de relaxer plusieurs hypothèses simplificatrices utilisées par les méthodes de résolution analytique et d'évaluer la performance du système. Les modèles de simulation développés dans ce travail sont combinés par événements continu/discret en utilisant logiciel ARENA de Rockwell Automation. En outre, ces modèles utilisent soit les routines C++ (chapitres 2, 3 et 4), soit le gabarit Flow Process avec à des sous-programmes écrits en VBA (chapitre 1). Le choix de cette approche repose essentiellement sur la continuité des flux de production, la nature impulsive de la dynamique du système manufacturier et sur sa capacité à raccourcir énormément le temps d'exécution par rapport aux modèles discrets (Lavoie et autres, 2010). Des analyses de sensibilité ont été également réalisées confirmant la robustesse et l'efficacité de l'approche adoptée, et certains comportements intéressants ont été observés. Toutefois, en plus des résultats économiques, il est important de tenir compte de la complexité d'implantation de la politique de commande considérée afin de sélectionner celle la plus pertinente. Plusieurs extensions possibles des modèles étudiés peuvent être envisagées en considérant d'autres aspects liés au contexte industriel tels que : Une demande aléatoire, une durée de Setup aléatoire, des produits finis de nature périssable avec le temps, etc.

ANNEXE I

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M2P2 IMPARFAITS AVEC SOUS-TRAITANCE

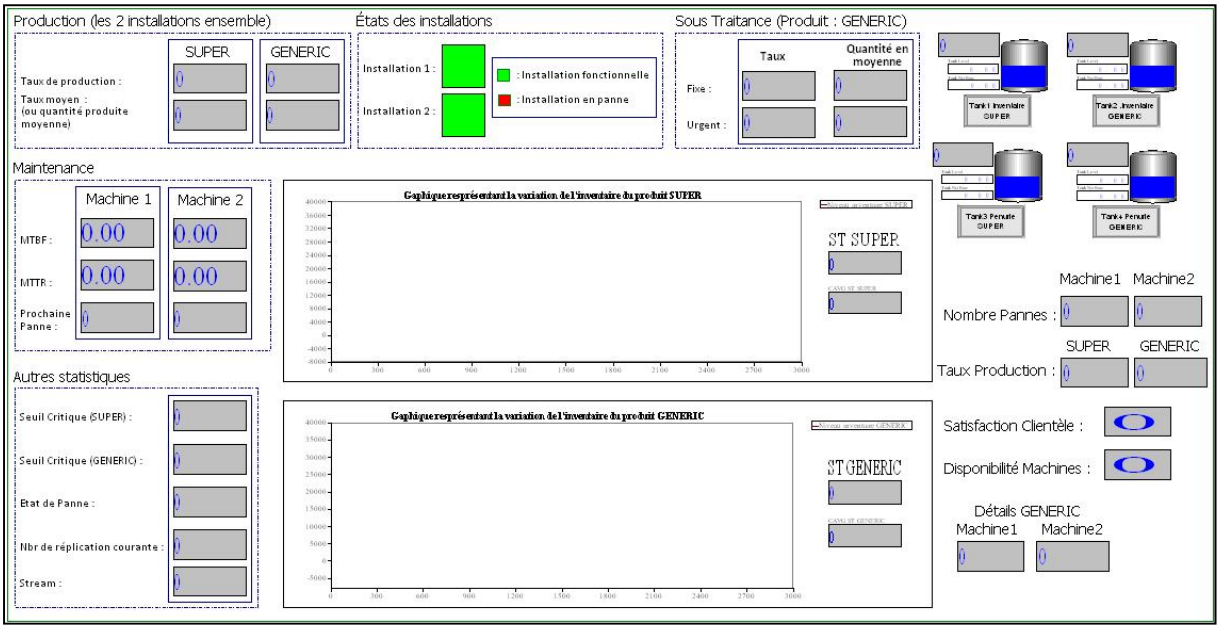


Figure A I-1 Tableau de bord du modèle de simulation développé

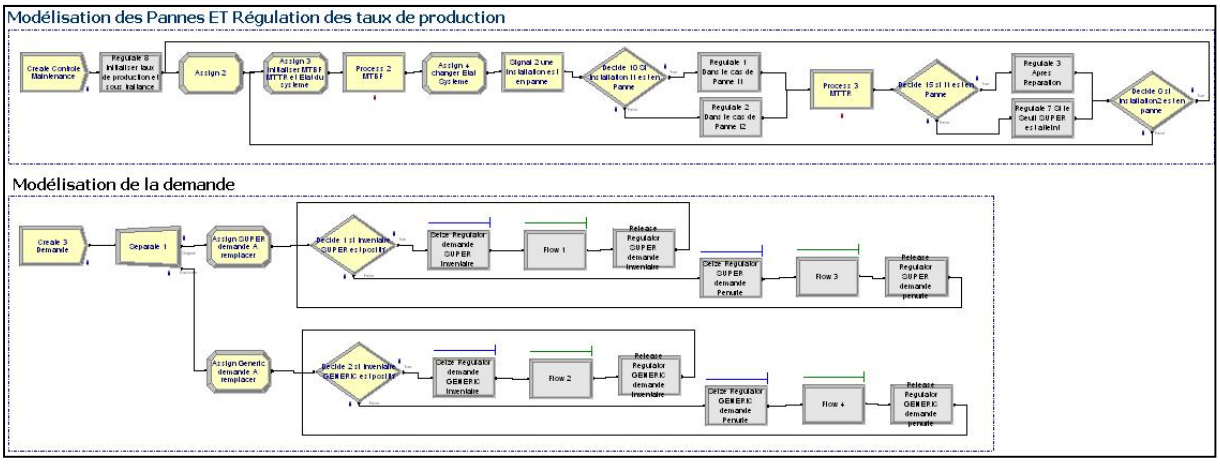


Figure A I-2 Modélisation des pannes, des réparations et de la demande

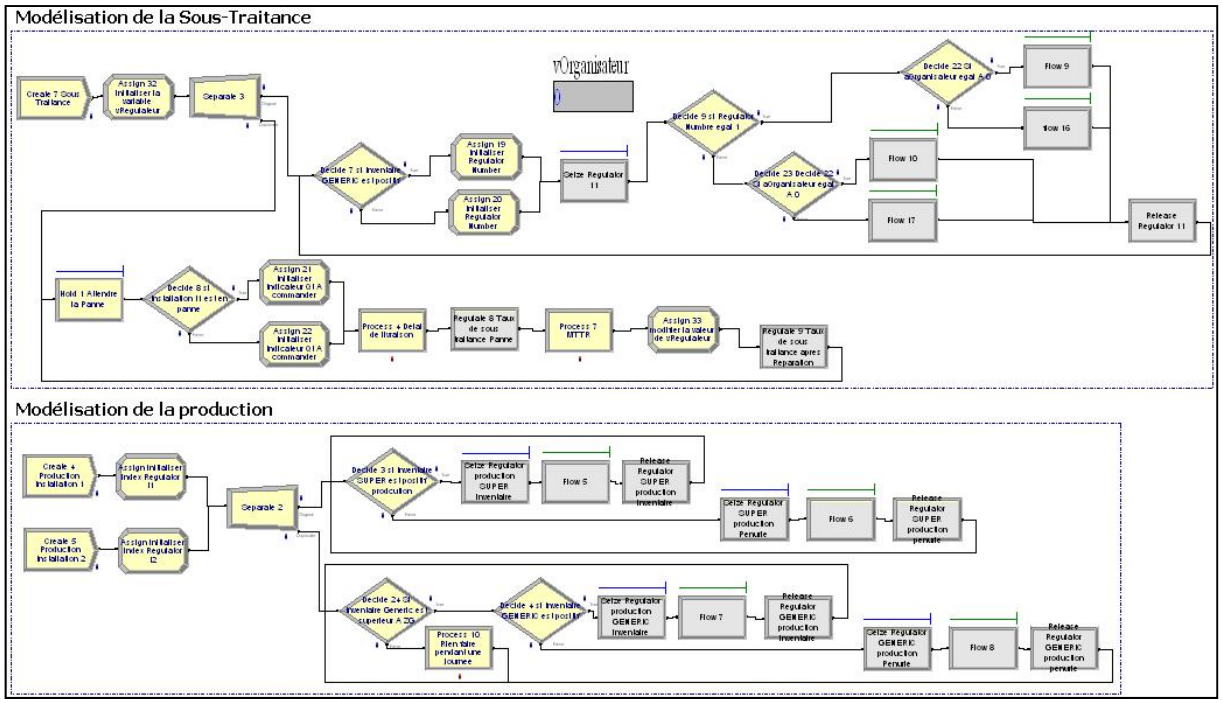


Figure A I-3 Modélisation de la production et de la sous-traitance

Domaine expérimental (Experiment Frame)

PROJECT, "M2P2 avec sous-traitance _ utilisation du Flow Process ","Morad ASSID",,,No, Yes,Yes,Yes,No,No,No,No,No,Yes;

ATTRIBUTES: aMTTR,DATATYPE(Real):
aRegulator_Number,DATATYPE(Real):
aOrganisateur,DATATYPE(Real):
aInstallation_Panne,DATATYPE(Real):
aQuantite_Indicateur,DATATYPE(Real);

STORAGES: Flow 5.Storage:
Flow 4.Storage:
Flow 10.Storage:
Flow 3.Storage:
Flow 17.Storage:
Flow 2.Storage:
Flow 16.Storage:
Flow 9.Storage:
Flow 1.Storage:
Flow 8.Storage:
Flow 7.Storage:
Flow 6.Storage;

VARIABLES:
vZ_Seuil_Critique,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),30000:
vSeuil_Generic,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

vDemande(2),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),2710,2540:
vCapacites_Installations(2),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),3200,1500:
vProduction_SUPER,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vInventaireMoyen_GENERIC,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vQuantite_Totale_SsT_Urgente,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vRegulateur,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vFlag_Inventaire(2),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vInventaireMoyen_SUPER,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vQuantite_Contrat_Fixe,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vMTTR,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vProduction_GENERIC,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vOrganisateur,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),-1:
vFlagPanne,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vPenurieMoyenne_SUPER,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vTempsAvantPanne,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vPenurieMoyenne_GENERIC,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vQuantite_Urgente,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

RESOURCES: Tank4 Penurie GENERIC.Regulator sous Traitance Urgence,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank2 .Inventaire GENERIC positif.Regulator production Installation 1,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank2 .Inventaire GENERIC positif.Regulator production Installation 2,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank2 .Inventaire GENERIC positif.Regulator demande,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank4 Penurie GENERIC.Regulator production Installtion 1,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank4 Penurie GENERIC.Regulator production Installtion 2,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank2 .Inventaire GENERIC.Regulator sous Traitance Fixe,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank1 Inventaire SUPER positif.Regulator production Installation 1,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank1 Inventaire SUPER positif.Regulator production Installation 2,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank3 Penurie SUPER.Regulator production Installtion 1,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank3 Penurie SUPER.Regulator production Installtion 2,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank2 .Inventaire GENERIC.Regulator sous Traitance Urgence,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank1 Inventaire SUPER positif.Regulator demande,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank4 Penurie GENERIC.Regulator demande,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank4 Penurie GENERIC.Regulator Sous Traitance Fixe,,,,,AUTOSTATS(No,,):
Tank3 Penurie SUPER.Regulator demande,,,,,AUTOSTATS(No,,);

REPLICATE, 1,,DaysToBaseTime(1000),Yes,Yes,,,,24,Days,No,No,,,Yes,No;

SENSORS:
Sensor 1,LEVEL(Tank1 Inventaire SUPER,Specific Level,34000),Positive, Sensor 1 .Label,Enabled:

Sensor 2,LEVEL(Tank1 Inventaire SUPER,Specific Level,33999),Negative,Sensor 2.Label,Enabled:
Sensor 3,LEVEL(Tank1 Inventaire SUPER,Percentage Capacity,0),Negative,Sensor 3.Label,Enabled:
Sensor 4,LEVEL(Tank2 .Inventaire GENERIC,Percentage Capacity,0),Negative,Sensor 4.Label,Enabled:
Sensor 5,LEVEL(Tank3 Penurie SUPER,Percentage Capacity,0),Negative,Sensor 5.Label,Enabled:
Sensor 6,LEVEL(Tank4 Penurie GENERIC,Percentage Capacity,0),Negative,Sensor 6.Label,Enabled;

Routine VBA

```
Option Explicit
Dim oModel As Arena.Model
Dim oModule As Arena.Module
Dim oSIMAN As Arena.SIMAN
Dim oExcelApp As Excel.Application
Dim oWorkbook As Excel.Workbook
Dim oWorksheet As Excel.Worksheet
Dim oRange As Excel.Range
Dim sExcelFileName As String
Const SHEETNAME = "Resultats_Simulation"
Dim nReplicationNum As Long
 oSIMAN.RunCurrentReplication

Private Sub ModelLogic_RunBeginSimulation()
Dim iNumCol As Integer
Dim iColIndex As Integer
Dim nIndex As Long
Dim sTag As String
Set oModel = ThisDocument.Model
Set oSIMAN = oModel.SIMAN

On Error GoTo InitExcelError
Set oExcelApp = CreateObject("Excel.application")
sExcelFileName = Mid(oModel.FullName, 1, Len(oModel.FullName) - Len(oModel.Name)) & "DateFile.xlsx"
Set oWorkbook = oExcelApp.Workbooks.Open(sExcelFileName)
On Error GoTo ExcelError
Set oWorksheet = oWorkbook.Worksheets(SHEETNAME)
Set oRange = oWorksheet.Range("Nombre_Replication")
```

```
nReplicationNum = oRange.Cells(1, 1)
Set oRange = oWorksheet.Range("Seuil_SUPER")
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vZ_Seuil_Critique")) =
oRange.Cells(nReplicationNum, 1)
Set oRange = oWorksheet.Range("Seuil_GENERIC")
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vSeuil_Generic")) = oRange.Cells(nReplicationNum,
1)
Set oRange = oWorksheet.Range("Approvisionnement_Fixe")
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vQuantite_Contrat_Fixe")) =
oRange.Cells(nReplicationNum, 1)
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vQuantite_Urgente")) = 0
oExcelApp.DisplayAlerts = False
oExcelApp.Quit
Set oWorkbook = Nothing
Set oWorksheet = Nothing
Set oExcelApp = Nothing
Exit Sub

InitExcelError:
MsgBox ("Error initializing Excel")
Err.Clear
Exit Sub
MsgBox ("Error accessing data from Excel")
Err.Clear
Exit Sub
End Sub

Private Sub ModelLogic_RunEndSimulation()
Set oModel = ThisDocument.Model
Set oSIMAN = oModel.SIMAN
On Error GoTo InitExcelError
Set oExcelApp = CreateObject("Excel.application")
sExcelFileName = Mid(oModel.FullName, 1, Len(oModel.FullName) - Len(oModel.Name)) & "DateFile.xlsx"
Set oWorkbook = oExcelApp.Workbooks.Open(sExcelFileName)

On Error GoTo ExcelError
```

```
Set oWorksheet = oWorkbook.Worksheets(SHEETNAME)
Set oRange = oWorksheet.Range("Nombre_Replication")
nReplicationNum = oRange.Cells(1, 1)

Set oRange = oWorksheet.Range("Resultats")
With oWorksheet
   .Activate
   oRange.Cells(nReplicationNum, 1) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vInventaireMoyen_SUPER"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 2) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vPenurieMoyenne_SUPER"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 3) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vProduction_SUPER"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 4) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vInventaireMoyen_GENERIC"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 5) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vPenurieMoyenne_GENERIC"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 6) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vProduction_GENERIC"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 7) =
oSIMAN.VariableArrayValue(oSIMAN.SymbolNumber("vQuantite_Totale_SsT_Urgente"))
   oRange.Cells(nReplicationNum, 8) = oSIMAN.RunEndTime
End With

oExcelApp.DisplayAlerts = False
oWorkbook.SaveAs ThisDocument.Model.Path & "DataFile.xlsx"
oExcelApp.Quit
Set oWorkbook = Nothing
Set oWorksheet = Nothing
Set oExcelApp = Nothing
Exit Sub
End Sub
```

ANNEXE II

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M1P2 NON-FLEXIBLE UTILISANT LES STRATÉGIES DE SETUP HCP ET MHCP

Domaine expérimental (Experiment Frame)

PROJECT, "M1P2 imparfait avec Setup","Morad ASSID",,,No,Yes,Yes,Yes,No,No,No,No,No,Yes;

CONTINUOUS, 8,,0.0,1,,Euler,Warning;

ATTRIBUTES: aMTTR,DATATYPE(Real):
aMTBF,DATATYPE(Real);
aAlpha_P1,DATATYPE(Real):
aAlpha_P2,DATATYPE(Real):

FILES: DataFile, "DataFile.xlsx", MSExcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(ReadInputs, "Inputs", 2), RECORDSET(WriteOutputs,"Outputs",2);

VARIABLES: vInstant_Pannes(2),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vMTTR_I1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vMTBF_I1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vStream,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vProduit_M1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),1:
vPanneM1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vDureeSETUP,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),1.0:
vSetup_12,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vSetup_21,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real);

SEEDS: 1,,Yes:
2,,Yes:
3,,Yes:
4,,Yes:
5,,Yes:
6,,Yes:
7,,Yes:
8,,Yes:
9,,Yes:
10,,Yes;

PICTURES: pProduction:
pCapteurs;

STATESETS: StateInstallations,Etat_Fonction,Etat_Panne;

RESOURCES: 1,rMachine1,Capacity(1),StateInstallations-Etat_Fonction,Stationary,COST(0.0,0.0,0.0), ,AUTOSTATS(Yes,,);

CSTATS: lSatisfaction_Client,Satisfaction Client,,DATABASE(,"Continuous",,):

```
        lDisponibilite,Disponibilite_Machines,,DATABASE(,"Continuous",,):
        lSN_P1,Negative Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Negative Stock P1"):
        lSN_P2,Negative Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Negative Stock P2"):
        lSP_P1,Positive Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Positive Stock P2"):
        lSP_P2,Positive Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Positive Stock P2"):
        Rate_ST_P1,Total Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Total stock P1"):
        Rate_ST_P2,Total Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Total Stock P2"):
        lFlag_Setup,Arret SETUP,,DATABASE(,"Continuous",,):

REPLICATE,    45,,DaysToBaseTime(500000),Yes,Yes,,,,24,Days,No,No,,,Yes,No;

LEVELS:      1,lST_P1:
        2,lST_P2:
        3,lSP_P1:
        4,lSP_P2:
        5,lSN_P1:
        6,lSN_P2:
        7,lTaux_Production_P1:
        8,lTaux_Production_P2:
        10,lZ_P1:
        11,lZ_P2:
        12,lProduction_Max_M1,5:
        14,lDemande_P1,1.75:
        15,lDemande_P2,1.75:
        16,lFlagPanne:
        17,lSatisfaction_Client:
        18,lDisponibilite:
        19,lFlag_Setup:
        20,lSeuil2_P1:
        21,lSeuil2_P2:

RATES:       1,Rate_ST_P1:
        2,Rate_ST_P2:
        3,Rate_SP_P1:
        4,Rate_SP_P2:
        5,Rate_SN_P1:
        6,Rate_SN_P2:
```

Modèle de simulation

```
41$       CREATE,   1,HoursToBaseTime(0.0),Entity 1:HoursToBaseTime(1),1:NEXT(42$);
42$       ASSIGN:   Create 1.NumberOut=Create 1.NumberOut + 1:NEXT(2$);
2$         READ,     DateFile,RECORDSET(ReadInputs):
                vStream,
                        vPolitique_Indicateur,
                        lZ_P1,
                        lZ_P2,
                aAlpha_P1,
                aAlpha_P2:NEXT(6$);

6$         ASSIGN:       lST_P1=0:
                        lST_P2=0:
                        lFlagPanne=1:
                        lFlag_Setup=0:
```

```
                    STATE(1)=Etat_Fonction:
                    vProduit_M1=1:
                    lSeuil2_P1=aAlpha_P1 * lZ_P1:
                    lSeuil2_P2=aAlpha_P2 * lZ_P2:NEXT(0$);

0$      ASSIGN:     Time of simulation.NumberIn=Time of simulation.NumberIn + 1:
                    Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP+1;
46$     DELAY:      TFIN,,NVA;
93$     ASSIGN:     Time of simulation.NumberOut=Time of simulation.NumberOut + 1:
                    Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP-1:NEXT(3$);

3$      WRITE,      DateFile,RECORDSET(WriteOutputs):
                    TFIN,
                    vSetup_12 + vSetup_21,
                    CAVG(Positive Stock P1),
                    CAVG(Negative Stock P1),
                    CAVG(Taux Production P1),
                    CAVG(Positive Stock P2),
                    CAVG(Negative Stock P2),
                    CAVG(Taux Production P2):NEXT(14$),
                    CAVG(Satisfaction Client),
                    CAVG(Disponibilite_Machines),
                    CAVG(Arret SETUP),
                    vPanneM1,
                    lTaux_Production_P1 / TFIN,
                    lTaux_Production_P1 / TFIN,
                    lSP_P1 / TFIN,
                    lSP_P2 / TFIN,
                    lSN_P1 / TFIN,
                    lSN_P2 / TFIN,
                    lST_P1,
                    lST_P2;
96$     DISPOSE:    Yes;

4$      DETECT:     lST_P1,Negative,(lDemande_P1 * vDureeSETUP),0.01:NEXT(32$);
32$     BRANCH,     1:
                    If, ( lST_P2 >= lSeuil2_P2), 35$,Yes:
                    Else,17$,Yes;
35$     ASSIGN:     lFlag_Setup=1:
                    vProduit_M1=1:
                    vSetup_21=vSetup_21 + 1:NEXT(22$);
100$    DELAY:      vDureeSETUP,,VA;
23$     ASSIGN:     lFlag_Setup=0:NEXT(17$);
17$     ASSIGN:     Dispose 3.NumberOut=Dispose 3.NumberOut + 1;
150$    DISPOSE:    Yes;

7$      DETECT:     lST_P2,Negative,(lDemande_P2 * vDureeSETUP),0.01;
33$     BRANCH,     1:
                    If, ( lST_P1 >= lSeuil2_P1),
                    34$,Yes:
                    Else,17$,Yes;
34$     ASSIGN:     lFlag_Setup=1:
                    vProduit_M1=2:
                    vSetup_12=vSetup_12 + 1:NEXT(22$);
```

```
153$      CREATE,      1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(150),1;
8$        ASSIGN:      vPanneM1=vPanneM1 + 1:
                       aMTBF=EXPO(95,vStream):
                       vMTBF_I1=aMTBF:
                       vInstant_Pannes(1)=TNOW + vMTBF_I1:
                       aMTTR=EXPO(2.5,vStream):
                       vMTTR_I1=aMTTR:NEXT(9$);
158$      DELAY:       aMTBF,,VA;
10$       ASSIGN:      lFlagPanne=lFlagPanne + aInstallation_Panne:
                       STATE(aInstallation_Panne)=Etat_Panne:NEXT(209$);
209$      DELAY:       aMTTR,,VA;
12$       ASSIGN:      lFlagPanne=lFlagPanne - aInstallation_Panne:
                       STATE(aInstallation_Panne)=Etat_Fonction:NEXT(8$);

15$       DETECT:      lST_P1,Positive,lZ_P1,0.01;
25$       BRANCH,      1:
                       If,( lST_P2 <= (lDemande_P2 * vDureeSETUP) ),20$,Yes:
                       Else,17$,Yes;
20$       ASSIGN:      lFlag_Setup=1:
                       vProduit_M1=2:
                       vSetup_12=vSetup_12 + 1:NEXT(22$);

16$       DETECT:      lST_P2,Positive,lZ_P2,0.01;
18$       BRANCH,      1:
                       If,( lST_P1 <= (lDemande_P1 * vDureeSETUP) ),21$,Yes:
                       Else,17$,Yes;
21$       ASSIGN:      lFlag_Setup=1:
                       vProduit_M1=1:
                       vSetup_21=vSetup_21 + 1:NEXT(22$);

24$       DETECT:      lST_P1,Positive,lSeuil2_P1,0.01:NEXT(19$);
19$       BRANCH,      1:
                       If,( lST_P2 <= 0 ) &&,29$,Yes:
                       Else,17$,Yes;
29$       ASSIGN:      lFlag_Setup=1:
                       vProduit_M1=2:
                       vSetup_12=vSetup_12 + 1:NEXT(22$);

27$       DETECT:      lST_P2,Positive,lSeuil2_P2,0.01:NEXT(30$);
30$       BRANCH,      1:
                       If,( lST_P1 <= 0 ),31$,Yes:
                       Else,17$,Yes;
31$       ASSIGN:      lFlag_Setup=1:
                       vProduit_M1=1:
                       vSetup_21=vSetup_21 + 1:NEXT(22$);

36$       DETECT:      lST_P1,Either,0,0.01:NEXT(271$);
271$      DISPOSE:     Yes;
37$       DETECT:      lST_P2,Either,0,0.01:NEXT(271$);
```

Routine C++

```
extern "C" void cdecl cstate  ()
{
  SMREAL       DSTOCK1;
  SMREAL       DSTOCK2;
  SMREAL       dlStock_Total_P1;
  SMREAL       dlStock_Total_P2;
  SMREAL       value_SP1;
  SMREAL       value_SN1;
  SMREAL       value_SP2;
  SMREAL       value_SN2;
  SMREAL       dlTaux_Production_P1;
  SMREAL       dlTaux_Production_P2;
  SMREAL       dlSeuil_Critique_P1;
  SMREAL       dlSeuil_Critique_P2;
  SMREAL       dlProduction_Max_M1;
  SMREAL       dlDemande_P1;
  SMREAL       dlDemande_P2;
  SMREAL       dlFlagPanne;
  SMREAL       dlSatisfaction_Client;
  SMREAL       dlDisponibilite;
  SMREAL       dlFlag_Setup;
  SMREAL       dlSeuil2_P1;
  SMREAL       dlSeuil2_P2;

  static SMINT  lStock_Total_P1              =1;
  static SMINT  lStock_Total_P2              =2;
  static SMINT  lStock_Positif_P1            =3;
  static SMINT  lStock_Positif_P2            =4;
  static SMINT  lStock_Negatif_P1            =5;
  static SMINT  lStock_Negatif_P2            =6;
  static SMINT  lTaux_Production_P1          =7;
  static SMINT  lTaux_Production_P2          =8;
  static SMINT  lSeuil_Critique_P1           =10;
  static SMINT  lSeuil_Critique_P2           =11;
  static SMINT  lProduction_Max_M1           =12;
  static SMINT  lDemande_P1                  =14;
  static SMINT  lDemande_P2                  =15;
  static SMINT  lFlagPanne                   =16;
  static SMINT  lSatisfaction_Client                 =17;
  static SMINT  lDisponibilite               =18;
  static SMINT  lFlag_Setup                  =19;
  static SMINT  lSeuil2_P1                           =20;
  static SMINT  lSeuil2_P2                           =21;

  dlStock_Total_P1 = getss(&lStock_Total_P1);
  dlStock_Total_P2 = getss(&lStock_Total_P2);
  dlTaux_Production_P1 = getd(&lTaux_Production_P1);
  dlTaux_Production_P2 = getd(&lTaux_Production_P2);
  dlSeuil_Critique_P1 = getss(&lSeuil_Critique_P1); // Z1
  dlSeuil_Critique_P2 = getss(&lSeuil_Critique_P2); // Z2
  dlProduction_Max_M1 = getss(&lProduction_Max_M1);
  dlDemande_P1 = getss(&lDemande_P1);
  dlDemande_P2 = getss(&lDemande_P2);
```

```
  dlFlagPanne = getss(&lFlagPanne);
  dlSatisfaction_Client = getss(&lSatisfaction_Client);
  dlDisponibilite = getss(&lDisponibilite);
  dlFlag_Setup = getss(&lFlag_Setup);
  dlSeuil2_P1 = getss(&lSeuil2_P1);          //a1 (Seuil2_P1)
  dlSeuil2_P2 = getss(&lSeuil2_P2);          //a2 (Seuil2_P2)

if (dlTaux_Indicateur == 1)
{
        if (dlFlagPanne == 1)
        {
                dlTaux_Production_P1 = dlProduction_Max_M1;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
        else if (dlFlagPanne == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
}
else if (dlTaux_Indicateur == 2)
{
        if (dlFlagPanne == 1)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = dlProduction_Max_M1;
        }
        else if (dlFlagPanne == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
}
else if (dlTaux_Indicateur == 3)
{
        if (dlFlagPanne == 1)
        {
                dlTaux_Production_P1 = dlDemande_P1;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
        else if (dlFlagPanne == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
                dlTaux_Indicateur = 1;
        }
}
else if (dlTaux_Indicateur == 4)
{
        if (dlFlagPanne == 1)
        {
                 dlTaux_Production_P1 = 0;
                 dlTaux_Production_P2 = dlDemande_P2;
        }
```

```
        else if (dlFlagPanne == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
                dlTaux_Indicateur = 2;
        }
}

if (dlFlag_Setup == 1)
                {
                        dlTaux_Production_P1 = 0;
                        dlTaux_Production_P2 = 0;
                }

DSTOCK1 = dlTaux_Production_P1 - dlDemande_P1;
DSTOCK2 = dlTaux_Production_P2 - dlDemande_P2;
        setd(&lStock_Total_P1, &DSTOCK1);
        setd(&lStock_Total_P2, &DSTOCK2);

if (dlStock_Total_P1 >= 0)
{
        value_SP1 = dlStock_Total_P1;
        value_SN1 = 0;
}
else if (dlStock_Total_P1 < 0)
{
        value_SP1 = 0;
        value_SN1 = -dlStock_Total_P1;
}
setss(&lStock_Positif_P1, &value_SP1);
setss(&lStock_Negatif_P1, &value_SN1);

if (dlStock_Total_P2 >= 0)
{
        value_SP2 = dlStock_Total_P2;
        value_SN2 = 0;
}
else if (dlStock_Total_P2 < 0)
{
        value_SP2 = 0;
        value_SN2 = -dlStock_Total_P2;
}
setss(&lStock_Positif_P2, &value_SP2);
setss(&lStock_Negatif_P2, &value_SN2);

if ((dlStock_Total_P1 < 0) // (dlStock_Total_P2 < 0))
{
        dlSatisfaction_Client = 0;
}
else
{
        dlSatisfaction_Client = 1;
}
setss(&lSatisfaction_Client, &dlSatisfaction_Client);
```

```
if (dlFlag_CMetPM == 1)
        {dlDisponibilite = 1;}
else
        {dlDisponibilite = 0;}
setss(&lDisponibilite, &dlDisponibilite);
}
```

ANNEXE III

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS M1P2 NON-FLEXIBLE ET IMPARFAITS AVEC STRATÉGIE DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE DE TYPE BLOC MODIFIÉ BASÉE SUR LES STOCKS

Domaine expérimental (Experiment Frame)

PROJECT, " M1P2 imparfait avec Setup et Maintenance Préventive, age","MORAD ASSID",,,No,Yes,Yes,Yes,No, No,No,No,No,Yes;

CONTINUOUS, 9,,0.0,0.3,,Euler,Warning;
ATTRIBUTES: aT_Panne,DATATYPE(Real):
aAlpha_P1,DATATYPE(Real):
aAlpha_P2,DATATYPE(Real):
aT_Rep_Cor,DATATYPE(Real):
aT_Restant,DATATYPE(Real):
aMachine_Ind,DATATYPE(Real):
aT_Rep_Pre,DATATYPE(Real);

FILES: DataFile, "DataFile.xlsx",MSExcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(ReadInput,"Inputs",2), RECORDSET(WriteOutputs,"Outputs",2);
VARIABLES: vT_Restant,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vPolitique_Indicateur,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vT_Panne,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vNombre_PM_Annule,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vT_Rep_Pre,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vStream,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vProduit_M1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),1:
vProduit_M2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),2:
vDureeSETUP,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0.8:
vNombre_PM_M1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vPanneM1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vPanneM2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real),0:
vSetup_12,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vAlpha_Zpm,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vSetup_21,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
vT_Rep_Cor,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

SEEDS: 1,,Yes:
2,,Yes:
3,,Yes:
4,,Yes:
5,,Yes:
6,,Yes:
7,,Yes:

```
        8,,Yes:
        9,,Yes:
        10,,Yes;

PICTURES:  pMaintenance:
        pCapteurs;

STATESETS:    StateInstallations,Etat_Fonction,Etat_CM,Etat_PM;
RESOURCES:    1,rMachine1,Capacity(1),StateInstallations-Etat_Fonction,Stationary,COST(0.0,0.0,0.0),,
AUTOSTATS(Yes,,);

CSTATS:       lSatisfaction_Client,Satisfaction Client,,DATABASE(,"Continuous",,):
        lSN_P1,Negative Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Negative Stock P1"):
        lSN_P2,Negative Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Negative Stock P2"):
        lSP_P1,Positive Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Positive Stock P2"):
        lSP_P2,Positive Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Positive Stock P2"):
        Rate_ST_P1,Total Stock P1,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Total stock P1"):
        Rate_ST_P2,Total Stock P2,,DATABASE(,"Continuous","User Specified","Total Stock P2"):
        lDisponibilite,Disponibilite_Machines,,DATABASE(,"Continuous",,):
        lFlag_Setup,Arret SETUP,,DATABASE(,"Continuous",,):

REPLICATE,    135,,HoursToBaseTime(500000),Yes,Yes,,,,24,Hours,No,No,,,Yes,No;

LEVELS:       1,lST_P1:
        2,lST_P2:
        3,lSP_P1:
        4,lSP_P2:
        5,lSN_P1:
        6,lSN_P2:
        7,lTaux_Production_P1:
        8,lTaux_Production_P2:
        9,lDisponibilite,:
        10,lZ_P1:
        11,lZ_P2:
        12,lProduction_Max_M1,58:
        14,lDemande_P1,20:
        15,lDemande_P2,20:
        16,lFlag_CMetPM,1:
        17,lSatisfaction_Client:
        19,lFlag_Setup:
        20,lSeuil2_P1:
        21,lSeuil2_P2:
        22,lT_PM:
        30,lTaux_Indicateur;

RATES:        1,Rate_ST_P1:
        2,Rate_ST_P2:
        3,Rate_SP_P1:
        4,Rate_SP_P2:
        5,Rate_SN_P1:
        6,Rate_SN_P2:
        7,RTaux_P1:
        8,RTaux_P2:
        9,RDisponibilite,;
```

Modèle de simulation

```
48$     CREATE,     1,HoursToBaseTime(0.0),Entity 1:HoursToBaseTime(1),1;
2$      READ,       DateFile,RECORDSET(ReadInput):
                    vStream,
                    vPolitique_Indicateur,
                    lT_PM,
                    lZ_P1,
                    lZ_P2,
                    aAlpha_P1,
                    aAlpha_P2,
                    vAlpha_Zpm;
6$      ASSIGN:     lST_P1=0:
                    lST_P2=0:
                    lFlag_Setup=0:
                    vProduit_M1=1:
                    lSeuil2_P1=aAlpha_P1 * lZ_P1:
                    lSeuil2_P2=aAlpha_P2 * lZ_P2:
                    aT_Restant=lT_PM:
                    vT_Restant=aT_Restant:
53$     DELAY:      TFIN,,NVA;
3$      WRITE,      DateFile,RECORDSET(WriteOutputs):
                    TFIN,
                    vNombre_PM_Annule,
                    vNombre_PM_M1,
                    vPanneM1,
                    vSetup_12 + vSetup_21,
                    CAVG(Positive Stock P1),
                    CAVG(Negative Stock P1),
                    CAVG(Taux Production P1):NEXT(5$);
                    CAVG(Positive Stock P2),
                    CAVG(Negative Stock P2),
                    CAVG(Taux Production P2):NEXT(13$);
                    CAVG(Satisfaction Client),
                    CAVG(Disponibilite_Machines),
                    CAVG(Arret SETUP),
103$    DISPOSE:    Yes;
4$      DETECT:     lST_P1,Negative,(lDemande_P1 * vDureeSETUP),0.01;
31$     BRANCH,     1:
                    If,
                    (( lTaux_Indicateur == 2 ) ||  ( lTaux_Indicateur == 4 ) ) && ( lST_P2 >= lSeuil2_P2),
                    34$,Yes:
                    Else,157$,Yes;
34$     ASSIGN:     lTaux_Indicateur=1:
                    lFlag_Setup=1:
                    vSetup_21=vSetup_21 + 1;
107$    DELAY:      vDureeSETUP,,VA;
22$     ASSIGN:     lFlag_Setup=0:NEXT(157$);
157$    DISPOSE:    Yes;
7$      DETECT:     lST_P2,Negative,(lDemande_P2 * vDureeSETUP),0.01;
32$     BRANCH,     1:
                    If,
                    (( lTaux_Indicateur == 1 ) ||  ( lTaux_Indicateur == 3 ) ) && ( lST_P1 >= lSeuil2_P1),
                    33$,Yes:
```

```
                Else,157$,Yes;
33$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=2:
                lFlag_Setup=1:
                vSetup_12=vSetup_12 + 1:NEXT(22$);
160$        CREATE,       1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(150),1;
8$          ASSIGN:       aT_Panne=LOGN(120,24,vStream):
                vT_Panne=aT_Panne:
                aT_Rep_Cor=LOGN(10,1.6,vStream+5):
                vT_Rep_Cor=aT_Rep_Cor:
                aT_Rep_Pre=LOGN(7,1,vStream+5):
                vT_Rep_Pre=aT_Rep_Pre:
                lFlag_CMetPM=1:
                STATE(aMachine_Ind)=Etat_Fonction:NEXT(40$);
40$         BRANCH,       1:
                If,( aT_Panne >= aT_Restant ),167$,Yes:
                Else, 271$,Yes;
167$        DELAY:        aT_Restant,,VA;
46$         BRANCH,       1:
                If,( lST_P1 + lST_P2 ) >= ( Z3 ),43$,Yes:
                Else,47$,Yes;
43$         ASSIGN:       vNombre_PM_M1=vNombre_PM_M1 + 1:
                lFlag_CMetPM=0:
                STATE(aMachine_Ind)=Etat_PM:…
220$        DELAY:        aT_Rep_Pre,,VA;
47$         ASSIGN:       vNombre_PM_Annule=vNombre_PM_Annule + 1:
                aT_Panne=aT_Panne - aT_Restant:
                vT_Panne=aT_Panne:…
271$        DELAY:        aT_Panne,,VA;
10$         ASSIGN:       vPanneM1=vPanneM1 + 1:
                lFlag_CMetPM=0:
                STATE(aMachine_Ind)=Etat_CM:…
322$        DELAY:        aT_Rep_Cor,,VA;
44$         BRANCH,       1:
                If,aT_Restant < 0,45$,Yes:
                Else,8$,Yes;
45$         ASSIGN:       vNombre_PM_Annule=vNombre_PM_Annule + 1:…
14$         DETECT:       lST_P1,Positive,lZ_P1,0.01;
38$         BRANCH,       1:
                If,( vPolitique_Indicateur == 1 ),24$,Yes:
                Else,19$,Yes;
24$         BRANCH,       1:
                If,( lST_P2 <= (lDemande_P2 * vDureeSETUP) ),19$,Yes:
                Else,25$,Yes;
19$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=2:
                lFlag_Setup=1:
                vSetup_12=vSetup_12 + 1;
25$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=3;
15$         DETECT:       lST_P2,Positive,lZ_P2,0.01:NEXT(39$);
39$         BRANCH,       1:
                If,( vPolitique_Indicateur == 1 ),17$,Yes:
                Else,20$,Yes;
17$         BRANCH,       1:
                If,( lST_P1 <= (lDemande_P1 * vDureeSETUP) ),20$,Yes:
                Else,27$,Yes;
```

```
20$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=1:
                          lFlag_Setup=1:
                          vSetup_21=vSetup_21 + 1:NEXT(21$);
23$         DETECT:       lST_P1,Positive,(lSeuil2_P1),0.01:NEXT(18$);
18$         BRANCH,        1:
                          If,( lST_P2 <= 0 ),28$,Yes:
                          Else,16$,Yes;
28$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=2:
                          lFlag_Setup=1:
                          vSetup_12=vSetup_12 + 1:NEXT(21$);
26$         DETECT:       lST_P2,Positive,(lSeuil2_P2),0.01;
29$         BRANCH,        1:
                          If,( lST_P1 <= 0 ),30$,Yes:
                          Else,16$,Yes;
30$         ASSIGN:       lTaux_Indicateur=1:
                          lFlag_Setup=1:
                          vSetup_21=vSetup_21 + 1:NEXT(21$);
35$         DETECT:       lST_P1,Either,0,0.01:NEXT(386$);
386$         DISPOSE:      Yes;
36$         DETECT:       lST_P2,Either,0,0.01:NEXT(386$);
```

Routine C++

```
extern "C" void cdecl cstate  ()
{
  SMREAL       DSTOCK1;
  SMREAL       DSTOCK2;
  SMREAL       value_SP1;
  SMREAL       value_SN1;
  SMREAL       value_SP2;
  SMREAL       value_SN2;
  SMREAL       dlStock_Total_P1;
  SMREAL       dlStock_Total_P2;
  SMREAL       dlTaux_Production_P1;
  SMREAL       dlTaux_Production_P2;
  SMREAL       dlSeuil_Critique_P1;
  SMREAL       dlSeuil_Critique_P2;
  SMREAL       dlProduction_Max_M1;
  SMREAL       dlDemande_P1;
  SMREAL       dlDemande_P2;
  SMREAL       dlFlag_CMetPM;
  SMREAL       dlSatisfaction_Client;
  SMREAL       dlDisponibilite;
  SMREAL       dlFlag_Setup;
  SMREAL       dlSeuil2_P1;
  SMREAL       dlSeuil2_P2;

  static SMINT  lStock_Total_P1              =1;
  static SMINT  lStock_Total_P2              =2;
  static SMINT  lStock_Positif_P1            =3;
  static SMINT  lStock_Positif_P2            =4;
  static SMINT  lStock_Negatif_P1            =5;
  static SMINT  lStock_Negatif_P2            =6;
```

```
  static SMINT  lTaux_Production_P1       =7;
  static SMINT  lTaux_Production_P2       =8;
  static SMINT  lSeuil_Critique_P1        =10;
  static SMINT  lSeuil_Critique_P2        =11;
  static SMINT  lProduction_Max_M1        =12;
  static SMINT  lDemande_P1               =14;
  static SMINT  lDemande_P2               =15;
  static SMINT  lFlag_CMetPM              =16;
  static SMINT  lSatisfaction_Client                =17;
  static SMINT  lDisponibilite            =18;
  static SMINT  lFlag_Setup               =19;
  static SMINT  lSeuil2_P1                          =20;
  static SMINT  lSeuil2_P2                          =21;

  dlStock_Total_P1 = getss(&lStock_Total_P1);
  dlStock_Total_P2 = getss(&lStock_Total_P2);
  dlTaux_Production_P1 = getd(&lTaux_Production_P1);
  dlTaux_Production_P2 = getd(&lTaux_Production_P2);
  dlSeuil_Critique_P1 = getss(&lSeuil_Critique_P1); // Z1
  dlSeuil_Critique_P2 = getss(&lSeuil_Critique_P2); // Z2
  dlProduction_Max_M1 = getss(&lProduction_Max_M1);
  dlDemande_P1 = getss(&lDemande_P1);
  dlDemande_P2 = getss(&lDemande_P2);
  dlFlag_CMetPM = getss(&lFlag_CMetPM);
  dlSatisfaction_Client = getss(&lSatisfaction_Client);
  dlDisponibilite = getss(&lDisponibilite);
  dlFlag_Setup = getss(&lFlag_Setup);
  dlSeuil2_P1 = getss(&lSeuil2_P1);         //a1 (Seuil2_P1)
  dlSeuil2_P2 = getss(&lSeuil2_P2);         //a2 (Seuil2_P2)

if (dlTaux_Indicateur == 1)
{
        if (dlFlag_CMetPM == 1)
        {
                dlTaux_Production_P1 = dlProduction_Max_M1;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
        else if (dlFlag_CMetPM == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
        }
}
else if (dlTaux_Indicateur == 2)
{
        if (dlFlag_CMetPM == 1)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = dlProduction_Max_M1;
        }
        else if (dlFlag_CMetPM == 2)
        {
                dlTaux_Production_P1 = 0;
                dlTaux_Production_P2 = 0;
```

```
		}
}
else if (dlTaux_Indicateur == 3)
{
		if (dlFlag_CMetPM == 1)
		{
			dlTaux_Production_P1 = dlDemande_P1;
			dlTaux_Production_P2 = 0;
		}
		else if (dlFlag_CMetPM == 2)
		{
			dlTaux_Production_P1 = 0;
			dlTaux_Production_P2 = 0;
			dlTaux_Indicateur = 1;
		}
}
else if (dlTaux_Indicateur == 4)
{
		if (dlFlag_CMetPM == 1)
		{
			 dlTaux_Production_P1 = 0;
			 dlTaux_Production_P2 = dlDemande_P2;
		}
		else if (dlFlag_CMetPM == 2)
		{
			dlTaux_Production_P1 = 0;
			dlTaux_Production_P2 = 0;
			dlTaux_Indicateur = 2;
		}
}

if (dlFlag_Setup == 1)
			{
				dlTaux_Production_P1 = 0;
				dlTaux_Production_P2 = 0;
			}

DSTOCK1 = dlTaux_Production_P1 - dlDemande_P1;
DSTOCK2 = dlTaux_Production_P2 - dlDemande_P2;
		setd(&lStock_Total_P1, &DSTOCK1);
		setd(&lStock_Total_P2, &DSTOCK2);

if (dlStock_Total_P1 >= 0)
{
		value_SP1 = dlStock_Total_P1;
		value_SN1 = 0;
}
else if (dlStock_Total_P1 < 0)
{
		value_SP1 = 0;
		value_SN1 = -dlStock_Total_P1;
}
setss(&lStock_Positif_P1, &value_SP1);
setss(&lStock_Negatif_P1, &value_SN1);
```

```
if (dlStock_Total_P2 >= 0)
{
        value_SP2 = dlStock_Total_P2;
        value_SN2 = 0;
}
else if (dlStock_Total_P2 < 0)
{
        value_SP2 = 0;
        value_SN2 = -dlStock_Total_P2;
}
setss(&lStock_Positif_P2, &value_SP2);
setss(&lStock_Negatif_P2, &value_SN2);

if ((dlStock_Total_P1 < 0) // (dlStock_Total_P2 < 0))
{
        dlSatisfaction_Client = 0;
}
else
{
        dlSatisfaction_Client = 1;
}
setss(&lSatisfaction_Client, &dlSatisfaction_Client);

if (dlFlag_CMetPM == 1)
        {dlDisponibilite = 1;}
else
        {dlDisponibilite = 0;}
setss(&lDisponibilite, &dlDisponibilite);
}
```

BIBLIOGRAPHIE

Akella, R., & Kumar, P.R. (1986). Optimal Control of Production Rate in a Failure Prone Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(2), p. 116-126.

Archibald, T. W. & Dekker, R., (1996), Modified block-replacement for multiple-component systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 45(1), p. 75-83.

Ayed, S., Dellagi, S., & Rezg, N. (2011). Joint optimisation of maintenance and production policies considering random demand and variable production rate. *International Journal of Production Research*. p. 1-16.

Bai, S.X., & Elhafsi, M. (1997). Scheduling of an unreliable manufacturing system with non-resumable set-ups. *Computers Ind. Eng*., 32, p. 909-925.

Barlow R.E. & Proschan F. (1965), *Mathematical theory of reliability*, New York : John Wiley & Sons.

Barlow, R. E. & Hunter, L. (1960), Optimal preventive maintenance policies. *Operations Research*, 8, p. 90-100.

Ben-Daya, M. 1999. Integrated production maintenance and quality model for imperfect processes. *IIE transactions*, 31 (6), p. 491-501.

Berg, M. & Epstein B., (1976), A modified block replacement policy. *Naval Research Logistics Quarterly*, 23, p. 15-24.

Berk, E., & Moinzadeh, K. (2000). Analysis of maintenance policies for M machines with deteriorating performance. *IIE Transactions*, 32, p. 433–444.

Berthaut, F., Gharbi, A. & Dhouib, K. (2011). Joint modified block replacement and production/inventory control policy for a failure-prone manufacturing cell. *Omega*, 39(1), p. 642-654.

Berthaut, F., Gharbi, A., Kenné, J. P., & Boulet, J. F. (2010). Improved joint preventive maintenance and hedging point policy. *International Journal of Production Economics*, 127(1), p. 60-72.

Bhat, B. R. (1969), Used Item Replacement Policy, *Journal of Applied Probability,* 6, p. 309-318.

Booth, R. (1996). The role of supply-chain re-engineering in the pharmaceutical industry. Logistics information management. 9(3), p. 4-10.

Bouillaut, L., & Aknin P. 2007. « Maintenance de l'Infrastructure Ferroviaire : Etat Actuel et Perspectives, Pôle Diagnostic et Maintenance des systèmes de transport ». Forum NTIC&T : Maintenance et Transports.

Boukas, E.K., & Haurie, A. (1990). Manufacturing Flow Control and Preventive Maintenance: A Stochastic Control Approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(9), p. 1024-1031.

Boulet, J. F., Gharbi, A. & Kenné J. P. 2007. « Amélioration d'une politique combinée de maintenance et de contrôle d'inventaire dans un contexte manufacturier ». *7ème congrès international de génie industriel* (Trois-rivière, juin 5-8 2007).

Budai, G., Dekker, R., & Nicolai, R.P. 2006. A review of planning models for maintenance and production. *Economic Institute report*.

Caramanis, M., & Sharifnia, A. (1991). Near Optimal Manufacturing Flow Controller Design. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3, p. 321-336.

De Garmo, E.P., Sullivan, W.G. & Bontadelli, J.A. 1989. *Engineering Economy*. 8e éd. New York : MacMillan.

Degbotse, A. T., & Nachlas, J. A. 2003. Use of Nested Renewals to Model Availability Under Opportunistic Maintenance Policies. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, p. 344-350.

Dekker, R., Wildeman, E. R., & Van Der Duyn Schouten, A. F. (1997). A Review of Multi-Component Maintenance Models with Econoic Dependance. *Mathematical Methods of Operations Research*, 45(3), p. 411-435.

Dellagi, S., Rezg, N., & Xie, X. (2007). Preventive maintenance of manufacturing systems under environmental constraints. *International Journal of Production Research*, 45(5), p. 1233-1254.

Derigent, W., Thomas, E., Levrat E., & Iung, B. 2009. Opportunistic maintenance based on fuzzy modeling of component proximity. *Annals of the CIRP,* 58 (1), p. 29–32.

Dror, M., Smith, K. R., & Yano, C. A. (2009). Deux Chemicals Inc. Goes Just-in-Time. *Interfaces*, 39(6), p. 503–515.

Feng, Y. & Yan, H. (2000). Optimal Production Control in a Discrete Manufacturing System with Unreliable Machines and Random Demands. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(11), p. 2280-2296.

Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2003). Optimal production control problem in stochastic multiple-product multiple-machine manufacturing systems. *IEEE Transactions*, 31, p. 941-952.

Gharbi, A., Hajji, A., & Dhouib, K., (2011). Production rate control of an unreliable manufacturing cell with adjustable capacity. *International Journal of Production Research*, 49(21), p. 6539-6557.

Gharbi, A., Kenné, J. P. & Beit, M. (2007). Optimal safety stocks and preventive maintenance periods in unreliable manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 107, p. 422–434.

Gharbi, A., Kenné, J. P., & Hajji, A., (2006). Operational level-based policies in production rate control of unreliable manufacturing systems with set-ups. *International Journal of Production Research*, 44 (3), p. 545-567.

Hajji, A., Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2004). Production and set-up control of a failure-prone manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 42 (6), p. 1107-1130.

Jhang, J. P., & Sheu, S., H. 1999. Opportunity-based age replacement policy with minimal repair. *Reliability Engineering and System Safety*, 64, p. 339–344.

Kaplan WA, & Laing R. (2005). *Local production of pharmaceuticals: Industrial policy and access to medicines. An overview of key concepts, issues and opportunities for future research. HNP Discussion Papers*. World Bank, Washington DC.

Kelton, W. David, Randall P. Sadowski, & David T. Sturrock. 2007. *Simulation with Arena*. 4th edition. New York : The McGraw-Hill Companies, 630 p.

Kenné, J. P. & Gharbi, A. (1999). Experimental design in production and maintenance control problem of a single machine, single product manufacturing system. International Journal of Production Research, 37 (3), p. 621-637.

Kenné, J. P. & Gharbi, A. (2000). Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control*, 11 (6), p. 581-588.

Kimemia, J. & Gershwin, S.B. (1983). An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System. *IIE Transactions*, 15(4), p. 353-362.

Koren, Y., Jovane, F., Heisel, U., Moriwaki,, T., Pritschow G., Ulsoy G., & VanBrussel, H. (1999) Reconfigurable Manufacturing Systems. *A Keynote paper. CIRP Annals*, 48 (2), p. 6-12.

Kushner, H.J., & Dupuis, P.G., (1992). *Numerical Methods for Stochastic Control Problems in Continuous Time*. New York: Springer-Verlag.

Lavoie, P., Gharbi, A. & Kenné, J. P. (2010). A comperative study of pull control mechanisms for unreliable homogenous transfer lines. *International Journal of Production Economics*, 124, p. 241–251.

Lavoie, P., Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2007). Production control and combined discrete / continuous simulation modeling in failure-prone transfer lines. *International Journal of Production Research*, 45(24), p. 5667-5685.

Levrat, E., Thomas, E., & Iung, B. (2008). Odds-based decision-making tool for opportunistic production-maintenance synchronisation. *International Journal of Production Research*, 46(19), p. 5263–5287.

Montgomery, D.C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*, 7th ed., New York : John Wiley & Sons.

Mourani, I., Hennequin, S., & Xie, X. (2008). Simulation-based optimization of a single-stage failure-prone manufacturing system with transportation delay. *International Journal of Production Economics*, 112(1), p. 26-36.

Murthy, D.N.P. & Nguyen D.G. (1982), A note on extended block replacement policy with used items. *Journal of Applied Propability*, 9 (4), p. 885-889.

Olsder, G. J., & Suri, R. (1980). Time-optimal control of parts-routing in a manufacturing system with failure-prone machines. *Proceedings of the 19th conference on decision and control*. Albuquerque, NM.

Ouali, M.S., Ait-Kadi, D., & Gharbi, A . (1999). « A Simulation Model for Opportunistic Maintenance Strategies », *7 th IEEE International Conference On Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'99*, 18-22 octobre Barcelona - Spain (CD-ROM).

Pegden, C. D., Shannon, R. E., Sadowski, R. P., & Corp, S. M. (1995). *Introduction to simulation using SIMAN* : McGraw-Hill.

Pham, H., & Wang, H. 2000. Optimal opportunistic maintenance of a k-out-of-n system with imperfect PM and partial failure, *Naval Research Logistics*, 47, p. 223-239.

Richel, R. (1975). Dynamic programming and minimum principles for systems with jump Markov disturbances. *SIAM Journal on Control*, 13, p. 338–371.

Sethi, S. P., & Zhang, Q., (1999). Average-Cost Optimal Policies for an Unreliable Flexible Multiproduct Machine. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, p. 147–157.

Sharifnia, A. (1988). Production Control of a Manufacturing System with Multiple Machine States. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-33(7), p. 600–626.

Tango T. (1979). A modified block replacement policy using less reliable items. *IEEE Transactions on Reliability*, 28 (5), p. 400–401.

The Bureau of Labor Statistics is considering a redesign of the *Career Guide to Industries* (*CGI*) to integrate it better with the new *Occupational Outlook Handbook* and to make it easier for customers to find career information from an industry perspective.

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European *Journal of Operational Research*, 139, p. 469–489.

Whittle, P. (1996). *Optimal Control : Basics and Beyond*. New York : John Wiley & Sons, 474 p.

Yan, H., & Zhang, Q., (1997). A numerical method in optimal production and setup scheduling of stochastic manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(10), p. 1452–1455.