

Commande optimale stochastique des systèmes
manufacturiers en boucle fermée sous contrôle des émissions
de gaz à effet de serre (GES)

par

Armel Leonel KUEGOUA TAKENGNY

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 13 DÉCEMBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Armel Leonel Kuegoua Takengny, 2021



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Pierre Kenné, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ali Gharbi, codirecteur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 02 DÉCEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Kenné qui n'a ménagé aucun effort pour m'accompagner tout au long de ce travail, ainsi qu'à mon codirecteur le professeur Ali Gharbi. Leur disponibilité, conseils dédiés, confiance et soutien financier ont été précieux et déterminants pour mener à bien ce projet de recherche. Je tiens aussi à vous dire merci pour tous les commentaires qui m'ont fait grandir sur le plan professionnel, mais aussi sur le plan personnel.

J'exprime également ma gratitude au professeur Christian Belleau qui a eu la bienveillance de m'honorer en présidant ce jury ainsi qu'au professeur Lucas Hof pour avoir accepté d'examiner ce travail en tant que membre du jury.

Un grand merci et la plus sincère aussi au Canada, au Québec et à l'ÉTS pour leurs bras ouverts.

Mes parents Irène et Éric Kuegoua Takengny, ma famille ainsi qu'à ma copine Muriel-laure, je vous remercie pour vos soins émotionnels et votre soutien inconditionnel. Je chérirai au plus profond de mon cœur, vos sacrifices silencieux et votre amour sans borne. Papa et maman, je vous dédis ce mémoire.

Enfin, à tous ceux-là qui de près ou de loin m'ont soutenu durant ces deux années d'études, je vous témoigne toute ma reconnaissance et ma gratitude.

COMMANDE OPTIMALE STOCHASTIQUE DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS EN BOUCLE FERMÉE SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Armel Leonel KUEGOUA TAKENGNY

RÉSUMÉ

Au fil des ans, les investissements des organismes gouvernementaux et non-gouvernementaux sont beaucoup tournés vers les solutions des menaces que posent les changements climatiques à l'échelle mondiale. Dans l'exemple des pays de l'Amérique du nord, le modèle d'échange de droits d'émission du programme *Western Climate Initiative* (WCI) permet d'agir pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). De plus, pour une consommation responsable de nos ressources naturelles, le concept de l'économie circulaire attire beaucoup d'attention pour répondre à ses préoccupations environnementales. Au Canada, à travers les grandes orientations de la stratégie fédérale de développement durable, son déploiement est de plus en plus croissant, en particulier dans le secteur manufacturier par le biais de la logistique inverse.

Afin de préserver notre environnement, les gestionnaires d'industries manufacturières doivent s'approprier de ces challenges environnementaux dans leur pratique de production sans toutefois perdre de vue l'aspect économique. C'est dans ce cadre, que s'inscrit le travail de ce mémoire visant l'intégration du contrôle des émissions de GES et de la logistique inverse dans la commande des systèmes manufacturiers dans un contexte dynamique stochastique. Les systèmes manufacturiers étudiés sont sujets aux phénomènes aléatoires tels que les pannes et réparations des machines et génèrent les émissions de GES nocives à l'environnement. Le problème de commande devient très complexe avec la prise en compte de tous ces aspects. Les contributions de ce mémoire sont présentées en trois parties.

Dans la première partie, nous considérons que le système manufacturier est constitué d'une machine fabriquant un seul type de produits et supposons que son taux de panne et index d'émission sont constants. L'étude est d'élaborer la politique de commande rétroactive de production incluant le niveau d'émissions dans la prise de décision afin de minimiser le coût total. En plus des coûts de mise en inventaire de produits finis, de pénurie dans le coût total, nous avons aussi pris en compte le coût des émissions excédant la limite maximale imposée par les autorités compétentes. Cependant, en pratique industrielle le système se détériore, alors affecte sa fiabilité et son taux d'émission. Les réparations effectuées suite à la survenue de pannes étant minimales, l'envoi en maintenance préventive est donc nécessaire.

La deuxième partie nous permet d'intégrer dans la première la dégradation progressive du système manufacturier durant son fonctionnement affectant sa fiabilité et son taux d'émission. Nous supposons que le taux de panne et l'index d'émission dépendent de l'âge de la machine. En raison des réparations minimales et l'effet de vieillissement, il est intéressant d'appliquer l'activité de maintenance préventive. Les politiques de commande rétroactives (production et maintenance préventive) sont élaborées dans cette partie afin de minimiser le coût total. En

VIII

plus des coûts de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, le coût des émissions excédant la limite maximale imposée par les autorités compétentes dans le coût total, nous avons intégré le coût de maintenance corrective et préventive.

La dernière partie fait l'objet de l'étude du problème de planification de la production en contexte de logistique inverse sous contrôle de ses émissions de GES. Les politiques de commande rétroactives de production pour un système manufacturier hybride *manufacturing/remufacturing* en boucle fermée sont élaborées afin de minimiser le coût total. La machine de *manufacturing* produisant à partir de la matière première et celle de *remanufacturing* permettant la remise à neuf des produits usagés récupérés sur le marché, nous avons intégré dans le coût total, le coût de *manufacturing* et *remanufacturing*.

Dans ce travail, nous avons utilisé pour la modélisation, d'une part les processus markoviens homogènes et d'autre part, semi-markoviens non homogènes où la dynamique de la machine était affectée par son historique. Une résolution numérique des conditions d'optimum, décrites par les équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB), a conduit à la solution du problème étudié. Pour valider la structure de nos politiques de commande obtenues, une analyse de sensibilité a été faite. Nous avons poursuivi par une étude comparative afin de montrer l'avantage des politiques proposées à celles de la littérature. Enfin, le travail s'achève par une implication managériale pour faciliter la mise en œuvre des résultats obtenus.

Ce mémoire démontre l'importance et la possibilité d'intégrer ces exigences environnementales en matière de réductions des émissions de GES et la valorisation des produits usagés dans la commande des systèmes manufacturiers afin de préserver notre environnement. Sous des hypothèses raisonnables, les résultats obtenus peuvent être bénéficiés à une pluralité de domaines industriels tels que les lignes d'assemblage d'automobiles, de véhicules ferroviaires et des aéronefs, les usines de fabrication de machinerie de construction, d'équipements de manutention et d'extraction minière.

Mots clés : Systèmes manufacturiers, commande optimale stochastique, planification de la production, détérioration, maintenance, boucle fermée, émissions de GES.

STOCHASTIC OPTIMAL CONTROL OF CLOSED-LOOP MANUFACTURING SYSTEMS UNDER GREENHOUSE GAS (GHG) EMISSIONS CONTROL

Armel Leonel KUEGOUA TAKENGNY

ABSTRACT

Over the years, investments by governmental and non-governmental organizations have been heavily focused on addressing the threats posed by global climate change. In the example of North American countries, the emissions trading model of the Western Climate Initiative (WCI) program allows for action to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. In addition, for a responsible consumption of our natural resources, the concept of the circular economy is attracting a lot of attention to address its environmental concerns. In Canada, through the major orientations of the federal sustainable development strategy, its deployment is increasingly growing, especially in the manufacturing sector through reverse logistics.

In order to preserve our environment, managers of manufacturing industries must appropriate these environmental challenges in their production practices without losing sight of the economic aspect. It is within this framework that the work of this thesis aims at integrating the control of GHG emissions and reverse logistics in the control of manufacturing systems in a dynamic stochastic context. The manufacturing systems studied are subject to random phenomena such as machines breakdowns and repairs and generate GHG emissions harmful to the environment. The control problem becomes very complex with the consideration of all these aspects. The contributions of this paper are presented in three parts.

In the first part, we consider that the manufacturing system consists of a machine producing a single type of product and assume that its failure rate and emission index are constant. The study is to develop the production feedback control policy including the emission level in the decision making in order to minimize the total cost. In addition to the cost of inventorying finished products, shortage in the total cost, we also took into account the cost of emissions exceeding the maximum limit imposed by the competent authorities. However, in industrial practice the system deteriorates, so affects its reliability and emission rate. The repairs carried out following the occurrence of breakdowns are minimal, so the sending of preventive maintenance is necessary.

The second part allows us to integrate in the first one the progressive degradation of the manufacturing system during its operation affecting its reliability and its emission rate. We assume that the failure rate and the emission index depend on the age of the machine. Due to the minimal repairs and the aging effect, it is interesting to apply the preventive maintenance activity. Backward control policies (production and preventive maintenance) are developed in this section to minimize the total cost. In addition to the costs of inventorying finished products, shortages, the cost of emissions exceeding the maximum limit imposed by the competent authorities in the total cost, we have integrated the cost of corrective and preventive maintenance.

The last part is the study of the production planning problem in a reverse logistics context under control of its GHG emissions. Backward production control policies for a hybrid closed-loop manufacturing/remanufacturing system are developed to minimize the total cost. Since the manufacturing machine produces from raw material and the remanufacturing machine allows the remanufacturing of used products recovered from the market, we have integrated the cost of manufacturing and remanufacturing in the total cost.

In this work, we used for the modeling, on the one hand, homogeneous Markovian processes and, on the other hand, non-homogeneous semi-Markovian processes where the dynamics of the machine was affected by its history. A numerical resolution of the optimality conditions, described by the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equations, led to the solution of the studied problem. To validate the structure of our obtained control policies, a sensitivity analysis was performed. We continued with a comparative study in order to show the advantage of our proposed policies to those in the literature. Finally, the work ends with a managerial implication to facilitate the implementation of our results.

This thesis demonstrates the importance and the possibility of integrating these environmental requirements in terms of GHG emission reductions and the recovery of used products in the control of manufacturing systems in order to preserve our environment. Under reasonable assumptions, the results obtained can benefit a variety of industrial sectors such as automotive, rail and aircraft assembly lines, construction machinery manufacturing plants, material handling equipment and mining.

Keywords: Manufacturing systems, stochastic optimal control, production planning, deterioration, maintenance, closed loop, GHG emissions.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	5
1.1 Généralités sur les systèmes manufacturiers.....	5
1.2 Commande optimale stochastique des systèmes manufacturiers.....	6
1.2.1 Généralités	6
1.2.2 Politique de commande à seuil critique	7
1.3 Aspect environnemental dans le secteur manufacturier.....	9
1.3.1 Approches réglementaires.....	10
1.3.2 Approches volontaires	12
1.4 Logistique inverse.....	13
1.4.1 Généralités sur la logistique inverse	13
1.4.2 Différents types de configuration d'un réseau de logistique inverse.....	15
1.4.3 Logistique inverse en boucle ouverte	16
1.4.4 Logistique inverse en boucle fermée	16
1.5 Revue critique de la littérature.....	17
1.6 Synthèse de la revue de la littérature	19
CHAPITRE 2 PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE.....	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Structure du système manufacturier.....	22
2.3 Formulation du problème d'optimisation	22
2.3.1 Diagramme de transition d'états	23
2.3.2 Matrice de taux transition d'états.....	24
2.3.3 Condition de faisabilité.....	24
2.3.4 Dynamique du stock	24
2.3.5 Dynamique des émissions.....	25
2.3.6 Domaine de commande admissible	25
2.3.7 Coût total actualisé et fonction valeur	25
2.3.8 Conditions d'optimum	26
2.3.9 Conditions d'optimum approximé	27
2.3.10 Algorithme de résolution	28
2.4 Résolution numérique	29
2.5 Analyse de sensibilité	32
2.5.1 Coût de pénurie et coût de mise en inventaire	32
2.5.2 Coût d'émission	34
2.6 Étude comparative	35
2.6.1 Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût de pénurie.....	36

2.6.2	Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût de mise en inventaire.....	37
2.6.3	Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût d'émissions.....	39
2.7	Implications managériales	41
2.8	Conclusion	43
CHAPITRE 3 PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE.....45		
3.1	Introduction.....	45
3.2	Structure du système manufacturier.....	46
3.3	Formulation du problème d'optimisation	47
3.3.1	Diagramme de transition d'états	47
3.3.2	Matrice de taux transition d'états.....	48
3.3.3	Condition de faisabilité	48
3.3.4	Dynamique du stock	49
3.3.5	Dynamique de l'âge	49
3.3.6	Dynamique des émissions.....	50
3.3.7	Domaine de commande admissible	50
3.3.8	Coût total actualisé et fonction valeur	50
3.3.9	Conditions d'optimum	51
3.3.10	Conditions d'optimum approximé	52
3.4	Résolution numérique	54
3.5	Analyse de sensibilité	60
3.5.1	Coût de pénurie	61
3.5.2	Coût de mise en inventaire.....	61
3.5.3	Coût d'émission	62
3.5.4	Coût de la maintenance préventive	63
3.5.5	Paramètre d'ajustement de l'index d'émission	64
3.6	Étude comparative	65
3.6.1	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de pénurie.....	66
3.6.2	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de mise en inventaire.....	68
3.6.3	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût d'émissions.....	70
3.6.4	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de maintenance préventive.....	71
3.6.5	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du paramètre d'ajustement de l'index d'émission	73
3.7	Implications managériales	74
3.8	Conclusion	77

CHAPITRE 4	PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UN SYSTÈME HYBRIDE MANUFACTURING/REMANUFACTURING EN BOUCLE FERMÉE SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GES....	79
4.1	Introduction.....	79
4.2	Structure du système manufacturier.....	80
4.3	Formulation du problème d'optimisation	81
4.3.1	Diagramme de transition d'états	81
4.3.2	Matrice de taux transition d'états.....	82
4.3.3	Condition de faisabilité	83
4.3.4	Dynamique des stocks.....	83
4.3.5	Dynamique des émissions.....	84
4.3.6	Domaine de commande admissible	84
4.3.7	Coût total actualisé et fonction valeur	85
4.3.8	Conditions d'optimum	86
4.3.9	Conditions d'optimum approximé	86
4.4	Résolution numérique	89
4.5	Analyse de sensibilité	94
4.5.1	Coût de <i>manufacturing</i>	94
4.5.2	Coût de <i>remanufacturing</i>	95
4.5.3	Coût d'émission	96
4.5.4	Index d'émission de la machine de <i>manufacturing</i>	97
4.5.5	Index d'émission de la machine de <i>remanufacturing</i>	98
4.5.6	Taux maximal de manufacturing et remanufacturing.....	99
4.6	Étude comparative	101
4.6.1	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de <i>manufacturing</i>	102
4.6.2	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de <i>remanufacturing</i>	104
4.6.3	Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût d'émission	106
4.7	Implications managériales	108
4.8	Conclusion	110
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	113
ANNEXE I	PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER AVEC PANNES ET REPARATIONS ALEATOIRES ET CONTRÔLE DES EMISSIONS	117
ANNEXE II	PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER AVEC DÉGRADATION ET CONTRÔLE DES EMISSIONS.....	125

ANNEXE III	PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER HYBRIDE MANUFACTURING REMANUFACTURING AVEC CONTRÔLE DES EMISSIONS.....	137
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature	19
Tableau 2.1 Données de l'exemple numérique.....	29
Tableau 2.2 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^-	36
Tableau 2.3 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^+	37
Tableau 2.4 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^e	39
Tableau 2.5 Coût politique de contrôle.....	42
Tableau 3.1 Données de l'exemple numérique.....	54
Tableau 3.2 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^-	67
Tableau 3.3 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^+	68
Tableau 3.4 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^e	70
Tableau 3.5 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_o	71
Tableau 3.6 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de λ	73
Tableau 3.7 Coût politique de contrôle.....	76
Tableau 4.1 Modes des deux machines du système manufacturier hybride.....	81
Tableau 4.2 Données de l'exemple numérique.....	89
Tableau 4.3 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_M	103

Tableau 4.4	Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_R	104
Tableau 4.5	Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^e	106
Tableau 4.6	Coût politique de contrôle.....	109

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Schéma de la méthodologie de recherche.....4
Figure 1.1	Système hybride <i>manufacturing/remanufacturing</i> en boucle fermée Tirée de Kouedeu (2014, p. 19)17
Figure 2.1	Structure du système manufacturier.....22
Figure 2.2	Diagramme de transition d'états23
Figure 2.3	Politique de production30
Figure 2.4	Trace de la politique de production30
Figure 2.5	Variation de (c^-, c^+) et sensibilité sur Z33
Figure 2.6	Variation du c^e et sa sensibilité sur Z34
Figure 2.7	Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^-37
Figure 2.8	Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^+39
Figure 2.9	Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^e40
Figure 2.10	Schéma d'implantation de la politique de contrôle.....43
Figure 3.1	Structure du système manufacturier.....46
Figure 3.2	Diagramme de transition d'états47
Figure 3.3	Effet de la dégradation de la machine sur le taux de panne $q_{12}(a)$ et l'index d'émission $\theta(a)$ pour différentes valeurs de α55
Figure 3.4	Politique de production55
Figure 3.5	Seuil critique de production en fonction de (e)56
Figure 3.6	Politique de maintenance préventive58
Figure 3.7	Traces de la politique de production et de maintenance préventive59

Figure 3.8	Variation de c^- et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$61
Figure 3.9	Variation du c^+ et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$62
Figure 3.10	Variation du c^e et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$63
Figure 3.11	Variation du c_0 et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$64
Figure 3.12	Variation du λ et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$65
Figure 3.13	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^-68
Figure 3.14	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^+69
Figure 3.15	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^e71
Figure 3.16	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_072
Figure 3.17	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de λ74
Figure 3.18	Schéma d'implantation de la politique de contrôle.....76
Figure 4.1	Structure du système manufacturier hybride80
Figure 4.2	Diagramme de transition d'états82
Figure 4.3	Production lorsque les deux machines sont opérationnelles.....90
Figure 4.4	Production lorsque la machine de <i>remanufacturing</i> en panne.....90
Figure 4.5	Production lorsque la machine de <i>manufacturing</i> en panne91
Figure 4.6	Variation de c_M et sa sensibilité sur les traces Z95
Figure 4.7	Variation de c_R et sa sensibilité sur les traces Z96
Figure 4.8	Variation de c^e et sa sensibilité sur les traces Z97
Figure 4.9	Variation de θ_1 et sa sensibilité sur les traces Z98
Figure 4.10	Variation de θ_2 et sa sensibilité sur les traces Z99

Figure 4.11	Variation de u_{1max} et sa sensibilité sur les traces Z (faisabilité individuelle des deux machines).....	100
Figure 4.12	Variation de u_{1max} et sa sensibilité sur les traces Z (uniquement la faisabilité de la machine de <i>remanufacturing</i>)	100
Figure 4.13	Variation de u_{2max} et sa sensibilité sur les traces Z (avec uniquement la faisabilité de la machine de <i>remanufacturing</i>)	101
Figure 4.14	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_M	104
Figure 4.15	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_R	106
Figure 4.16	Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^e	108
Figure 4.17	Schéma d'implantation de la politique de contrôle du système hybride .	110

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

$u_1(\cdot)$	Taux de production de la machine de <i>manufacturing</i>
$u_2(\cdot)$	Taux de production de la machine de <i>remanufacturing</i>
$u_{1\max}$	Taux maximal de production de la machine de <i>manufacturing</i>
$u_{2\max}$	Taux maximal de production de la machine de <i>remanufacturing</i>
d	Taux de la demande des clients
$x(\cdot)$	Stock de produits finis
$a(\cdot)$	Age de la machine
$e(\cdot)$	Niveau d'émission
$\omega(\cdot)$	Taux d'envoi en maintenance préventive
θ_1	Index d'émission de la machine de <i>manufacturing</i>
θ_2	Index d'émission de la machine de <i>remanufacturing</i>
L	Limite standard d'émission de GES imposée par la législation
$q_{\alpha\beta}$	Taux de transition du mode α au mode β
ρ	Taux d'actualisation
$\xi(t)$	Processus stochastique décrivant la dynamique du système hybride
$\xi_1(t)$	Processus stochastique décrivant la dynamique de la machine de <i>manufacturing</i>
$\xi_2(t)$	Processus stochastique décrivant la dynamique de la machine de <i>remanufacturing</i>
c^+	Coût de mise en inventaire des produits finis
c^-	Coût de pénurie
c_r	Coût de maintenance corrective
c_o	Coût de maintenance préventive
c^e	Coût de pénalité de dépassement de la limite d'émission
c_M	Coût de production de la machine de <i>manufacturing</i>
c_R	Coût de production de la machine de <i>remanufacturing</i>
π	Vecteur des probabilités limites

$g(\cdot)$	Coût instantanée
$J(\cdot)$	Coût actualisé
$v(\cdot)$	Fonction valeur
GES	Gaz à Effet de Serre
LI	Logistique Inverse
JAT	Juste À Temps
HPP	Hedging Point Policy
EHPP	Environmental Hedging Point Policy
HJB	Hamilton-Jacobi-Bellman
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
UE	Union Européenne
SGE	Système de Gestion Environnemental
CCSCA	Conseil Canadien Sectoriel de la Chaîne d'Approvisionnement
WCI	Western Climate Initiative
EUETS	European Union Emissions Trading System

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Mise en contexte

Le développement durable se définit par le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures (Brundtland, 1987). Au fil des ans, la dimension environnementale de ce concept a attiré beaucoup d'attention et augmenté la sensibilisation du public envers ces préoccupations. Dans les dernières années, de nombreux pays ont adopté des stratégies pour inciter fortement les individus et les entreprises à réduire leurs impacts environnementaux et à agir de manière éthique (Hennequin & Restrepo, 2015). Dans les objectifs mondiaux pour le développement durable (ODD) de 2015, les états membres de l'ONU ont présenté leur engagement de mettre fin à l'extrême pauvreté, aux inégalités et au changement climatique d'ici 2030. Ainsi de rendre le monde plus durable et plus juste. Cette engagement intègre 17 objectifs généraux dont le 12^{ème} et 13^{ème} à savoir respectivement la consommation et production responsables, et les mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques sont aujourd'hui des enjeux majeurs. C'est ainsi que les discussions sur les enjeux climatiques actuels lors de la COP26 de novembre 2021 à travers le traité de Glasgow, ont permis de définir leur vision comme celle de maintenir l'urgence de limiter à 1.5°C le réchauffement planétaire par rapport à l'ère préindustrielle. Ceci à travers l'intensification de leur effort pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. À titre d'exemple, selon le Gouvernement du Québec, (2020), le secteur industriel arrivait en deuxième place après le secteur de transport, en termes d'émission de gaz à effet de serre (GES) avec 30% des émissions totales de la province pour l'année 2018. Parallèlement, la raréfaction des ressources naturelles est sans précédent pour l'humanité. Elle se conjugue aux changements climatiques qui auront leurs lots d'impacts sur les écosystèmes qui participent à générer ces précieuses ressources. Cette situation ne pourra être surmontée sans changer en profondeur notre modèle économique linéaire (Québec circulaire, 2021).

0.2 Problématique de la recherche

De nos jours, les grands enjeux environnementaux des gouvernements sur les concepts de l’empreinte carbone et l’économie circulaire à travers la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la logistique inverse respectivement, incitent les manufacturiers à s’approprier de ces challenges dans leur pratique de production. Soucieuses de satisfaire la demande client, d’améliorer leurs performances et sujettes aux perturbations aléatoires, les entreprises manufacturières relèvent de grands défis. Ces défis se présentent dans l’atteinte de leurs objectifs de production d’une part, de contrôle des émissions de GES et de valorisation des produits usagés du marché d’autre part. À cet effet, il est donc impératif aux gestionnaires de prendre de meilleures décisions dans la gestion des systèmes manufacturiers sans perdre de vue l’aspect économique. Dans cet élan, nous relevons que le secteur manufacturier connaît un manque au niveau des nouvelles stratégies de gestion de la production sous ses aspects environnementaux. L’implication des travaux de recherche scientifique dans ce domaine de commande des systèmes manufacturiers est fortement sollicitée. C’est dans ce cadre que s’inscrit cette recherche, dont le manque à combler s’attaque à la question de savoir, comment planifier de façon optimale la production des systèmes manufacturiers en boucle fermée en contexte dynamique stochastique sous contrôle des émissions de GES.

0.3 Objectifs de la recherche

L’objectif principal de ce travail de recherche est d’élaborer les politiques de commande optimale rétroactive des systèmes manufacturiers en contexte dynamique stochastique en prenant en compte les émissions de GES générées dans la prise de décision. Ceci dit, ce travail consiste à proposer des modèles d’optimisation qui passeront par la minimisation du coût total encouru constitué des coûts liés aux stockages de produits finis, aux pénuries, à la production, à la maintenance ainsi qu’aux émissions de GES excédant la limite exigée par les autorités compétentes.

Les objectifs spécifiques considérés pour parvenir à notre objectif principal sont les suivants :

- L'élaboration de la politique de commande optimale rétroactive d'un système manufacturier à taux de panne constant, incluant le niveau d'émissions dans la prise de décision de production.
- L'élaboration des politiques de commande optimale rétroactive d'un système manufacturier sujette à la détérioration, incluant le niveau d'émissions dans les prises de décision de production et de maintenance.
- L'élaboration des politiques de commande optimale rétroactive d'un système manufacturier hybride *manufacturing/remanufacturing* en boucle fermée à taux de panne constant, incluant le niveau d'émissions dans les prises de décision de *manufacturing* et de *remanufacturing*.

0.4 Méthodologie de la recherche

En vue d'atteindre l'objectif principal et les objectifs spécifiques mentionnés ci-dessus, la présente recherche s'appuie sur la méthodologie suivante illustrée à la Figure 0.1:

- Modélisation du système manufacturier étudié basée sur la théorie de commande optimale stochastique;
- Élaboration des conditions d'optimum du problème posé décrites par des équations aux dérivées partielles communément appelées équations d'HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman) par l'application de l'approche de programmation dynamique;
- Résolution des conditions d'optimum par les méthodes numériques, solutions des équations qui décrivent l'optimum du problème formulé;
- Simulation et analyse des résultats. Nous appliquons ici les algorithmes de résolution développés à l'étape précédente dans le logiciel Matlab R2020b afin de déterminer les politiques de commande optimale par un exemple numérique. Une analyse de sensibilité est faite afin de valider le modèle et la structure des politiques obtenus.
- Étude comparative des politiques obtenues afin de mettre en évidence leur avantage économique et les positionner par rapport à celles des travaux de la littérature;
- Élaboration d'un schéma logique d'implantation pour faciliter la mise en œuvre en industrie de nos résultats obtenus.

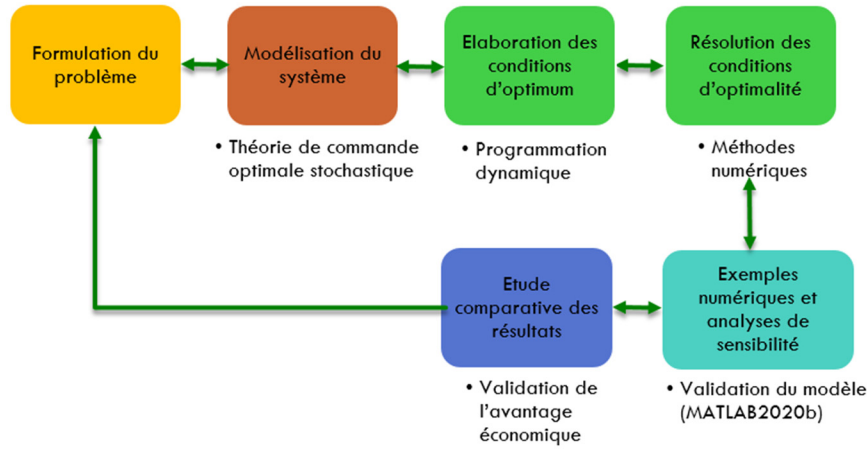


Figure 0.1 Schéma de la méthodologie de la recherche

0.5 Structure du mémoire

Ce mémoire sera présenté en quatre chapitres. Le chapitre 1 traite de la revue de littérature. Les principaux axes de recherche y seront définis. Nous présentons la généralité sur les systèmes manufacturiers, la théorie de commande optimale stochastique de systèmes manufacturiers et nous abordons aussi l'implication des travaux de recherche scientifique dans cet axe avec la problématique de l'intégration de l'aspect environnemental. Le chapitre 2 présente le problème de planification de la production d'un système manufacturier soumis à des pannes et réparations aléatoires sous le contrôle de ses émissions de GES. Le système est constitué d'une unité de production fabriquant un seul type de produit. La modélisation du système a été faite par la chaîne de Markov homogène. Le taux de production est la seule variable de décision. Dans le chapitre 3, l'unité de production subit une détérioration. Le taux de panne et l'index d'émission dépendent de l'âge de l'unité de production lié au nombre de produits fabriqués. Le modèle du chapitre 2 est donc étendu en intégrant la maintenance préventive dans la planification de la production du système manufacturier étudié. La modélisation ici s'est faite en utilisant la chaîne de Markov non homogène. Le chapitre 4 quant à lui est dédié à la planification de la production d'un système manufacturier hybride *manufacturing/remufacturing* en boucle fermée sous le contrôle des émissions de GES. Nous avons combiné dans ce modèle d'optimisation le contrôle des émissions de GES et la logistique inverse.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 Généralités sur les systèmes manufacturiers

On définit par système de production dans le domaine manufacturier, un ensemble de ressources matérielles (actifs de production) et de ressources humaines (dirigeants, gestionnaires, opérateurs) ayant pour but de transformer la matière première en des produits finis satisfaisant aux exigences des clients. Ces ressources interagissent entre elles au travers de flux physiques (produits) et de flux d'informations (quantité, qualité, plan de production). (Stevenson & Benedetti, 2007). Évoluant dans un environnement d'incertitudes (défaillances des actifs production, situation de crise comme la crise sanitaire de COVID-19), la commande des systèmes de production devient souvent complexe. En effet, les industriels doivent tenir compte les contraintes internes (capacité, flexibilité...) et externes (approvisionnement, fluctuation de la demande...) pour atteindre les objectifs à court, moyen et long terme (Ben Salem, 2014). Plusieurs critères permettent de classifier les entreprises manufacturières, notamment suivant :

- Volume de production

D'après ce critère de sélection, Tamani (2008) a classifié les entreprises manufacturières en trois catégories à savoir : les entreprises de production unitaire, de production par lot (Bouslah et al., 2013) et de production en série (Sethi et al., 1997).

- Politique de gestion de la production

En fonction de la gestion du flux de production, on peut parler de la production en flux poussé (production sur stock) (Gharbi et al., 2011) et la production en flux tiré dite aussi sur commande (Agrawal et al., 1996; Lavoie et al., 2010).

Dans la production sur stock (*Push policy*), la planification de la production se fait à partir des prévisions de la demande du client ; on produit, même si le client n'est pas clairement identifié. Afin de satisfaire rapidement la demande, ce mode de gestion permet de produire à flux poussés

pour constituer les inventaires des produits finis avant leur livraison. Les produits étant déjà disponibles, ce mode permet d'éviter les ruptures de stock.

Dans la production sur commande (*Pull policy*), la production est déclenchée dès qu'une commande a été passée. Cela permet de produire à flux tirés, c'est pourquoi on parle de production en juste à temps (JAT). Dans ce mode de gestion, les coûts d'inventaire sont très faibles, mais les délais de livraison sont plus longs.

- Nature de la production

D'après ce critère, on distingue des systèmes de production à flux continue (à l'exemple des systèmes à coulée continue en fonderie, raffinerie), les systèmes à flux discontinu où les produits sous forme de pièces distinctes sont fabriqués (industrie automobile) (Elhafsi & Bai, 1996). De cette catégorie, il existe aussi les systèmes hybrides où les deux types de flux, continu et discontinu sont présents simultanément (Bhattacharya & Coleman, 1994).

À travers les années, les méthodes de modélisation et de résolution des problèmes industriels ont beaucoup évolué pour s'adapter à la complexité de plus en plus élevée de la pratique industrielle. Malgré la présence des conditions et des hypothèses simplificatrices dans les approches de résolution, les chercheurs s'activent toujours à la résolution de ses différents problèmes complexe de commande des systèmes manufacturiers.

1.2 Commande optimale stochastique des systèmes manufacturiers

1.2.1 Généralités

Évoluant dans un environnement très compétitif, les entreprises font face de plus en plus au problème de planification de leur production pour répondre aux besoins de la clientèle (quantité, qualité, délai de livraison ...) malgré la présence des incertitudes (pannes, demande des clients ...). Dans ce contexte dynamique stochastique, la planification de la production des systèmes manufacturiers a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs qui ne se retiennent pas de développer des modèles d'optimisation en intégrant de nouveaux aspects dans le but de se rapprocher de la réalité.

La théorie de commande optimale stochastique est une théorie de modélisation qui tient compte des incertitudes pour élaborer les stratégies de commande pour un système étudié. Cette théorie a été utilisée dans les domaines d'ingénierie et des mathématiques appliquées, ensuite elle a été introduite pour étudier les systèmes stochastiques en tenant compte des aspects tels que la production, la maintenance, qualité...etc. Dans le contexte d'un système dynamique, Rishel, (1975) a réussi à établir les conditions d'optimum nécessaires et suffisantes du problème de commande optimale stochastique en rétroaction (feedback control) en utilisant le principe du maximum de Pontryagin. Par le biais de la programmation dynamique, Rishel a résolu les équations Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) pour trouver la solution optimale unique du problème. Ces équations permettent de caractériser les conditions optimales du problème de commande stochastique de la production. En se basant sur les résultats des travaux de Rishel (1975), Olsder & Suri (1980) ont modélisé et formulé la structure de la commande optimale stochastique d'un système manufacturier sujet à des pannes et des réparations suivant un processus markovien homogène. Depuis, plusieurs chercheurs ont étudié problème de commande optimale stochastique pour des systèmes manufacturiers non fiables (sujettes aux pannes). Plusieurs méthodes ont été utilisées afin de résoudre ce genre de problème tel que; l'intelligence artificielle (Basnet & Mize, 1995; Hennequin & Ramirez Restrepo, 2016a); les heuristiques (Thesen, 1999; Williams & Wirth, 1996); la simulation (Kenne & Gharbi, 2000; Assid et al., 2014).

1.2.2 Politique de commande à seuil critique

Les politiques de commande rétroactives (feedback control policies) sont parmi les sujets qui ont attiré beaucoup l'attention des chercheurs. À travers plusieurs travaux de recherches, ce type de politique a montré une grande efficacité à gérer les systèmes dans un environnement hautement stochastique. Dans ce contexte, Kimemia & Gershwin (1983) ont modélisé un système manufacturier flexible décrit par un processus Markovien homogène pour déterminer une commande optimale dont la variable de décision est le taux de production. Ils avaient pour but de trouver le taux de production qui permettrait de minimiser le coût de stockage et de pénurie. Pour ce faire, ils ont pu montrer en se basant sur l'étude faite par Rishel (1975) que la

politique de commande optimale trouvée est de type seuil critique « Hedging Point Policy» (HPP). Selon cette politique, il faut produire au taux maximal si le niveau de stock des produits est inférieur au seuil critique. Cependant, la machine devra arrêter de produire si le stock actuel des produits finis est supérieur au seuil critique. Pour finir, le système de production produit à la demande si le seuil critique et le stock des produits finis sont au même niveau. Akella & Kumar, (1986) ont traité le problème d'une seule machine non fiable (soumis à des pannes et de activités de réparation) produisant un seul type de produit et une demande constante. Les auteurs ont modélisé le système par une chaîne de Markov homogène (taux de transition constants). Leur contribution était très intéressante. En effet, ils ont réussi à résoudre analytiquement les équations HJB. La politique de commande obtenue était de type seuil critique Hedging Point Policy (HPP), qui minimise le coût total (d'inventaire et pénurie) sur un horizon infini.

La fonction qui représente le coût optimal appelé fonction valeur doit satisfaire un ensemble d'équations différentielles appelées équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) (Boukas & Haurie, 1990). Étant donné l'inexistence d'une solution analytique aux équations d'HJB, Ils ont pu apporter une solution à ce problème de commande stochastique en utilisant une méthode numérique basée sur l'approche de (Kushner & Dupuis, 1992) pour un système constitué de deux machines. La commande stochastique obtenue est asymptotiquement optimale on parle alors de sous-optimalité de la politique de commande. Dans la plupart des travaux cités plus haut (Rishel, 1975; Akella & Kumar, 1986), l'environnement manufacturier considéré dans ces études décrit un processus stochastique avec un taux de transition constant; ce qui ne reflète pas la réalité, car l'âge est un facteur qui influence sur la disponibilité des équipements de production donc impacte sur les taux de transitions.

Les travaux de Boukas & Haurie (1990) montrent que dans la réalité, la disponibilité du système de production est influencée par des facteurs tels que l'âge. Dans ce cas, la probabilité qu'une machine tombe en panne croît avec l'âge. Par conséquent, la distribution dans le temps des pannes dépend de l'âge du système de production. Cette distribution des pannes dans le temps pose un problème pour le contrôle optimal des variables de décision (taux de production) en vue d'établir une politique de commande optimale stochastique. Certains travaux à

l'exemple de (Kenne & Nkeungoue, 2008; Ouaret et al., 2015, 2017) prennent en considération dans leurs études la probabilité de pannes en fonction de l'âge de la machine. Ouaret et al., (2015) ont pu montrer que pour un système manufacturier constitué d'une machine fabricant un type de produit et sujette aux pannes et réparations aléatoires, la politique à seuil critique est optimale. La modélisation de ce système manufacturier s'est fait grâce à la chaîne de Markov non homogène (taux de transition variable).

Dans la modélisation des systèmes manufacturiers, en plus des exigences économiques, les aspects sociaux et environnementaux sont de plus en plus présents (Bloemhof-Ruwaard et al., 1995). Nous pouvons ainsi citer plusieurs exemples des travaux effectués, mais ce qui nous intéresse sont ceux prenant en compte l'aspect environnemental.

1.3 Aspect environnemental dans le secteur manufacturier

Dans la littérature, on s'inquiète de plus en plus du fait que les entreprises se concentrent principalement sur leurs activités économiques et ignorent l'impact de ces activités sur l'environnement et la société (Kang et al., 2018). Cependant, de nos jours, les autorités ont commencé à mettre de la pression sur les entreprises pour limiter les dégâts et encourager l'intégration du développement durable au sein de leurs activités. Bien que le secteur des transports et le secteur de l'énergie soient les premiers concernés par les enjeux de développement durable, le secteur manufacturier en est aussi fortement impliqué. Il est important de noter que d'après Elkington (1998), l'analyse de la durabilité est basée sur trois axes essentiels : 1) l'environnement, 2) l'économie et 3) la société. Pour connaître les fondations de la notion de durabilité, on suggère au lecteur de consulter les travaux de (Carter & Rogers, 2008; Seuring & Müller, 2008; Neto et al., 2010). Dans ce projet de recherche, nous allons aborder la problématique relative aux deux premiers axes : l'environnement et l'économie.

De manière générale, les travaux de recherche qui ont étudié l'aspect environnemental dans le domaine manufacturier ont considéré deux différentes approches de contrôle et protection de l'environnement : réglementaires et volontaires.

1.3.1 Approches réglementaires

Ce sont des approches très connues utilisées par les gouvernements à travers le monde. Elles consistent à établir des normes et des règles afin de contrôler et limiter les émissions toxiques, les polluants ou les déchets des industries (C. Chen & Monahan, 2010). D'après Lee & Yik, (2004), les instruments réglementaires permettent aux gouvernements une intervention sur le marché facilitant la mise en place des changements nécessaires. Dans le cadre réglementaire, l'approche standard de contrôle et de commande était la méthode la plus utilisée et la plus connue pour le contrôle et la protection de l'environnement (Jain, 1993). Elle consiste à fixer des normes de performance et des moyens pour limiter la quantité de déchet ou d'émission qui peut être générée par les industriels (Ben Salem, 2014). La norme est une limite maximale de pollution imposée par les autorités. Sous la surveillance du gouvernement, l'entreprise est obligée de limiter ses rejets pour ne pas dépasser en aucun cas la limite. Pearce & Turner, (1990) ont jugé que cette approche est facile à apprendre et appliquer. Cependant, la rigidité et le manque de flexibilité est l'inconvénient majeur de cet instrument (Shin & Chen, 2000). Plus récemment, les gouvernements ont pensé à réaliser leurs objectifs environnementaux en utilisant d'autres méthodes à la place des instruments rigides d'interdictions. La solution était d'augmenter le coût relié à l'exercice de l'activité en question (émissions toxiques, pollutions atmosphériques, consommation énergétique ou déchets) (Lee & Yik, 2004). Pour les manufacturiers, ce coût supplémentaire augmente le coût total de production et les oblige par la suite, à une utilisation plus efficace des ressources. Dans ce contexte, trois instruments ont été développés partout dans le monde :

- La pénalité de pollution

L'idée consiste à donner plus de flexibilité à l'approche standard de contrôle et commande. En effet, un coût de pénalité est imposé lorsque les rejets de l'entreprise dépassent la limite standard fixée par les autorités (C. Chen & Monahan, 2010; X. Chen et al., 2013; Jaber et al., 2013).

- La taxation

Similaire à celle de pénalisation, l'approche de taxation oblige les entreprises à payer un coût de taxe suite à une émission, un rejet... Le montant de taxe est lié directement à la quantité de

rejets dans l'eau, le sol ou l'air. La taxe peut être liée aux composants du produit ou au produit lui-même. (Jaber et al., 2013; Quirion, 2010).

- Les systèmes de permis échangeables

Cet instrument établit un plafond général de rejets, puis donne des permis individuels aux émetteurs potentiels. Dans le cas où les émissions de l'entreprise sont inférieures à la limite autorisée, elle peut vendre la différence entre ces émissions réelles et le plafond fixé sur le marché. Alors, une entreprise dont les émissions dépassent la limite peut acheter (ou échanger) les droits d'émissions pour émettre plus (Li, 2014b).

Par rapport aux réglementations basées sur les normes strictes, les approches réglementaires basées sur le principe « pollueur payeur » donnent aux entreprises une grande flexibilité dans la mesure où ils ne sont pas forcés à installer des équipements de recyclage ou de dépollution qui coûtent cher ou qui sont difficiles à maintenir. Dans la littérature scientifique, plusieurs travaux de recherche ont considéré une ou plusieurs approches réglementaires afin d'analyser les effets de l'intégration de l'aspect environnemental dans le milieu manufacturier. Une série de travaux de Dobos (1998, 1999, 2001) a été développée afin de déterminer l'effet de la stratégie environnementale sur les décisions de production et d'inventaire de l'entreprise. L'auteur s'est basé sur un modèle mathématique dans le but de déterminer la meilleure politique environnementale dans le cadre d'une approche de taxation, pénalité d'émission ou permis d'échange de droit d'émission. En se basant sur ces travaux, Li & Gu (2012) ont comparé la politique de contrôle de production-inventaire avec et sans prise en compte des exigences environnementales. Le phénomène de détérioration des produits a été introduit dans le travail précédent sous une approche de permis d'émission (Li, 2014b). Dans le cadre de la théorie de commande optimal, Li (2014a) a abordé le contrôle simultané de la maintenance et la production dans un contexte de l'approche de taxation d'émission. En plus du taux de production et celui de la maintenance, l'auteur considère le taux d'investissement en pollution comme variable de décision. Drake et al. (2016) ont étudié l'importance du choix de la technologie et la décision de capacité dans un contexte de contrôle d'émission. Parmi les résultats les plus importants, les auteurs ont montré que le choix de la technologie pourrait réduire les émissions. Jaber et al. (2013) ont été parmi les premiers à considérer « Le système

communautaire d'échange de quotas d'émission» (The European Union Emissions Trading System (EUETS)) dans gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Tous ces travaux de recherche examinent l'effet de l'intégration de l'aspect environnemental dans le domaine manufacturier sous plusieurs méthodes de contrôle d'émission de l'approche réglementaire (taxation du carbone, pénalisation des émissions et permis d'échange des droits d'émission). En plus des approches réglementaires de contrôle citées précédemment, il existe d'autres approches dites « Approches volontaires ».

1.3.2 Approches volontaires

Également connues sous le nom d'approche par autorégulation, ces approches principalement inspirées des normes internationales en matière de système de gestion environnementale (SGE) et des programmes volontaires, sont devenus très connus et utilisées en tant qu'outils d'amélioration de l'efficacité environnementale et de réduction des rejets (Brouhle et al., 2009). En 1991, l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a mis en place son premier programme volontaire. Depuis, l'utilisation de ces approches a connu une forte hausse en Amérique afin de limiter les problèmes environnementaux (Brouhle et al., 2005). Il s'agit de donner de la place aux considérations environnementales dans l'aspect stratégique et les outils d'aide à la décision (Corbett & Kirsch, 2001). Marcus & Willig (1997) affirment que l'approche volontaire est propre à chaque industrie et permet de s'auto-régler. D'un point de vue financier, Blackman & Boyd (2002) ont montré que le recours aux programmes volontaires aide les entreprises à réduire les coûts. D'autre part, certains auteurs Arora & Gangopadhyay (1995); Arora & Cason (1996); Khanna et al. (1998) ont mis l'accent sur le fait qu'une action volontaire permet d'améliorer la réputation environnementale de l'entreprise au regard de ces clients et même ses actionnaires. Brouhle et al. (2009) ont présenté plusieurs autres avantages de l'utilisation d'une approche volontaire afin d'améliorer la stratégie environnementale de l'entreprise. En plus, il est important de savoir que les approches volontaires sont, parfois, plus intéressantes, par rapport aux réglementations, puisqu'ils encouragent l'innovation (Wallace, 1995).

Selon Chen & Monahan, (2010), l'approche réglementaire et l'approche volontaire conduisent à deux processus distincts de planification de la production et de gestion des stocks. Dans un contexte de réglementation, l'entreprise est obligée de respecter les normes qui forment, dans la majorité des cas, une contrainte de capacité. Cependant, le contrôle volontaire est un choix interne à l'industrie. Alors, les objectifs environnementaux sont fixés par le système d'aide à la décision. Les auteurs affirment que, généralement, les méthodes volontaires donnent plus de flexibilité au système manufacturier. (Ben Salem, 2014).

Plusieurs termes sont utilisés comme des synonymes en logistique inverse, bien qu'il ait des similarités entre les termes, ils ne veulent pas tous dire exactement la même chose (Lambert & Riopel, 2003). Dans les lignes qui suivent, nous allons présenter le concept de la logistique inverse.

1.4 Logistique inverse

L'Homme vivant dans un monde doté d'énormes ressources naturelles, se doit de les exploiter pour satisfaire ses besoins et améliorer ses conditions de vie. Cependant, l'épuisement des ressources s'accélère et les dérèglements de l'écosystème impactent de plus en plus fortement l'Humanité (ONU, 2019). Au vue des impacts environnementaux liés à l'accroissement de la pollution et de l'épuisement des ressources naturelles, les industries manufacturières sont beaucoup tournées vers cette nouvelle pratique de valorisation des produits en fin de vie, regorgeant bien souvent d'énormes potentiels de richesse.

1.4.1 Généralités sur la logistique inverse

Dowlatsahi (2000) définit la logistique inverse comme étant un processus dans lequel un fabricant accepte systématiquement des produits ou des pièces préalablement expédiées à partir du point de consommation pour un éventuel recyclage, reconditionnement ou une destruction. Une perspective plus large inclut la substitution, la réutilisation de matières et des déchets. Plus tard, Fleischmann et al. (2001) propose une nouvelle définition de la logistique inverse comme étant le processus de planification, l'exécution et le contrôle du flux des produits collectés

(retours) dans une chaîne d'approvisionnement (production) dans le but de les remettre sur le marché. Lambert & Riopel (2003) mentionnent que la logistique inverse est le processus de planification, d'implantation, et de contrôle de l'efficacité, de la rentabilité des matières premières, des encours de production, des produits finis, et l'information pertinente du point d'utilisation jusqu'au point d'origine dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la bonne façon tout en assurant une utilisation efficace et environnementale des ressources mises en œuvre.

Selon Abdesslem et al. (2007), une fois que les produits utilisés par les différents points de consommation sont mis en rebut, ils sont collectés et triés; Après cela trois principaux traitements peuvent être effectués : la réutilisation, la refabrication et le recyclage. Ces trois catégories de traitement définissent ainsi les activités de la logistique inverse d'un produit. Selon eux, le produit en fin de vie subissant le traitement de réutilisation (*remediation*) sera immédiatement utilisé pour les mêmes besoins ou non après une opération additionnelle mineure telle que le nettoyage ou une simple maintenance, ou alors permettra la réutilisation de ses pièces qui la composent comme pièces de rechange. Quant à la refabrication (*remanufacturing*), ils définissent cela comme un processus de désassemblage des produits utilisés, d'inspection, de réparation/remplacement des composants et leur utilisation pour fabriquer un nouveau produit. Enfin, le recyclage, comme le processus par lequel un produit en fin de vie est soumis à des transformations en vue d'en tirer une matière première secondaire qui sera introduite dans le cycle de production d'un nouveau produit.

Les activités de *remanufacturing* et réutilisation permettent de récupérer les composants dégradés et de remettre les produits en service (Oualet et al., 2018). C'est dans l'exemple des travaux de Cooper & Allwood (2012), qui mentionnent que la réutilisation sans fusion des composants non destructifs en acier et en aluminium dans les produits en fin de vie peut être très efficace. Car, elle évite les coûts énergétiques élevés associés au recyclage par fusion en préservant l'intégrité de la microstructure et la géométrie des composants existants. Selon eux, les activités de *remanufacturing* et la réutilisation sont toutes deux largement utilisées dans les systèmes automobiles et les équipements lourds, et plus particulièrement sur les composants des moteurs et des systèmes d'alimentation en carburant. Une application dans un système de

production de moteurs diesel utilisant l'usinage, la soudure et d'autres opérations de récupération pour les activités de *remanufacturing* est mentionnée dans Sutherland et al., (2008). Dans la même direction, Gao et al. (2010) considèrent que les activités de *remanufacturing* ne sont utilisées que dans les secteurs automobile et aéronautique. Quelques exemples éminents de *remanufactures* sont RollsRoyce, MTU (Motoren- und Turbinen-Union) aero Engines, General Electric, Caterpillar et Cummins Engine. Tandis qu'au cours des dernières décennies, la logistique inverse s'est étendue à d'autres secteurs comme dans l'exemple des travaux de Kouedeu et al., (2015), où l'activité de réutilisation est appliquée dans les systèmes de production des cartouches d'encre d'imprimantes. C'est ainsi que, la chaîne de logistique inverse est composée d'une série d'activités; l'important est la récupération des produits ou composants en fin de vie (Bennekrouf et al., 2010).

1.4.2 Différents types de configuration d'un réseau de logistique inverse

Selon le conseil canadien sectoriel de la chaîne d'approvisionnement (CCSCA), une chaîne d'approvisionnement encore appelée chaîne logistique ou *supply chain* regroupe l'ensemble des opérations d'approvisionnement en matière première, de fabrication (transformation des matières premières) et de livraison au consommateur final. En logistique conventionnelle ou logistique directe, la conception d'un réseau est un enjeu stratégique pour la rentabilité d'une entreprise. Que ce soit la localisation des unités de production, la localisation et la capacité des entrepôts, l'organisation du réseau de transport, aucune décision ne doit être prise au hasard afin d'assurer la productivité de l'entreprise. En majorité des cas dans la littérature, la conception et l'optimisation des réseaux logistiques sont étudiées à l'aide de la programmation linéaire en nombre entier mixte. En logistique inverse, il existe deux types de configuration du réseau : la logistique inverse en boucle ouverte et la logistique inverse en boucle fermée (Thierry et al., 1995). Nous allons décrire ces deux configurations dans les paragraphes suivants.

1.4.3 Logistique inverse en boucle ouverte

Dans la logistique en boucle ouverte, les produits en fin de vie ne sont pas directement retournés au producteur initial. Les produits récupérés sont utilisés par une autre entreprise ou par l'entreprise elle-même. Dans ce cas, les matériaux récupérés pourront être réutilisés pour créer un produit similaire à celui conçu à l'origine ou un produit différent. En exemple, on retrouve souvent ce type de configuration sur le marché de l'électronique, plus particulièrement sur le marché des téléphones cellulaires. Geyer & Jackson, (2004) ont examiné les aspects économiques de la réutilisation et du recyclage des téléphones portables en fin de vie sur la base de données primaires détaillées recueillies lors d'opérations de logistique inverse, de réutilisation et de recyclage en 2003 au Royaume-Uni et en 2006 aux États-Unis.

1.4.4 Logistique inverse en boucle fermée

On parle de logistique inverse en boucle fermée lorsque les produits usagés sont retournés au producteur initial. La complexité d'une telle configuration provient du fait que les informations collectées dans la chaîne inverse doivent être intégrées à celles de la chaîne directe afin d'effectuer des décisions optimales (dans l'exemple d'un système hybride *manufacturing/remufacturing*. Figure 1.1). L'on observe aussi beaucoup cette configuration pour les entreprises de fabrication d'appareils électroniques. Comme exemple, Jorjani et al. (2004) ont développé une procédure d'allocation optimale des composants électroniques démontés et ont également examiné l'option de réutilisation de ces composants pour les entreprises de haute technologie lors de leur opération de démontage. De plus, l'élaboration des modèles de recherche opérationnelle pour résoudre les problèmes de planification du recyclage des sous-produits industriels et des produits en fin de vie effectuée par Spengler et al., (1997) nous montrent la complexité de la gestion du flux en LI en boucle fermée. Kouedeu et al. (2015) ont également élaboré des modèles d'optimisation stochastique des systèmes hybride *manufacturing/remufacturing* avec applications à l'industrie des cartouches d'imprimantes.

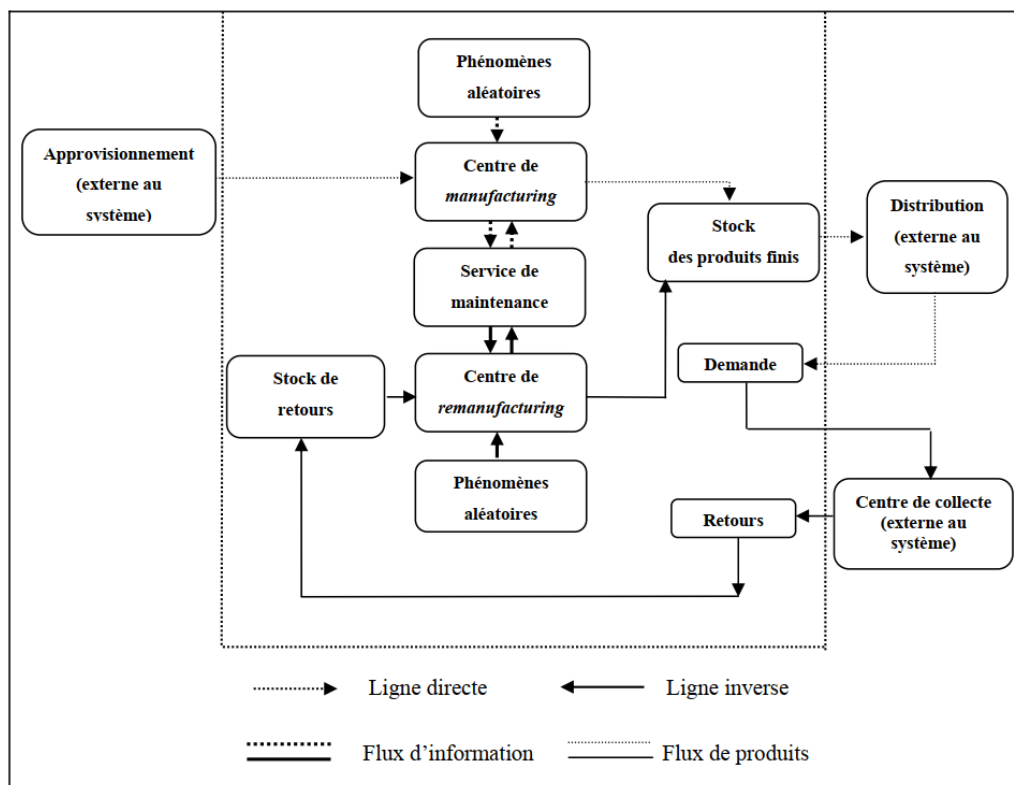


Figure 1.1 Système hybride *manufacturing/remanufacturing* en boucle fermée
 Tirée de Kouedou (2014, p. 19)

1.5 Revue critique de la littérature

Au cours des dernières années, les entreprises manufacturières ont accordé une plus grande attention aux contraintes environnementales dans leur système de production en raison des pressions sociales et économiques (Salim et al., 2017). Ainsi, plusieurs recherches scientifiques ont abordé le problème de commande des systèmes manufacturiers intégrant ces aspects économiques et environnementaux.

Sous les enjeux de la logistique inverse, Silva Filho (2011) a traité le problème de planification de la production pour un système hybride en boucle fermée dans lequel les produits retournés sont récupérés en proposant un modèle d'optimisation dans un contexte stochastique. Kenné et al. (2012) ont traité le même problème de planification de la production d'un système hybride de *manufacturing/remanufacturing* en boucle fermée. L'objectif était de proposer une politique de *manufacturing* et de *remanufacturing* qui minimise les coûts de mise en

inventaires des produits finis et des pénuries. Ces travaux représentent la première tentative avec la théorie de commande optimale stochastique considérant la dynamique du système.

Sous les enjeux de réduction des émissions de gaz nocifs à l'environnement, Bonney & Jaber (2011) ont montré que les entreprises sont confrontées à une absence de stratégies pour faire face aux surplus d'émissions toxiques et aux besoins de la clientèle tout en maintenant une efficacité économique élevée. Hennequin & Ramirez Restrepo (2016) ont abordé le contrôle de la production sous les aspects de développement durable dans un contexte stochastique mais sans considération de la dynamique du système. En appliquant l'approche de l'intelligence artificielle par la logique floue, ils ont déterminé les politiques de commande qui minimisent le coût total de production incluant les coûts liés aux émissions de gaz à effet de serre et l'amélioration du bien-être de la main-d'œuvre. Hajej et al. (2017a), (2017b) ont développé des modèles d'optimisation qui prennent en compte les préoccupations environnementales dans le contrôle de la production et la maintenance des systèmes manufacturiers dans un contexte stochastique. Bouslikhane et al. (2018) ont étudié un système hybride *manufacturing/remufacturing* sous contraintes d'émission de carbone. L'objectif était de déterminer les politiques de production et maintenance minimisant le coût total incluant production, maintenance et émissions avec la programmation linéaire stochastique. Les travaux de Ben-Salem et al. (2015a), (2015b) ont proposé une extension des politiques à seuil critique (appelé politique environnementale à seuil critique-EHPP) intégrant le contrôle des émissions des polluants en contexte dynamique stochastique. Ils ont utilisé une approche de résolution expérimentale, la simulation et la méthodologie de surface de réponse pour déterminer les paramètres optimaux de leurs politiques de commande proposées. Des extensions des politiques environnementales à seuil critique de Ben-Salem et al. (2015a) ont été proposées dans les travaux de (Afshar-Bakeshloo et al. 2018, Entezaminia et al. 2020, 2021) pour des systèmes composés de machines à fortes émissions et faibles émissions.

Parmi les travaux susmentionnés sur la commande des systèmes manufacturiers intégrant des aspects environnementaux, à notre connaissance, aucun de ces travaux trouvés dans la littérature n'a développé de politiques optimales. Ils ont proposé des politiques de commande basées sur l'heuristique ou le bon sens. Selon Salim et al. (2017), les politiques de commande

par rétroaction sont considérées comme les stratégies les plus efficaces pour les systèmes évoluant dans un environnement dynamique stochastique. Du fait de l'approche expérimentale utilisée dans les travaux de Ben-Salem et al. (2015a), (2015b), les politiques de commande (de type à seuil critique) proposées ne garantissent pas l'optimalité du problème. D'après l'unicité de la solution optimale du problème d'optimisation formulé par la programmation dynamique basée sur le principe du maximum de Pontryagin, notre étude permettra de déterminer les politiques de commande optimale et de montrer leur avantage sur celles de la littérature. L'originalité de notre travail est de développer les politiques optimales de commande des systèmes manufacturiers en contexte dynamique stochastique incluant à la fois l'aspect économique et environnemental.

1.6 Synthèse de la revue de la littérature

Cette revue sans être totalement exhaustive visait à couvrir les travaux de la littérature en lien avec notre sujet de recherche. Elle a permis d'explorer les forces et faiblesses des approches de modélisations proposées. Le Tableau 1.1 nous présente une synthèse de notre revue de la littérature. Ce tableau nous récapitule les revues scientifiques consultées, classées par thèmes étudiés selon les problèmes traités, les aspects intégrés, et l'approche de modélisation utilisée.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature

Auteurs	Problèmes traités					Modélisation
	Aspects intégrés			Contrôle		Approche de modélisation
	Dynamique des machines (opération, panne, maintenance)	Détérioration des machines	Contrôle des émissions	Production	Maintenance	
Logistique conventionnelle, directe						
Ben-Salem et al., 2015a	✓		✓	✓		Plans d'expérience, Simulation et Surfaces de réponse
Ben-Salem et al., 2015b	✓	✓	✓	✓	✓	Plans d'expérience, Simulation et Surfaces de réponse

Auteurs	Problèmes traités					Modélisation
	Aspects intégrés			Contrôle		Approche de modélisation
	Dynamique des machines (opération, panne, maintenance)	Détérioration des machines	Contrôle des émissions	Production	Maintenance	
Logistique conventionnelle, directe						
Hennequin & Ramirez Restrepo, 2016	✓		✓	✓		Logique floue en contexte stochastique
Hajej et al., 2017a, 2017b		✓	✓	✓	✓	Programmation linéaire stochastique
Afshar-Bakeshloo et al. 2018	✓		✓	✓		Plans d'expérience, Simulation et Surfaces de réponse
Entezaminia et al. 2020, 2021	✓		✓	✓		Plans d'expérience, Simulation et Surfaces de réponse
Logistique inverse en boucle fermée						
Silva Filho, 2011			✓	✓		Programmation linéaire stochastique
Kenné et al., 2012	✓			✓		Programmation dynamique stochastique
Francie et al., 2015	✓			✓		Programmation dynamique stochastique
Hajej et al., 2019	✓	✓	✓	✓	✓	Programmation linéaire stochastique
Bouslikhane et al., 2018		✓	✓	✓	✓	Programmation linéaire stochastique
Notre étude	✓	✓	✓	✓	✓	Programmation dynamique stochastique

Ce mémoire s'appuie donc sur la théorie de commande optimale stochastique pour proposer les modèles d'optimisation des systèmes manufacturiers en boucle fermée prenant en compte les émissions générées dans la prise de décision. Dans les trois prochains chapitres, nous allons élaborer les différents modèles par l'approche de programmation dynamique stochastique, et résoudre par les méthodes numériques pour déterminer les politiques de commande optimale.

CHAPITRE 2

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous traiterons du problème de commande optimale stochastique d'un système manufacturier soumis aux perturbations aléatoires avec contrôle des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le système manufacturier considéré est assimilé à une seule machine sujette aux pannes et réparations aléatoires et produisant un seul type de produit (M1P1). Le critère de performance choisi est le coût total incluant le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie ainsi que le coût des émissions excédant une certaine limite imposée par les autorités compétentes. Le but de ce chapitre est de déterminer la politique de commande de la production qui minimise le coût total sur un horizon de planification infini en tenant compte des exigences environnementales en matière de pollution par émissions de GES. L'atteinte de cette objectif se fera en six (6) étapes :

- Modélisation du système manufacturier basée sur la théorie de commande en contexte dynamique stochastique;
- Élaboration des conditions d'optimum du problème posé décrites par des équations aux dérivées partielles communément appelées équations d'HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman) par l'approche de programmation dynamique stochastique;
- Détermination de la politique de commande optimale par les méthodes numériques, solutions des équations qui décrivent l'optimum du problème formulé;
- Analyse de sensibilité afin de vérifier la validité du modèle proposé, la structure les résultats obtenus et leur robustesse.
- Étude comparative afin de positionner notre politique par rapport à celle de la littérature;
- Élaboration d'un schéma logique d'implantation pour faciliter la mise en œuvre en industrie de nos résultats obtenus.

2.2 Structure du système manufacturier

Dans cette étude, nous considérons le cas d'une machine sujette aux défaillances aléatoires produisant un type de produits à un taux $u(t)$. Les produits finis sont entreposés afin de bâtir un stock $x(t)$ pour répondre à la demande client à taux constant d . L'approvisionnement en matière première de la machine est maîtrisé et effectif en tout temps. Sur l'aspect environnemental, nous caractérisons la machine comme générant les émissions de gaz à effet de serre (GES) $e(t)$ nocives à l'environnement durant la production. Le système manufacturier est doté d'un dispositif de comptage des émissions en unité équivalente de volume de CO_2 . Selon l'approche de plafond des émissions, les émissions générées sont sanctionnées sous la forme d'une taxe environnementale si la limite d'émission standard L imposée par les autorités compétentes est dépassée. Nous considérons que la pollution de la machine est caractérisée par un index d'émission constant θ_0 (en unité de volume d'émission par produits finis).

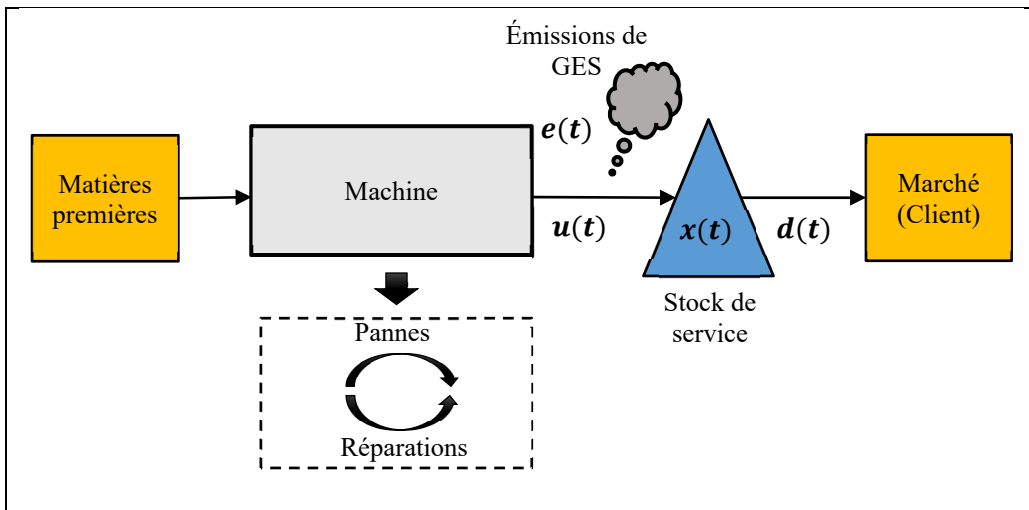


Figure 2.1 Structure du système manufacturier

2.3 Formulation du problème d'optimisation

Le système manufacturier étudié est sujet aux phénomènes aléatoires (pannes et réparations). Il peut être modélisé par un système de commande stochastique à temps continu et à état hybride qui est composé d'une variable d'état discrète (mode de la machine au temps t $\xi(t)$) et

de deux variables d'état continus (niveau d'inventaire en produits finis $x(t)$ et le niveau d'émission de la machine $e(t)$).

2.3.1 Diagramme de transition d'états

Le système manufacturier peut être décrit à chaque temps t par un processus Markovien homogène $\xi(t)$ à états finis à valeur dans $A = \{1,2\}$ tel que :

- Mode 1: la machine est en opération;
- Mode 2: la machine est en panne.

Les probabilités de transitions sont données par l'équation (2.1).

$$P[\xi(t + \delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}(\cdot) \delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}(\cdot) \delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad (2.1)$$

où $q_{\alpha\beta}$ est le taux de transition du mode α au mode β avec $q_{\alpha\beta} \geq 0$ ($\alpha \neq \beta$) $q_{\alpha\alpha} = -\sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta}$, $\alpha, \beta \in A$ et $\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0$.

La machine peut être aléatoirement dans l'un des deux modes sur un horizon infini, comme décrit dans le diagramme de transition d'états à la Figure 2.2, avec les taux de transition fournis.

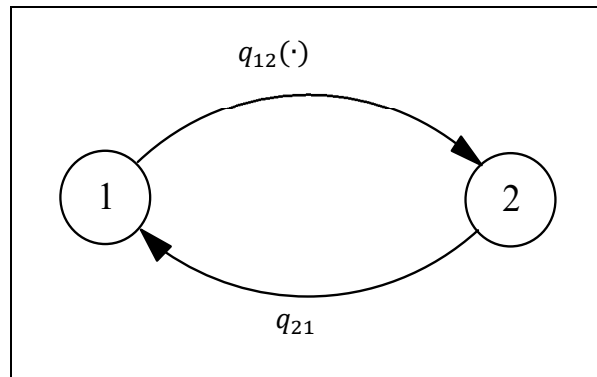


Figure 2.2 Diagramme de transition d'états

2.3.2 Matrice de taux transition d'états

L'inverse du taux de transition q_{12} représente le temps moyen de bon fonctionnement avant la panne (MTTF) au mode 1 tandis que le taux de transition q_{21} représentant l'inverse du temps moyen de réparation (MTTR) au mode 2 sont des constantes connues.

Par conséquent, le système considéré est caractérisé par une matrice de transition stochastique 2×2 , $Q = [q_{\alpha\beta}]$:

$$Q = \begin{pmatrix} -q_{12} & q_{12} \\ q_{21} & -q_{21} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

2.3.3 Condition de faisabilité

Afin de répondre à la demande client pendant toute la durée de disponibilité de la machine, la condition de faisabilité exprimée par la relation suivante doit être vérifiée :

$$\pi_1 * u_{max} > d \quad (2.3)$$

où π_i sont les probabilités limites au mode i , $i \in \{1,2\}$ connues comme les solutions en régime permanent des équations de Kolmogorov *forward* (2.4)

$$\dot{\pi} = \pi \times Q \quad (2.4)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $\dot{\pi} = 0$ avec $\sum_{i=0}^2 \pi_i = 1$ et u_{max} le taux maximale de production du système manufacturier.

2.3.4 Dynamique du stock

La dynamique du stock est décrite par l'équation différentielle ordinaire à une dimension :

$$\dot{x}(t) = u(t) - d \quad (2.5)$$

avec $t \in \mathbb{R}_+$ et $x(0) = x_0$.

Où x_0 est le niveau d'inventaire initial, u le taux de production du système manufacturier (unité de produits finis/unité de temps), et d le taux de demande constant. Quand $x(t) \geq 0$, le système dispose des produits finis en inventaire et est en pénurie de produits finis dans le cas contraire.

2.3.5 Dynamique des émissions

En se référant aux travaux de (Ben-Salem et al., 2015a), nous pouvons utiliser le modèle linéaire qui décrit la relation entre le taux d'émission de la machine $\dot{e}(t)$ et son taux de production $u(t)$. Le niveau d'émission de la machine à chaque temps t est la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\dot{e}(t) = \theta_0 u(t) \quad (2.6)$$

$$\text{avec } t \in \mathbb{R}_+ \text{ et } e(0) = e_0, \quad e(T^+) = e(T^-).$$

où e_0 représente le niveau d'émission initial et θ_0 l'index d'émission initiale (unité de volume d'émission/unité de produits finis).

2.3.6 Domaine de commande admissible

Le domaine de commande admissible $\Gamma(\xi)$ définit le plan de faisabilité des valeurs de la variable de décisions $u(\cdot)$ dépend du processus stochastique $\xi(t)$ et est donné par :

$$\Gamma(\xi) = \{(u) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq u(\square) \leq u_{\max} \text{ Ind} \{\xi(t) = 1\}\} \quad (2.7)$$

2.3.7 Coût total actualisé et fonction valeur

Le coût total instantané qui comprend le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, de maintenance corrective, ainsi que le coût de pénalité des émissions $g(\cdot)$ est donné par l'équation suivante:

$$g(x, e, \xi) = c^+ x^+ + c^- x^- + c_e(e) \quad (2.8)$$

Les constantes c^+ et c^- sont les coûts utilisés pour pénaliser respectivement la mise en inventaire et la pénurie des produits finis respectivement (en \$/unité de produits finis/unité de temps), avec $x^+ = \max(0, x)$, $x^- = \min(0, x)$.

Se référant à l'approche de plafond d'émission, si le niveau d'émission excède la limite standard d'émission L fixé par les autorités compétentes, la quantité excédante est pénalisée avec un coût environnemental (adapté de (Ben-Salem et al., 2015)) :

$$c_e(e) = c^e \times \max\{0, (e(t) - L)\} \quad (2.9)$$

où c^e est le coût pénalisant les émissions excédant la limite L (\$/unité de volume d'émission). L'objectif de cette recherche est de trouver la variable de décision, à savoir le taux de production $u(\cdot)$, qui minimiserait le coût actualisé attendu $J(\cdot)$ donné par :

$$J(x, e, u, \xi) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} [g(x, e, \xi)] dt \mid x(0) = x_0, e(0) = e_0, \xi(0) = \alpha \right] \quad (2.10)$$

où ρ est le taux d'actualisation. x_0 , e_0 et α sont les valeurs initiales des variables d'états x , e et ξ .

La fonction valeur du problème posé est donnée par :

$$v(x, e, \xi) = \min_{u \in \Gamma} J(x, e, u, \xi) \quad (2.11)$$

2.3.8 Conditions d'optimum

La fonction valeur $v(x, e, \xi)$ satisfait un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées communément appelées équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) par l'application de l'approche de programmation dynamique stochastique, ceci est démontré dans les travaux de (Ouaret et al., 2017) sans émissions. C'est ainsi qu'elle est la solution des équations suivantes :

$$\rho v(x, e, \alpha) = \min_{u \in \Gamma} \left\{ J(x, e, u, \alpha) + \frac{\partial v(\square)}{\partial x} (u - d) + \frac{\partial v(\square)}{\partial e} (\theta_0 u) + \sum_{\beta \in A} q_{\alpha\beta} v(x, \varphi_e(\beta), e, \beta) \right\} \quad (2.12)$$

où $\alpha \in A$ et $\varphi_e(\xi)$ décrit la discontinuité des émissions de la machine au moment du saut τ pour le processus ξ .

$$\varphi_e(\xi) = \begin{cases} e(\tau^-) \text{ si } \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 2 \\ e(\tau^-) \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (2.13)$$

2.3.9 Conditions d'optimum approximé

Les équations d'HJB (2.12) sont résolues numériquement en approximant la fonction $v(x, e, \xi)$ par la fonction $v_h(x, e, \xi)$ et les dérivées partielles du premier ordre de la fonction valeur $\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial x}$ et $\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial e}$ par des différences finies en faisant intervenir les pas de discrétisation h_x suivant le stock de produits finis et h_e suivant les émissions de la machine. Cette méthode de résolution par méthodes numériques est basée sur l'approche de (Kushner & Dupuis, 1992). Cette approche a été aussi utilisée dans plusieurs travaux, parmi lesquels nous pouvons citer Rivera-Gómez et al., (2016), Ouaret et al., (2017). Nous discrétisons sur le stock de produits finis x et le niveau d'émissions e de façon à obtenir N_x et N_e points tel que :

$$N_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{h_x} + 1, N_e = \frac{e_{max} - e_{min}}{h_e} + 1.$$

L'approximation des dérivées partielles de la fonction valeur $v(x, e, \xi)$ en différences finies est donnée de la manière suivante :

$$\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{v_h(x + h_x, e, \xi) - v_h(x, e, \xi)}{h_x} & si \dot{x} \geq 0 \\ \frac{v_h(x, e, \xi) - v_h(x - h_x, e, \xi)}{h_x} & si \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial e} = \frac{v_h(x, e + h_e, \xi) - v_h(x, e, \xi)}{h_e} \quad (2.15)$$

En remplaçant les équations (2.14) et (2.15) dans l'équation (2.12) et après simplification, on obtient les équations de programmation dynamique stochastique suivantes :

Mode 1 : Machine en état opérationnel

$$v_h(x, e, 1) = \min_{u \in \Gamma} \left\{ \frac{1}{\rho + \frac{|u-d|}{h_x} + \frac{\theta_0 u}{h_e} - q_{11}} \left[\begin{aligned} & c^+ x^+ + c^- x^- + c^e \max\{0, (e-L)\} \\ & + \frac{|u-d|}{h_x} (v_h(x + h_x, e, 1) I^+ + v_h(x - h_x, e, 1) I^-) \\ & + \frac{\theta_0 u}{h_e} v_h(x, e + h_e, 1) + q_{12} v_h(x, \varphi_e(2), 2) \end{aligned} \right] \right\} \quad (2.16)$$

Mode 2 : Machine en panne

$$v_h(x, e, 2) = \frac{1}{\rho + \frac{d}{h_x} - q_{22}} \left[c^+ x^+ + c^- x^- + \frac{d}{h_x} (v_h(x - h_x, e, 2)) + q_{21} v_h(x, \varphi_e(1), 1) \right] \quad (2.17)$$

Avec $I^+ = \text{Ind}\{u - d \geq 0\}$, $I^- = \text{Ind}\{u - d < 0\}$, $q_{11} = -q_{12}$, $q_{22} = -q_{21}$ et la notation $\text{Ind}\{\delta(\cdot)\}$ la fonction indicateur de la condition $\delta(\cdot)$ définie comme suit :

$\text{Ind}\{\delta(\cdot)\} = 1$ si $\delta(\cdot)$ est vrai et 0 sinon.

Nous présentons à la section suivante, l'algorithme basé sur une approche récursive permettant d'obtenir la politique de commande optimale, solution de ce système de deux équations obtenues (2.16)-(2.17).

2.3.10 Algorithme de résolution

Pour un ordre de précision δ et les pas de discrétisation h_x, h_e donnés, l'algorithme d'approximation successive développée par (Yan & Zhang, 1995) se résume dans les quatre étapes suivantes :

Étape 1 : initialisation

Choisir l'ordre de précision $\delta \in \mathbb{R}^+$.

Pour $r=1$

$$(v_h(x, e, \xi))_r := 0 \quad \forall \xi \in B$$

$(v_h(x, e, \xi))_0 := 0$ ($r = 0$) correspond à la valeur initiale de mémorisation de la fonction valeur.

Étape 2 : Calcul

Calculer la nouvelle valeur de la fonction valeur au rang r $(v_h(x, e, \xi))_r$ à partir de la formule et des données initiales et remplacer l'ancienne valeur en mémoire.

$$(v_h(x, e, \xi))_{r-1} := (v_h(x, e, \xi))_r$$

Étape 3 : Calcul de la fonction valeur pour obtenir la politique de commande

$$T(v_h(x, e, \xi))_{r-1} = (v_h(x, e, \xi))_r = T^*(v_h(x, e, \xi))_{r-1}$$

Étape 4 : Test de convergence

Calculer successivement :

$$\bar{c} := \min_{(x,e)} \left\{ (v_h(x, e, \xi))_r - (v_h(x, e, \xi))_{r-1} \right\}$$

$$\underline{c} := \max_{(x,e)} \left\{ (v_h(x, e, \xi))_r - (v_h(x, e, \xi))_{r-1} \right\}$$

$$C_{min} := \frac{\rho}{1-\rho} \bar{c} ; C_{max} := \frac{\rho}{1-\rho} \underline{c}$$

Si $|C_{min} - C_{max}| \leq \delta$ alors, arrêter les itérations : $u = u^*$

Sinon $r := r + 1$, aller à l'étape 2.

Dans la section suivante, un exemple numérique permettra d'illustrer la politique de commande optimale de production obtenue.

2.4 Résolution numérique

Cette section fournit un exemple numérique pour illustrer les résultats obtenus de notre problème d'optimisation. Ceci se fera par une simulation dans le logiciel Matlab Version R2020b. Le domaine de résolution D est défini par :

$$D = G_x^h \times G_e^h$$

avec $G_x^h = \{x: -5 \leq x \leq 120\}$; $G_e^h = \{e: 0 \leq e \leq 350\}$; $h_x = 0.5$; $h_e = 2$.

Les valeurs des paramètres nécessaires dans l'exemple numérique tirées de la littérature sont présentées dans le Tableau 2.1. Ces valeurs respectent bien la condition de faisabilité énoncée par l'inéquation (2.3).

Tableau 2.1 Données de l'exemple numérique

c^+	c^-	c^e	u_{max}	d	L	θ_0	q_{21}^{-1}	q_{12}^{-1}	ρ
5	100	40	3.25	3	250	2	6	105	0.01

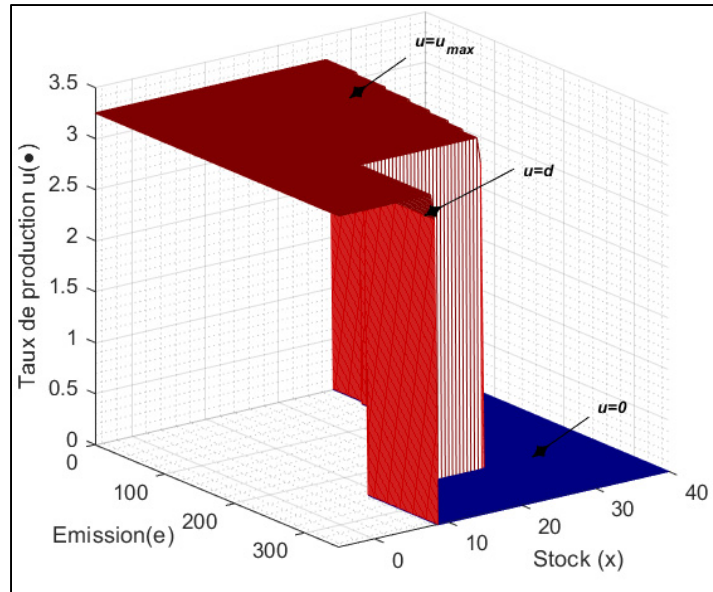


Figure 2.3 Politique de production

La politique de production $u(x, e, \xi)$ illustrée à la Figure 2.3 est une extension de la politique environnementale à seuil critique des travaux de (Ben-Salem et al., 2015a). Cette figure présente le taux de production du système basé sur le nombre de produits finis à bâtir en inventaire afin de se prémunir contre les pannes et les réparations de la machine et les pénalités d'émission excédant la limite L .

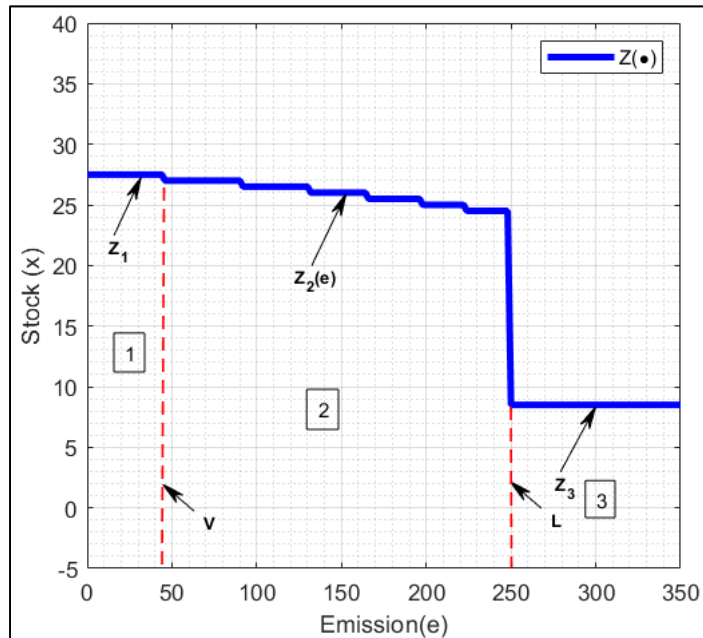


Figure 2.4 Trace de la politique de production

Du fait des émissions de GES du système de production, on remarque que le seuil critique de production noté par Z est fonction de son niveau d'émission. Nous définissons ce seuil critique de production par trois seuils $Z_1, Z_2(e), Z_3$ donnés par les équations (2.18)-(2.20).

$$\begin{cases} \text{si } e < V : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_1 \\ d & \text{si } x = Z_1 \\ 0 & \text{si } x > Z_1 \end{cases} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \text{si } V \leq e < L : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_2(e) \\ d & \text{si } x = Z_2(e) \\ 0 & \text{si } x > Z_2(e) \end{cases} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} \text{si } e \geq L : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_3 \\ d & \text{si } x = Z_3 \\ 0 & \text{si } x > Z_3 \end{cases} \end{cases} \quad (2.20)$$

Pour mieux comprendre l'interprétation de la politique de production, nous divisons le plan (x, e) en trois zones, (1), (2) et (3) (Figure 2.4).

Cette politique optimale de production suit les règles suivantes:

Dans la zone i ($i = 1, 2, 3$),

- si le niveau d'inventaire courant est inférieur au seuil critique Z_i , le taux de production doit être passé à sa valeur maximale $u_{\max}$;
- si le niveau d'inventaire courant est égal au seuil critique Z_i , le taux de production doit être passé à la valeur du taux de demande d ;
- si le niveau d'inventaire courant est supérieur au seuil critique Z_i , le taux de production doit être passé à la valeur 0.

Nous notons que le symbole V appelé limite volontaire d'émission, est mis en évidence sur la Figure 2.4 afin d'illustrer le niveau d'émission permettant de faire passer du seuil critique Z_1 à Z_2 et L la limite d'émission permettant de faire passer du seuil critique Z_2 à Z_3 .

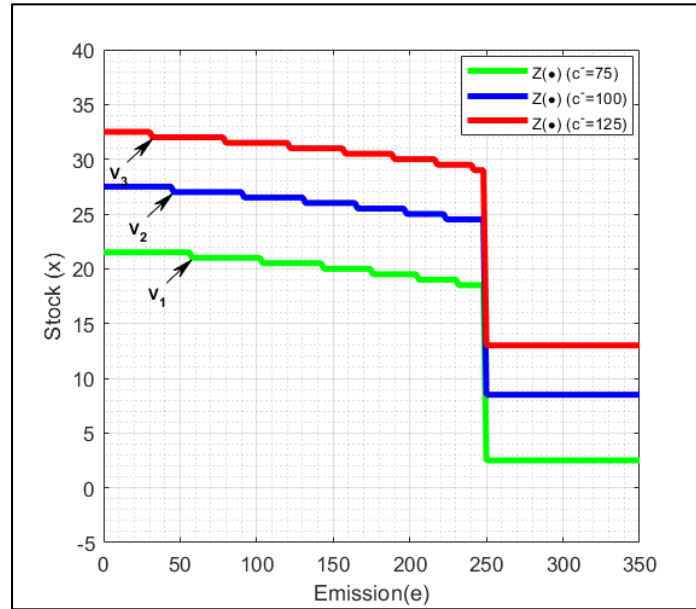
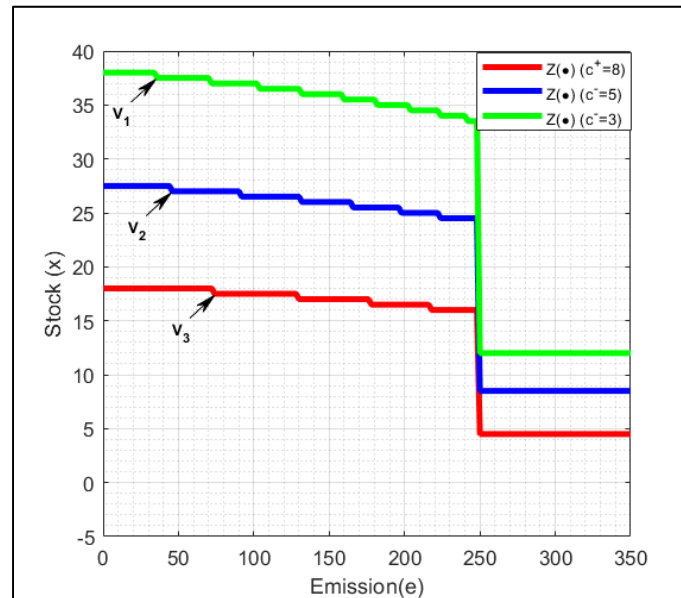
Dans la prochaine section, nous validerons notre modèle et la structure de nos résultats obtenus à travers l'analyse de sensibilité.

2.5 Analyse de sensibilité

La politique de commande obtenue est validée par une analyse de sensibilité en faisant varier certains paramètres du modèle. Nous analysons le comportement du seuil critique de production Z (égale à $Z_i (i = 1, 2, 3)$ selon le niveau d'émission) et la limite volontaire d'émissions V en faisant varier les paramètres suivant: le coût de pénurie, coût de mise en inventaire, coût des émissions. Les trois points V_1, V_2 et V_3 correspondent respectivement aux valeurs petites, moyennes et hautes des paramètres qui seront modifiées dans l'analyse de sensibilité.

2.5.1 Coût de pénurie et coût de mise en inventaire

Les résultats présentés à la Figure 2.5a (respectivement, Figure 2.5b) pour trois différentes valeurs de coût de pénurie $c^- = 75, 100, 125$ (respectivement $c^+ = 3, 5, 8$) montrent, lorsque c^- augmente (respectivement, c^+ baisse), la politique recommande d'augmenter les niveaux optimaux de stock de production Z . En ce qui concerne la variation de V , nous observons le phénomène contraire de celle du seuil critique de production Z . En effet, lorsque les valeurs de c^- ou c^+ conduisent aux grandes valeurs de Z , cela signifie que le système produira plus à son taux maximale de production u_{max} , une situation qui conduit donc à plus d'émission. Pour éviter l'atteinte précoce de la limite d'émission L , la politique recommande de réduire la valeur de V avec l'augmentation du c^- (respectivement, la diminution du c^+), soit $V_3 < V_2 < V_1$ (respectivement $V_1 < V_2 < V_3$), conduisant une baisse du taux de production.

a) $\bar{c}$ b) c^+ Figure 2.5 Variation de $(\bar{c}, c^+)$ et sensibilité sur Z

2.5.2 Coût d'émission

Les résultats présentés à la Figure 2.6 pour trois différentes valeurs de coût d'émission $c^e = 20, 40, 60$ montrent, lorsque c^e augmente, la politique recommande de baisser le niveau optimal de stock de production Z . En ce qui concerne la variation de V , nous observons le même phénomène de celle du seuil critique de production. En effet, pour éviter les coûts excédentaires des émissions énormes après la limite d'émission L , la politique recommande de réduire la valeur de V avec l'augmentation du c^e , soit $V_3 < V_2 < V_1$, conduisant à une baisse du taux de production.

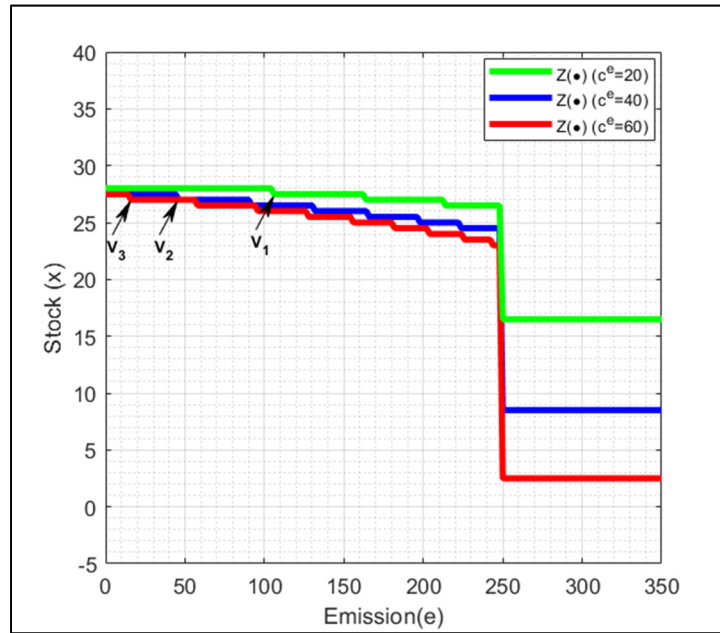


Figure 2.6 Variation du c^e et sa sensibilité sur Z

Dans la section suivante, nous menons une étude comparative pour mettre en évidence les avantages économiques de notre politique de commande optimale proposée sur celle des travaux de la littérature.

2.6 Étude comparative

Sur la base de l'analyse de travaux de la littérature, nous comparons la performance de notre politique de commande optimale de production, que nous désignons par politique-I, à celles de la littérature prenant en compte la dynamique de la machine, décrites comme suit:

- Politique-II : Cette politique est celle des travaux de (Ben-Salem et al., 2015a), caractérisée par deux seuils optimaux de production Z_1^{BS} et Z_2^{BS} constants et une limite volontaire d'émission V^{BS} pour changer de seuil optimal de production. Ainsi cette politique-II à deux seuils donnée par les équations (2.21)-(2.22) peut être vue comme une version simplifiée de notre politique-I.

$$\begin{cases} si\ e \leq V^{BS} : \\ u(x, e) = \begin{cases} u_{\max} & si\ x < Z_1^{BS} \\ d & si\ x = Z_1^{BS} \\ 0 & si\ x > Z_1^{BS} \end{cases} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} si\ e > V^{BS} : \\ u(x, e) = \begin{cases} u_{\max} & si\ x < Z_2^{BS} \\ d & si\ x = Z_2^{BS} \\ 0 & si\ x > Z_2^{BS} \end{cases} \end{cases} \quad (2.22)$$

- Politique-III : Cette politique est celle des travaux de (Akella & Kumar, 1986), caractérisée par un niveau de seuil optimal de production Z_1^{AK} constant. Ainsi cette politique obtenue sans optimisation avec le niveau et le coût excédentaire d'émission bâtis donnée par l'équation (2.23) peut être vue comme une politique classique avec les aspects considérés dans notre modèle.

$$u(x) = \begin{cases} u_{\max} & si\ x < Z_1^{AK} \\ d & si\ x = Z_1^{AK} \\ 0 & si\ x > Z_1^{AK} \end{cases} \quad (2.23)$$

Nous procédons l'analyse comparative de la politique optimale-I par rapport aux politiques - (II,III) en faisant varier les paramètres coût de pénurie c^- et coût d'émission c^e . Comme données de base pour la comparaison, nous prenons $c^+ = 1$, $c^- = 200$, $c^e = 40$, $\theta_0 = 2$,

$q_{12} = 1/105, q_{21} = 1/6, u_{max} = 3.25, d = 3$. Nous considérons la performance économique de notre politique-I par le gain en \$ par rapport aux politiques- (II, III) qui représente la fonction valeur de notre modèle.

2.6.1 Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût de pénurie

Les seuils critiques des politiques I, II et III, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à (II, III) sont présentés dans le Tableau 2.2 et la représentation graphique à la Figure 2.7.

Tableau 2.2 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^-

c^-	50	100	200	300	400
Z_1 politique-I	47	63	81	91	99
Z_{2max} politique-I	47	63	81	91	99
Z_{2min} politique-I	41	57	73	83	91
Z_3 politique-I	3	17	35	45	51
Z_1^{BS} politique-II	33	55	69	77	85
Z_2^{BS} politique-II	1	15	33	43	51
Z_1^{AK} politique-III	55	71	89	99	109
Coût politique-I	83946	84051	84287	84488	84669
Coût politique-II	86434	87367	88193	88675	89024
Coût politique-III	88603	88975	89369	89577	89763
Gain politique I / II	2488	3317	3906	4187	4354
Gain politique I / III	4657	4924	5082	5089	5094

Sur la Figure 2.7, nous observons d'une part, lorsque le coût de pénurie c^- augmente, le coût des politiques augmente du fait de l'augmentation des seuils critiques de production (Tableau 2.2). Plus le système met des produits en inventaire plus ça coûte et on s'éloigne des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique optimale I, elle tolère donc plus les ruptures de stock. Parallèlement, la politique-III stockant plus que la politique optimale I, le système met plus de produits en inventaire qu'il en faut et génère plus d'émissions. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique-I par rapport aux politiques- (II, III) avec le coût de pénurie. Des résultats obtenus, il ressort aussi une

performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 3 à 5% sur la politique-II et 5 à 6% sur la politique-III pour ces variations de coût de pénurie.

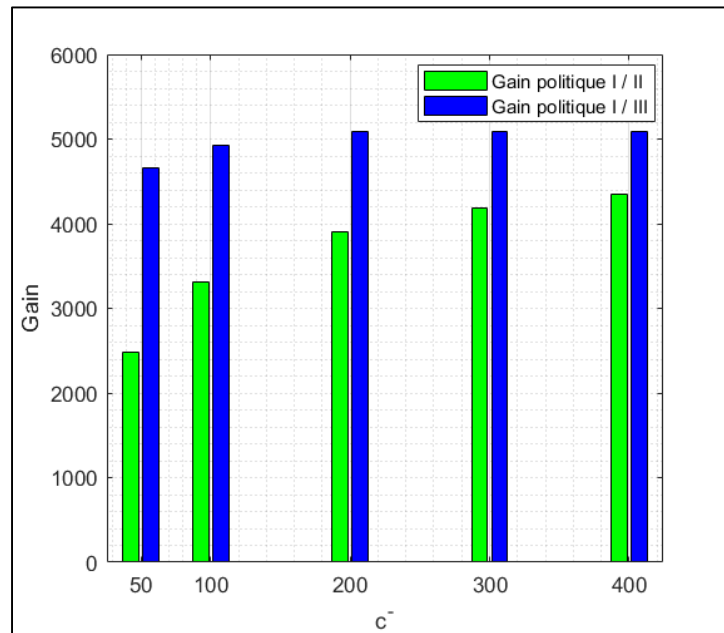


Figure 2.7 Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^-

2.6.2 Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût de mise en inventaire

Les seuils critiques des politiques I, II et III, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à (II, III) sont présentés dans le Tableau 2.3 et la représentation graphique à la Figure 2.8.

Tableau 2.3 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^+

c^+	1	2	3	4	5
Z_1 politique-I	81	65	57	51	45
Z_{2max} politique-I	81	65	57	51	45
Z_{2min} politique-I	73	61	53	47	41
Z_3 politique-I	35	31	29	27	25
Z_1^{BS} politique-II	69	55	45	45	37
Z_2^{BS} politique-II	33	29	27	25	23
Z_1^{AK} politique-III	89	71	61	55	49

c^+	1	2	3	4	5
Coût politique-I	84287	84519	84677	84801	84924
Coût politique-II	88193	88279	88344	88405	88425
Coût politique-III	89369	89244	89195	89189	89162
Gain politique I / II	3906	3760	3667	3604	3501
Gain politique I / III	5082	4725	4518	4388	4239

Sur la Figure 2.8, nous observons d'une part, lorsque le coût de mise en inventaire c^+ augmente, le coût des politiques- (I,II) augmente du fait de la diminution des seuils critiques de production (Tableau 2.3). En fait, le système produisant moins, il génère moins d'émission et se rapproche plus des ruptures de stock très pénalisantes. Par contre le coût de la politique-III diminue car ne tenant pas en compte les émissions, elle recommande juste de bâtir un stock de sécurité confortable pour contrer les pénuries. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique optimale I, elle tolère donc plus les ruptures de stock. Parallèlement, la politique-III stockant plus que la politique optimale I, le système met plus de produits en inventaire. Ces observations permettent d'expliquer la diminution du gain de la politique I par rapport aux politiques- (II, III) avec le coût de mise en inventaire. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 4 à 5% sur la politique-II et 5 à 6% sur la politique-III pour ces variations de coût de mise en inventaire.

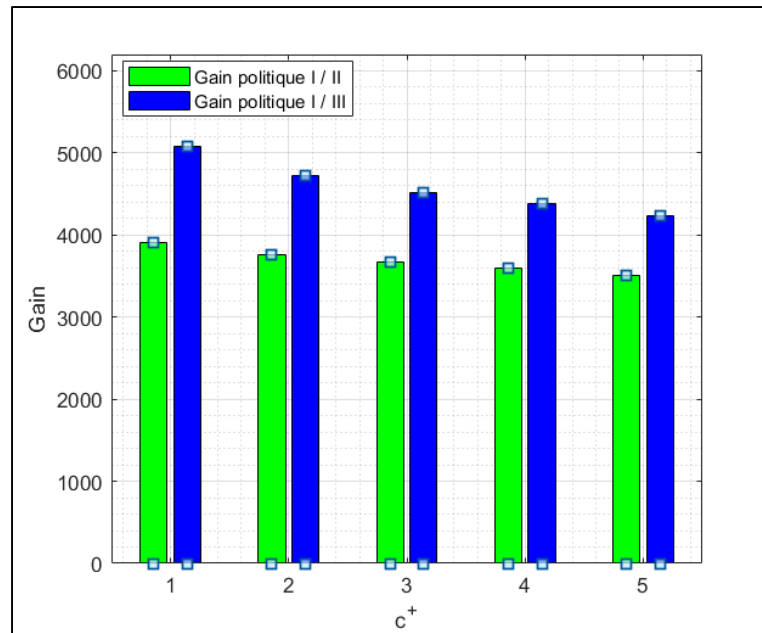


Figure 2.8 Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^+

2.6.3 Comparaison politique I par rapport à (II, III) avec variation du coût d'émissions

Les seuils critiques des politiques I, II et III, les coûts inhérents, et le gain de la politique I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 2.4 et la représentation graphique à la Figure 2.9.

Tableau 2.4 Comparaison politique I par rapport à (II,III) pour différentes valeurs de c^e

c^e	5	10	20	40	60
Z_1 politique-I	87	85	83	81	79
Z_{2max} politique-I	87	85	83	81	79
Z_{2min} politique-I	85	81	77	73	71
Z_3 politique-I	73	63	49	35	25
Z_1^{BS} politique-II	77	73	73	69	69
Z_2^{BS} politique-II	71	61	47	33	23
Z_1^{AK} politique-III	89	89	89	89	89
Coût politique-I	7842	18335	40083	84287	128777
Coût politique-II	9850	21078	43461	88193	132856
Coût politique-III	9983	21351	44029	89369	134710
Gain politique I / II	2008	2743	3378	3906	4079
Gain politique I / III	2141	3016	3946	5082	5933

Sur la Figure 2.9, Nous observons d'une part, lorsque le coût d'émission c^e augmente, le coût des politiques augmente. L'explication apportée à cela est que les émissions étant plus pénalisées (afin d'amener le manufacturier à réduire ses émissions de GES), on observe une diminution des seuils critiques de production (Tableau 2.4). Ainsi le système a plus de chance de subir les pénuries, d'où l'influence du coût de pénurie. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique-I, elle tolère donc plus les ruptures de stock. Parallèlement, la politique-III stockant plus que la politique optimale I, le système met plus de produits en inventaire qu'il en faut et génère plus d'émissions. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique I par rapport à II avec le coût d'émission. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 3 à 25% sur la politique-II et 5 à 27% sur la politique-III pour ces variations de coût d'émission.

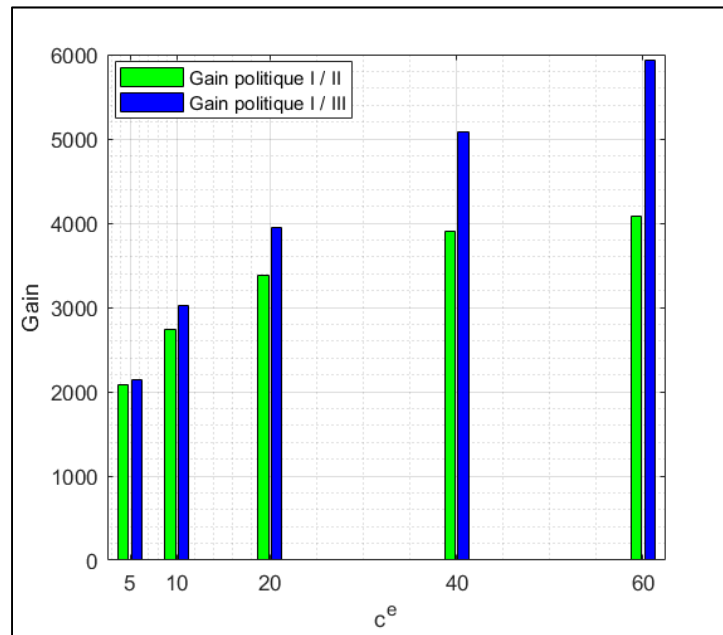


Figure 2.9 Gain politique I par rapport à (II, III) pour plusieurs valeurs de c^e

Il ressort que pour différentes valeurs du coût de pénurie c^- , du coût de mise en inventaire et du coût d'émission c^e , dans ces cas de comparaison nous observons toujours un gain significatif de notre politique optimale-I sur les politiques- (II, III) de la littérature. Les résultats

obtenus révèlent clairement que la politique-I est la meilleure politique à considérer dans ce cas.

Dans la section suivante, nous illustrons la mise en œuvre des résultats obtenus par un schéma d'implantation afin de faciliter la commande du système manufacturier.

2.7 Implications managériales

Les implications managériales de notre travail dans la pratique commerciale nécessitent des informations complètes sur l'état du système manufacturier pour mettre en œuvre les résultats obtenus. Le gestionnaire peut contrôler le système avec notre politique en observant le niveau de stock de service ainsi que ses émissions de gaz à effet de serre. À la lumière de cette discussion, notre politique propose une commande, celui pour bâtir le stock de sécurité. La politique basée sur la programmation dynamique stochastique obtenue est raisonnable, pratique pour un contrôle d'usine, car elle permet au système de fonctionner de manière plus fluide et prévisible, et principalement en raison de sa facilité de mise en œuvre.

La mise en œuvre de notre politique de contrôle de la production est encore facilitée par l'utilisation d'un schéma logique d'implantation, ce qui nous guide dans la prise de décision. En supposant que la machine est opérationnelle et attend sa prochaine panne avec un niveau de stock (x) et un niveau d'émission (e). Le taux de production peut être facilement définie en trois niveaux : le premier pour bâtir le stock de sécurité pour contrer les temps de non disponibilité liés aux pannes et réparations, le second pour décider quand baisser ce stock selon la limite volontaire des émissions et le dernier pour indiquer quand baisser à nouveau le stock de sécurité lorsque le coût excédentaire d'émission devient très pénalisant. Ces niveaux sont représentés en intervalles et circonscrit en zones comme suit : $e < V$, $V \leq e < L$, $e \geq L$ (équations (2.18)-(2.20)) et zone 1, zone 2, zone 3 respectivement (Figure 2.4). Le deuxième niveau de notre politique optimale obtenu ayant pour seuil critique Z_2 variable et difficile à mettre en application en pratique industrielle, nous avons déterminé une politique sous-optimale. La politique de contrôle à implanter présentée à la Figure 2.10 en prenant le minimum de Z_2 comme seuil critique dans la zone 2 est une bonne approximation de la politique optimale avec une différence de coût de 0.36% (Tableau 2.5). Les résultats obtenus

des valeurs numériques des paramètres optimaux à utiliser dans la prise de décision pour faciliter la mise en œuvre de notre politique sont résumées ci-dessous:

$$V = 46, L = 250, Z_1 = 27.5, Z_2 = 24.5, Z_3 = 8.5.$$

Tableau 2.5 Coût politique de contrôle

	Coût	Différence par rapport à I	Différence par rapport à I (%)
Politique optimale de contrôle- I	13099	-	-
Politique sous-optimale de contrôle à implanter	13147	48	0.36

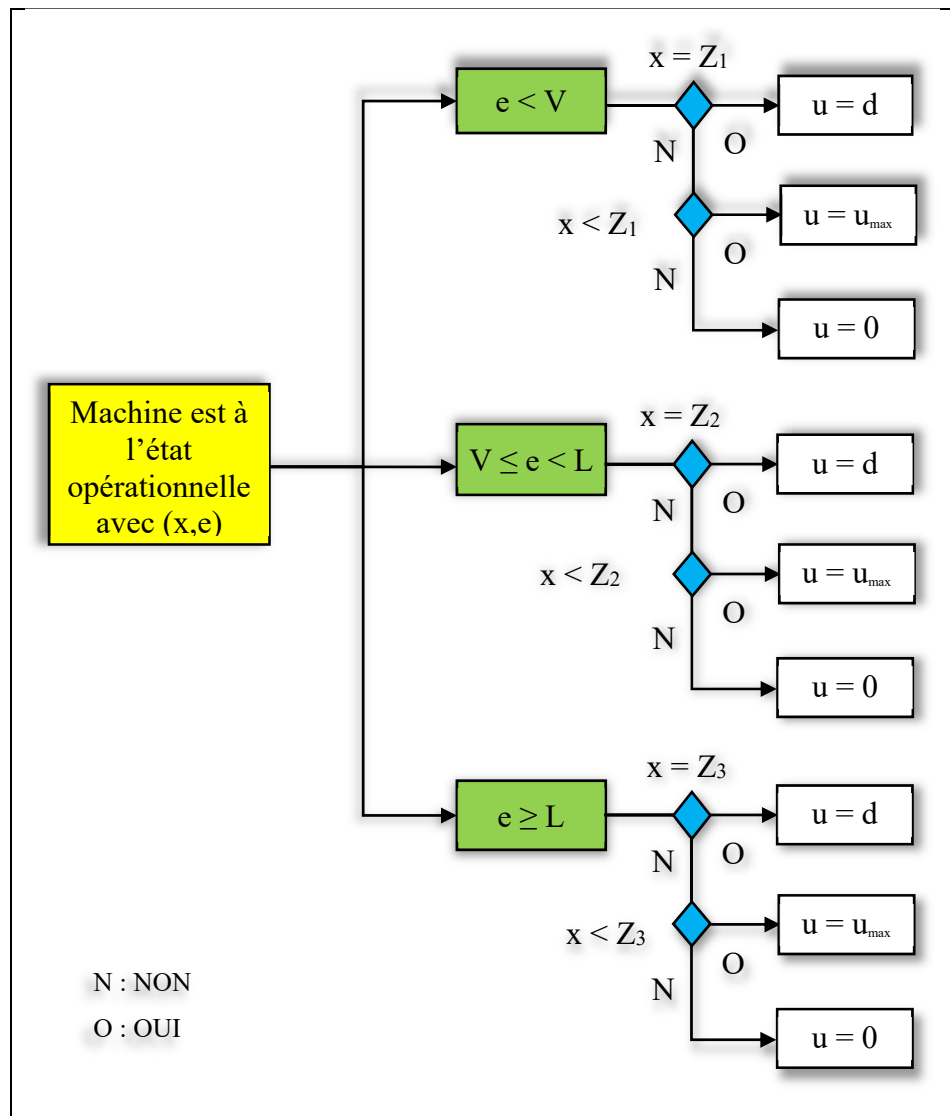


Figure 2.10 Schéma d'implantation de la politique de contrôle

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé la politique de commande optimale de production d'un système manufacturier sujette aux pannes et réparations aléatoires sous contrôle de ses émissions de GES à l'environnement.

En appliquant la théorie de commande stochastique, nous avons modélisé le système manufacturier au moyen d'une chaîne de Markov homogène sur la base d'une variable de décision, le taux de production. Par la suite, en utilisant l'approche de programmation

dynamique stochastique nous avons développé les conditions d'optimum décrites par les équations de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). Nous avons résolu numériquement avec l'approche de Kushner et Dupuis et obtenu une politique de commande qui minimise le coût total de production. Les résultats ont montré que cette politique dépend du niveau d'émissions du système et se définit comme une politique environnementale à seuil critique (EHPP). Une analyse de sensibilité a été faite pour montrer l'effet de la variation de plusieurs paramètres sur nos politiques obtenues afin de valider notre modèle. Nous avons poursuivi par une étude comparative afin de positionner notre politique prescrite par rapport à celle de la littérature. Enfin, un schéma logique d'implantation de notre politique a été élaboré pour faciliter sa mise en œuvre en industrie. Il ressort que l'optimisation par l'approche de programmation dynamique stochastique apporte une grande amélioration dans le domaine de commande optimale des systèmes manufacturiers intégrant le contrôle des émissions.

En contexte industrielle, le système manufacturier se détériore progressivement et pollue beaucoup plus dans la durée sous des réparations minimales après défaillances. Le système étant restauré au même état qu'avant la défaillance, la dégradation du système affectera sa fiabilité et son taux d'émission. Si aucune maintenance préventive n'est effectuée pour améliorer sa disponibilité et sa pollution, d'une part le système atteindra plus tôt la limite d'émission exigée par la législation et d'autre part ne sera plus en mesure de satisfaire la demande des clients. La suite de notre travail consistera donc à étendre notre modèle avec l'intégration de la maintenance préventive.

CHAPITRE 3

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous traiterons du problème de commande optimale stochastique d'un système manufacturier soumis aux perturbations aléatoires avec contrôle des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le système manufacturier considéré est assimilé à une seule machine sujette aux pannes et réparations aléatoires et produisant un seul type de produit (M1P1). Le critère de performance choisi est le coût total incluant le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, de maintenance corrective et préventive, ainsi que le coût excédentaire d'émissions. Le but de ce chapitre est de déterminer les politiques de commande de production et de maintenance préventive qui minimisent le coût total sur un horizon de planification infini en tenant compte des exigences environnementales en matière de pollution par émissions de GES. L'atteinte de cette objectif se fera en six (6) étapes :

- Modélisation du système manufacturier basée sur la théorie de commande en contexte dynamique stochastique;
- Élaboration des conditions d'optimum du problème posé décrites par des équations aux dérivées partielles communément appelées équations d'HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman) par l'approche de programmation dynamique stochastique;
- Détermination des politiques de commande optimale par les méthodes numériques, solutions des équations qui décrivent l'optimum du problème formulé;
- Analyse de sensibilité afin de vérifier la validité du modèle proposé, la structure les résultats obtenus et leur robustesse.
- Étude comparative afin de positionner notre politique par rapport à celle de la littérature;
- Élaboration d'un schéma logique d'implantation pour faciliter la mise en œuvre en industrie de nos résultats obtenus.

3.2 Structure du système manufacturier

Dans cette étude, nous considérons le cas d'une machine sujette aux défaillances aléatoires produisant un type de produits à un taux $u(t)$. Les produits finis sont entreposés afin de bâtir un stock $x(t)$ pour répondre à la demande client à taux constant d . L'approvisionnement en matière première de la machine est maîtrisé et effectif en tout temps. Sur l'aspect environnemental, nous caractérisons la machine comme générant les émissions de gaz à effet de serre (GES) nocives à l'environnement durant la production (avec un index d'émission θ en unité de volume d'émission par produits finis). Nous considérons que la machine se dégrade progressivement avec son âge $a(t)$, ce qui baisse sa fiabilité $q_{12}(a)$ et augmente son indice d'émission $\theta(a)$. Ainsi, la dégradation affecte son taux d'émission $\dot{e}(a)$. Le système manufacturier est doté d'un dispositif de comptage des émissions en unité équivalente de volume de CO_2 . Selon l'approche de plafond des émissions, les émissions générées sont sanctionnées sous la forme d'une taxe environnementale si la limite d'émission standard L imposée par les autorités compétentes est dépassée.

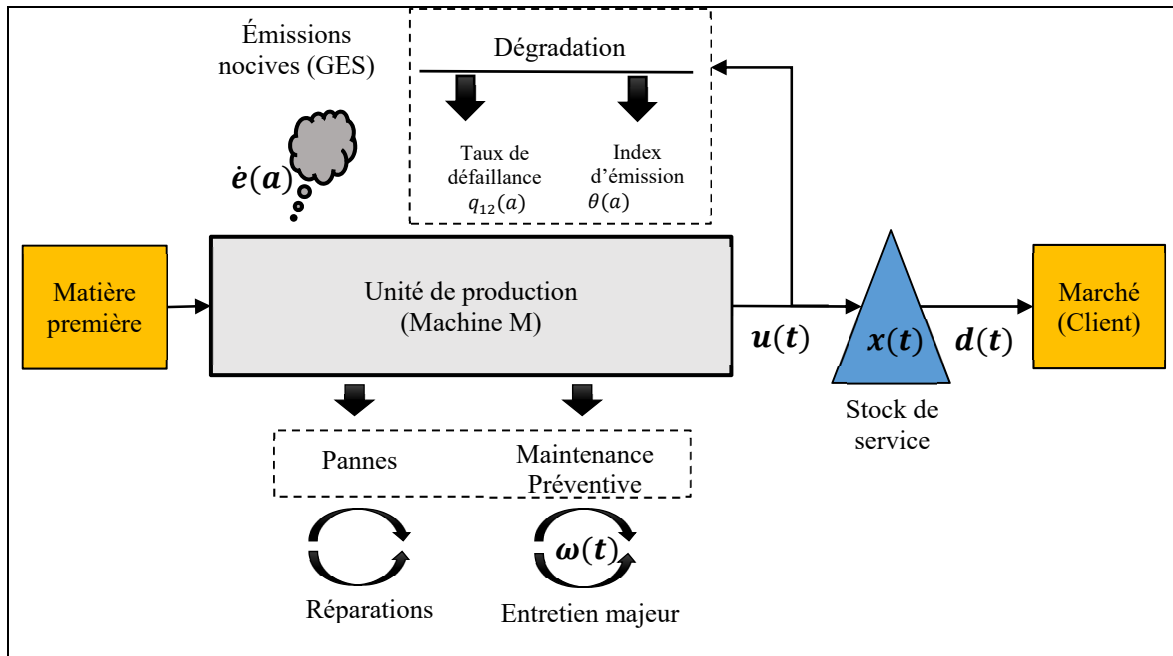


Figure 3.1 Structure du système manufacturier

3.3 Formulation du problème d'optimisation

Le système manufacturier étudié peut être modélisé par un système de commande stochastique à temps continu et à état hybride qui est composé d'une variable d'état discrète (mode de la machine au temps t $\xi(t)$) et de trois variables d'état continus (niveau d'inventaire de produits finis $x(t)$, âge de la machine $a(t)$ et le niveau d'émission de la machine $e(t)$).

3.3.1 Diagramme de transition d'états

Le système manufacturier peut être décrit à chaque temps t par un processus semi-Markovien $\xi(t)$ non homogène à états finis à valeur dans $\Omega = \{1,2,3\}$ tel que :

- Mode 1: la machine est en opération;
- Mode 2: la machine est en panne;
- Mode 3: la machine est en maintenance préventive.

Les probabilités de transitions sont données par l'équation (3.1) :

$$P[\xi(t+\delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}(\cdot)\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}(\cdot)\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad (3.1)$$

où $q_{\alpha\beta}$ est le taux de transition du mode α au mode β avec $q_{\alpha\beta} \geq 0$ ($\alpha \neq \beta$),
 $q_{\alpha\alpha} = -\sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta}$, $\alpha, \beta \in \Omega$ et $\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0$.

La machine peut être aléatoirement dans l'un des trois modes sur un horizon infini, comme décrit dans le diagramme de transition d'états à la Figure 3.2, avec les taux de transition fournis.

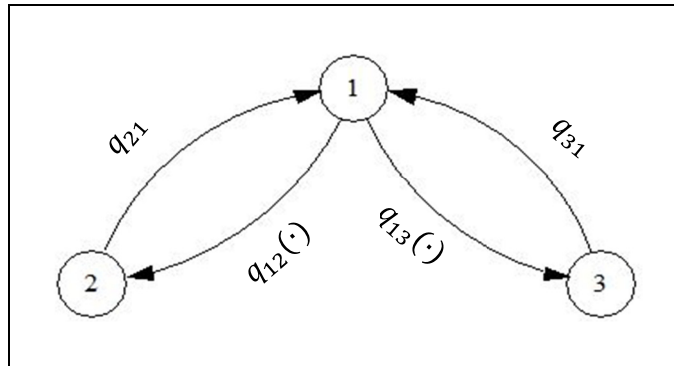


Figure 3.2 Diagramme de transition d'états

3.3.2 Matrice de taux transition d'états

Nous introduisons une variable de contrôle $\omega(t) \in \{\omega_{min}, \omega_{max}\}$ qui prend la valeur de ω_{max} , si la maintenance préventive de la machine doit être effectuée et la valeur ω_{min} décrivant le délai de passer du mode opérationnel au mode maintenance préventive très grand. Dans ce cas, on décide de l'envoi en maintenance préventive comparativement à la réparation de la machine qui est effectuée à tout temps instant d'apparition d'une panne. Soit le taux de transition q_{13} égale à $\omega(t)$ ($q_{13}(\cdot) = \omega(t)$).

En se référant au travaux de (Kenne & Nkeungoue, 2008), nous considérons le taux de panne q_{12} évoluant avec l'âge de la machine selon l'équation suivante :

$$q_{12}(a) = K_0 + K_1^\infty (1 - e^{(-K_2 a(t)^3)}) \quad (3.2)$$

où les paramètres K_0 , K_1^∞ et K_2 sont donnés constants. L'inverse du taux de transition $q_{12}(a)$ représente le temps moyen de bon fonctionnement avant la panne (MTTF(a)) au mode 1.

Nous considérons le taux de transition q_{21} représentant l'inverse du temps moyen de réparation (MTTR) au mode 2 tandis que q_{31} l'inverse du temps moyen de la maintenance préventive au mode 3 sont des constantes connues. Les autres taux de transition sont nuls.

Par conséquent, le système considéré est caractérisé par la matrice de transition stochastique 3×3 , $Q = [q_{\alpha\beta}]$:

$$Q(\omega) = \begin{pmatrix} -q_{12}(a) + \omega(t) & q_{12}(a) & \omega(t) \\ q_{21} & -q_{21} & 0 \\ q_{31} & 0 & -q_{31} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

3.3.3 Condition de faisabilité

Afin de répondre à la demande client pendant toute la durée de disponibilité de la machine, la condition de faisabilité exprimé par la relation suivante doit être vérifiée :

$$\pi_1 * u_{max} > d \quad (3.4)$$

où π_i sont les probabilités limites au mode $i, i \in \{1,2,3\}$ connues comme les solutions en régime permanent des équations de Kolmogorov *forward* (3.5)

$$\dot{\pi} = \pi \times Q(\omega) \quad (3.5)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $\dot{\pi} = 0$ avec $\sum_{i=0}^3 \pi_i = 1$ et $u_{\max}$ taux maximale de production de la machine.

3.3.4 Dynamique du stock

La dynamique du stock est décrite par l'équation différentielle ordinaire à une dimension :

$$\dot{x}(t) = u(t) - d \quad (3.6)$$

$$\text{avec } t \in \mathbb{R}_+ \text{ et } x(0) = x_0$$

où x_0 est le niveau d'inventaire initial, u le taux de production du système manufacturier (unité de produits finis/unité de temps), et d le taux de demande constant. Quand $x(t) \geq 0$, le système dispose des produits finis en inventaire et est en pénurie de produits finis dans le cas contraire.

3.3.5 Dynamique de l'âge

Nous considérons l'âge de la machine $a(t)$ comme étant le nombre de pièces produites depuis sa dernière restauration. Il pourrait y avoir plusieurs façons d'exprimer la relation entre l'âge $a(t)$ et le taux de production $u(t)$. Se référant aux travaux de (Kenne & Boukas, 2003), l'âge de la machine $a(t)$ est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{a}(t) = ku(t) \quad (3.7)$$

$$\text{avec } t \in \mathbb{R}_+ \text{ et } a(0) = a_0, a(T^+) = a(T^-), a(T) = 0.$$

où k est une constante positive utilisée pour définir l'âge de la machine et son taux de croissance. a_0 est l'âge initial, T^+ représente le temps juste à la fin d'une réparation, T^- le temps juste après la dernière opération, et T le temps juste à la fin de restauration de la machine.

3.3.6 Dynamique des émissions

En se référant aux travaux de (Ben-Salem et al., 2015b), nous pouvons utiliser le modèle linéaire qui décrit la relation entre le taux d'émission de la machine $\dot{e}(t)$ et son taux de production $u(t)$. Le niveau d'émission de la machine à chaque temps t est la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\dot{e}(t) = u(t) * \theta(a) \quad (3.8)$$

avec $t \in \mathbb{R}_+$ et $e(0) = e_0$, $e(T^+) = e(T^-)$, $e(T) = e(T^-)$.

où e_0 représente le niveau d'émission initial et $\theta(a)$ l'index d'émission (unité de volume d'émission/unité de produits finis) une fonction dépendant de l'âge de la machine $a(t)$. Des travaux de (Ben-Salem et al., 2015b), nous définissons également le modèle de dégradation de l'index d'émission comme une fonction croissante avec l'âge, exprimée comme suit :

$$\theta(a) = \theta_0 * e^{k_3 \lambda a(t)} \quad (3.9)$$

avec θ_0 la valeur de θ aux conditions initiales, λ le paramètre d'ajustement de la dégradation de l'index d'émission ($0 \leq \lambda \leq 1$), et k_3 une constant positive.

3.3.7 Domaine de commande admissible

Le domaine de commande admissible $\Gamma(\xi)$ définit le plan de faisabilité des valeurs des variables de décisions $u(\cdot), \omega(\cdot)$. Il dépend du processus stochastique $\xi(t)$ et est donné par :

$$\Gamma(\xi) = \left\{ (u, \omega) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{array}{l} 0 \leq u(\cdot) \leq u_{\max} \text{ Ind} \{ \xi(t) = 1 \} \\ \omega_{\min} \leq \omega(\cdot) \leq \omega_{\max} \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

3.3.8 Coût total actualisé et fonction valeur

Le coût total instantané qui comprend le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, de maintenance corrective et préventive, ainsi que le coût de pénalité des émissions $g(\cdot)$ est donné par l'équation suivante:

$$g(x, e, a, \xi) = c^+ x^+ + c^- x^- + c_a + c_e(e) \quad (3.11)$$

Les constantes c^+ et c^- sont les coûts utilisés pour pénaliser respectivement la mise en inventaire et la pénurie des produits finis (en \$/unité de produits finis/unité de temps), avec $x^+ = \max(0, x)$, $x^- = \min(0, x)$ et c_α le coût de maintenance définie comme suit :

$$c_\alpha = c_r \text{Ind}\{\xi(t) = 2\} + c_0 q_{31} \text{Ind}\{\xi(t) = 3\} \quad (3.12)$$

où c_r est le coût instantané de réparation, c_0 le coût encouru de maintenance préventive et la notation $\text{Ind}\{\delta(\cdot)\}$ la fonction indicateur de la condition $\delta(\cdot)$ définie comme suit :

$\text{Ind}\{\delta(\cdot)\} = 1$ si $\delta(\cdot)$ est vrai et 0 sinon.

Se référant à l'approche de plafond d'émission, si le niveau d'émission excède la limite standard d'émission L fixé par les autorités compétentes, la quantité excédante est pénalisée avec un coût environnemental (adapté de (Ben-Salem et al., 2015b)) :

$$c_e(e) = c^e * \max\{0, (e(t) - L)\} \quad (3.13)$$

où c^e est le coût pénalisant les émissions excédant L (\$/unité de volume d'émission).

L'objectif de cette recherche est de trouver les deux variables de décision, à savoir le taux de production $u(\cdot)$ et le taux de maintenance préventive $\omega(\cdot)$, qui minimiseraient le coût actualisé attendu $J(\cdot)$ donné par :

$$J(x, e, a, u, \omega, \xi) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} [g(x, e, a, \xi)] dt \right] \quad (3.14)$$

$$\left[\begin{array}{l} x(0) = x_0, e(0) = e_0, a(0) = a_0, \xi(0) = \alpha \end{array} \right]$$

Où ρ est le taux d'actualisation. x_0, e_0, a_0 et α sont les valeurs initiales des variables d'états x, e, a et ξ .

La fonction valeur du problème posé est donnée par :

$$v(x, e, a, \xi) = \min_{u, \omega \in \Gamma} J(x, e, a, u, \omega, \xi) \quad (3.15)$$

3.3.9 Conditions d'optimum

La fonction valeur $v(x, a, \xi)$ satisfait un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées communément appelées équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) par l'application de l'approche de programmation dynamique, ceci démontré dans les travaux de (Ouaret et al., 2017) sans émissions. C'est ainsi qu'elle est la solution des équations suivantes :

$$\rho v(x, e, a, \alpha) = \min_{u, \omega \in \Gamma} \left\{ J(x, e, a, u, \omega, \alpha) + \frac{\partial v(\cdot)}{\partial x}(u - d) + \frac{\partial v(\cdot)}{\partial a}(ku) \right. \\ \left. + \sum_{\beta \in A} q_{\alpha\beta} v(x, \varphi_e(\beta), \varphi_a(\beta), \beta) \right\} \quad (3.16)$$

où $\alpha \in \Omega$, et $\varphi_e(\xi)$, $\varphi_a(\xi)$ décrivent la discontinuité des émissions et l'âge de la machine respectivement définies comme suit au moment du saut τ pour le processus ξ .

$$\varphi_e(\xi) = \begin{cases} e(\tau^-) \text{ si } \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 3 \\ e(\tau^-) \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\varphi_a(\xi) = \begin{cases} a(\tau^-) \text{ si } \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 2 \\ 0 \text{ si } \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 3 \\ a(\tau^-) \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (3.18)$$

3.3.10 Conditions d'optimum approximé

Les équations d'HJB (3.16) sont résolues numériquement en approximant la fonction $v(\cdot)$ par la fonction $v_h(\cdot)$ et les dérivées partielles du premier ordre de la fonction valeur $\frac{\partial v(\cdot)}{\partial x}$ et $\frac{\partial v(\cdot)}{\partial a}$ par des différences finies en faisant intervenir un pas de discrétisation h_x suivant le stock de produits finis et h_a suivant l'âge de la machine. Cette méthode de résolution par méthodes numériques est basée sur l'approche de (Kushner & Dupuis, 1992). Cette approche a été aussi utilisée dans plusieurs travaux, parmi lesquels nous pouvons citer Rivera-Gómez et al., (2016), Ouaret et al., (2017). Nous discrétisons sur le stock de produits finis x et l'âge de la machine a de façon à obtenir N_x et N_a points tel que :

$$N_x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{h_x} + 1, N_a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{h_a} + 1.$$

L'approximation des dérivées partielles de la fonction valeur $v(\cdot)$ en différences finies est donnée de la manière suivante :

$$\frac{\partial v(x, a, \xi)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{v_h(x + h_x, a, \xi) - v_h(x, a, \xi)}{h_x} & \text{si } \dot{x} \geq 0 \\ \frac{v_h(x, a, \xi) - v_h(x - h_x, a, \xi)}{h_x} & \text{si } \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial v(x, a, \xi)}{\partial a} = \frac{v_h(x, a + h_a, \xi) - v_h(x, a, \xi)}{h_a} \quad (3.20)$$

En remplaçant les équations (3.19) et (3.20) dans l'équation (3.16) et après simplification, on obtient les équations de programmation dynamique stochastique suivantes :

Mode 1 : Machine en état opérationnel

$$v_h(x, e, a, 1) = \min_{u, \omega \in \Gamma} \left\{ \frac{1}{\rho + \frac{|u-d|}{h_x} + \frac{ku}{h_a} - q_{11}} \left[\begin{aligned} & c^+ x^+ + c^- x^- + c^e \max\{0, (e-L)\} \\ & + \frac{|u-d|}{h_x} \left(v_h(x + h_x, e, a, 1) I^+ \right. \\ & \quad \left. + v_h(x - h_x, e, a, 1) I^- \right) \\ & + \frac{ku}{h_a} v_h(x, e, a + h_a, 1) \\ & + q_{12} v_h(x, \varphi_e(2), \varphi_a(2), 2) \\ & + \omega v_h(x, \varphi_e(3), \varphi_a(3), 3) \end{aligned} \right] \right\} \quad (3.21)$$

Mode 2 : Machine en panne

$$v_h(x, e, a, 2) = \frac{1}{\rho + \frac{d}{h_x} - q_{22}} \left[\begin{aligned} & c^+ x^+ + c^- x^- + c_r \\ & + \frac{d}{h_x} (v_h(x - h_x, e, a, 2)) \\ & + q_{21} v_h(x, \varphi_e(1), \varphi_a(1), 1) \end{aligned} \right] \quad (3.22)$$

Mode 3 : Machine en maintenance préventive

$$v_h(x, e, a, 3) = \frac{1}{\rho + \frac{d}{h_x} - q_{33}} \left[\begin{aligned} & c^+ x^+ + c^- x^- + c_0 \\ & + \frac{d}{h_x} (v_h(x - h_x, e, a, 3)) \\ & + q_{31} v_h(x, \varphi_e(1), \varphi_a(1), 1) \end{aligned} \right] \quad (3.23)$$

Avec $I^+ = \text{Ind}\{u - d \geq 0\}$, $I^- = \text{Ind}\{u - d < 0\}$, $q_{11} = -q_{12}(a) + \omega$, $q_{22} = -q_{21}$ et $q_{33} = -q_{31}$.

Nous présentons à la section suivante, l'algorithme basé sur une approche récursive permettant d'obtenir les politiques optimales de commandes, solutions de ce système de trois équations obtenues (3.21)-(3.23). Dans la section suivante, un exemple numérique permettra d'illustrer les politiques optimales de production et de maintenance préventive.

3.4 Résolution numérique

Cette section fournit un exemple numérique pour illustrer les résultats obtenus. Ceci se fera par une simulation dans le logiciel Matlab Version R2020b. Le domaine de résolution D est défini par :

$$D = G_{h_x} * G_{h_a}$$

avec $G_{h_x} = \{x: -5 \leq x \leq 120\}$; $G_{h_a} = \{a: 0 \leq a \leq 100\}$, ; $h_x = 0.5$; $h_a = 1$.

Les valeurs des paramètres nécessaires dans l'exemple numérique tirées de la littérature sont présentées dans le Tableau 3.1. Ces valeurs respectent bien la condition de faisabilité énoncée par l'inéquation (3.4).

Tableau 3.1 Données de l'exemple numérique

c^+	c^-	c_r	c_0	c^e	u_{max}	d	L	k	K_0
5	100	25	2500	40	2	1.5	250	0.8	0.005
K_1^∞	K_2	k_3	θ_0	λ	ρ	ω_{min}^{-1}	ω_{max}^{-1}	q_{21}^{-1}	q_{31}^{-1}
0.0075	$5 \cdot 10^{-6}$	0.02	2	0.6	0.01	10^6	15	6	12

La Figure 3.3 présente respectivement l'évolution du taux de panne q_{12} et de l'index d'émission θ_0 en fonction de l'âge de la machine.

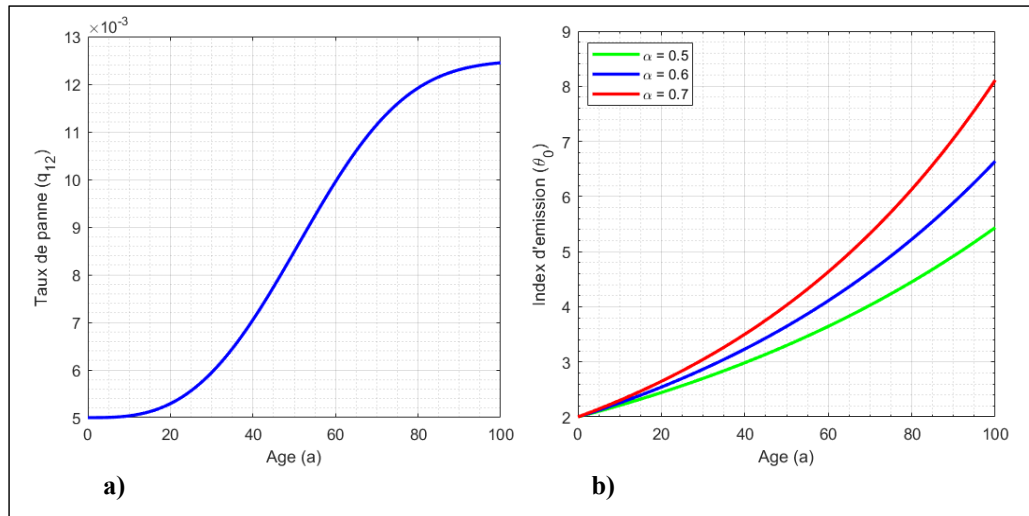


Figure 3.3 Effet de la dégradation de la machine sur le taux de panne $q_{12}(a)$ et l'index d'émission $\theta(a)$ pour différentes valeurs de α

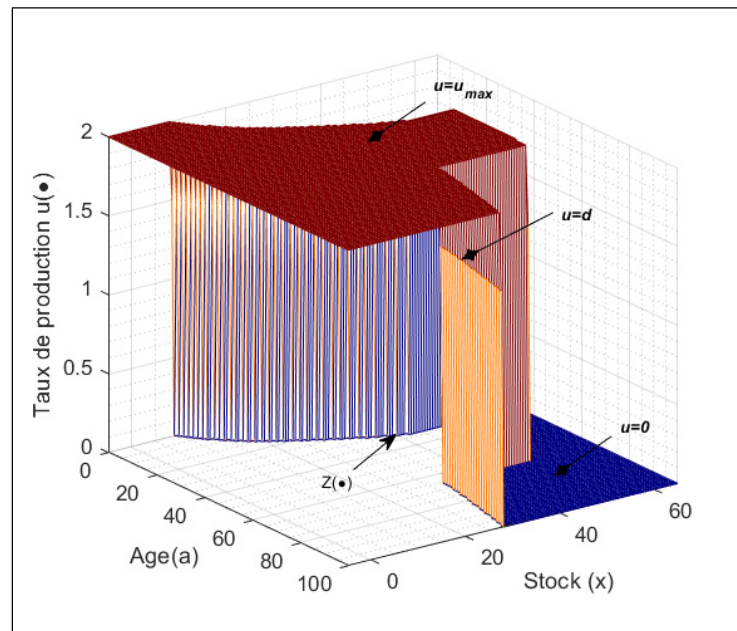


Figure 3.4 Politique de production

La politique de production $u(x, e, a, \xi)$ illustrée à la Figure 3.4, indique le taux de production basé sur le nombre de produits finis à maintenir en inventaire afin de se prémunir contre les pannes et les réparations de la machine d'une part et d'autre part des émissions pénalisantes après la limite d'émission L . Ce niveau de stock de sécurité à bâtir pour éviter les ruptures de

stock et réduire ses émissions de GES est défini par le seuil critique $Z(a, e)$. Ce seuil critique dépend de l'âge de la machine $a(t)$ et du niveau d'émissions $e(t)$. La politique de production obtenue montre qu'il n'est pas nécessaire de produire lorsqu'on a un niveau confortable d'inventaire de produits finis. Dans ce cas, le système doit être en arrêt, soit son taux de production mis à zéro. Au fur et à mesure que la machine produit, elle prend de l'âge. Ce qui conduit à la diminution de sa fiabilité (Équation(3.2)) et l'augmentation de son taux d'émission (Équation (3.8)).

Pour mieux comprendre l'interprétation la politique de production, nous divisons le plan (x, e) en trois zones, (1), (2) et (3).

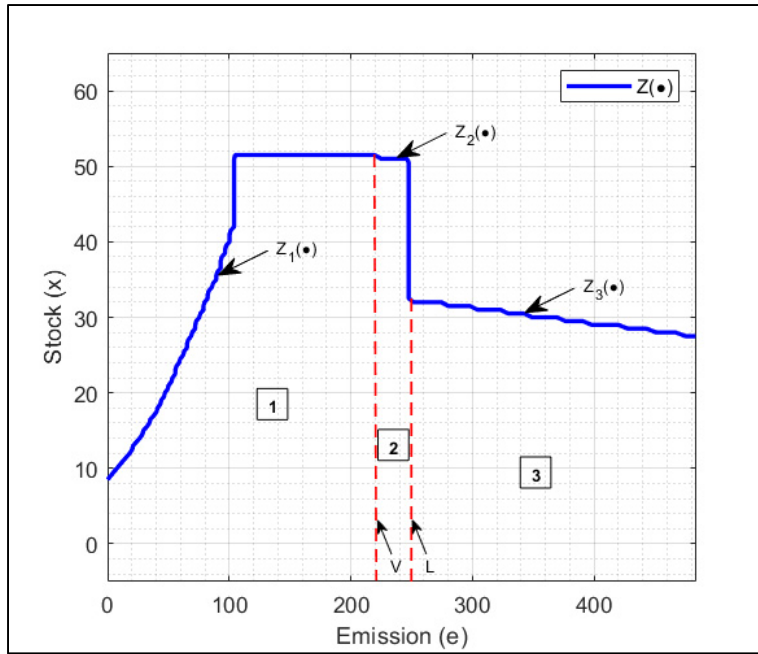


Figure 3.5 Seuil critique de production en fonction de (e)

Ainsi, la commande optimale de production est donnée par :

$$\begin{cases} \text{si } e < V : \\ u(\cdot) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_1(\cdot) \\ d & \text{si } x = Z_1(\cdot) \\ 0 & \text{si } x > Z_1(\cdot) \end{cases} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} \text{si } V \leq e < L : \\ u(\cdot) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_2(\cdot) \\ d & \text{si } x = Z_2(\cdot) \\ 0 & \text{si } x > Z_2(\cdot) \end{cases} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} \text{si } e \geq L : \\ u(\cdot) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_3(\cdot) \\ d & \text{si } x = Z_3(\cdot) \\ 0 & \text{si } x > Z_3(\cdot) \end{cases} \end{cases} \quad (3.26)$$

Cette politique de production suit les règles suivantes :

- Si le niveau d'inventaire courant est inférieur au seuil critique $Z(a, e)$, le taux de production doit être passé à sa valeur maximale $u_{\max}$;
- Si le niveau d'inventaire courant est égal au seuil critique $Z(a, e)$, le taux de production doit être passé à la valeur du taux de demande d ;
- Si le niveau d'inventaire courant est supérieur au seuil critique $Z(a, e)$, le taux de production doit être passé à la valeur 0.

Nous observons qu'à l'approche de la limite d'émission L , la politique recommande de baisser progressivement la production pour la simple raison d'anticiper le coût des émissions excessives. Aussi, on observe qu'après la limite L , le seuil critique $Z(a, e)$ décroît graduellement du fait que de plus de pénalités des émissions générées devant les pénuries.

L'activité de réparation de la machine après la survenue d'une panne étant minime, n'a donc pas d'impact sur le niveau de détérioration de la machine. On observera qu'à partir d'un certain âge et niveau d'émission, il sera difficile de satisfaire la demande. La politique de maintenance préventive définira quand prendre la décision d'appliquer cette activité en utilisant comme rétroaction l'âge de la machine $a(t)$, le niveau d'émission $e(t)$, et le niveau de stock $x(t)$. La résolution du problème d'optimisation revenait alors à déterminer le seuil nécessaire pour restaurer la machine à ses conditions initiales afin d'améliorer sa fiabilité à travers le taux de panne $q_{12}(a)$ et son index d'émission $\theta(a)$.

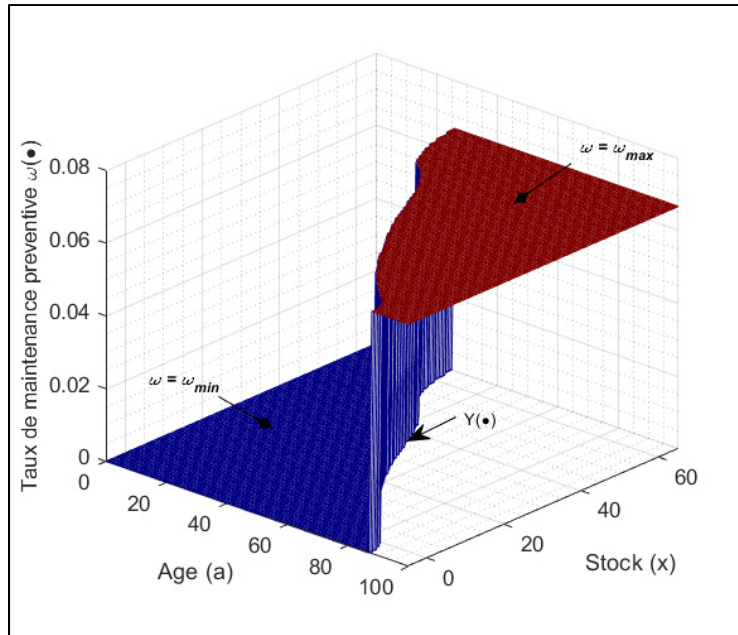


Figure 3.6 Politique de maintenance préventive

La politique optimale de maintenance préventive $\omega(x, e, a, \xi)$, illustrée à la Figure 3.6, indique le taux d'envoi en maintenance préventive basé sur le niveau d'inventaire $x(t)$, pour chaque âge de la machine $a(t)$ et chaque niveau d'émission $e(t)$, qui prend la valeur ω_{max} , si la machine doit être envoyée en maintenance préventive, et la valeur ω_{min} si l'action n'est pas recommandée.

Pour mieux comprendre la politique de maintenance préventive, nous divisons le plan (x, a) en trois zones, A, B et C (Figure 3.7).

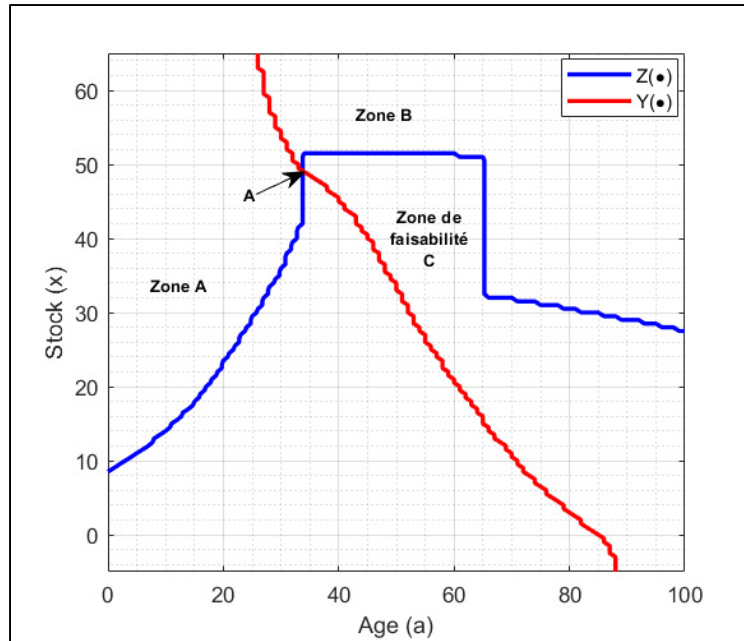


Figure 3.7 Traces de la politique de production et de maintenance préventive

La politique optimale de maintenance préventive, tout comme la politique de production, a une structure en escalier et est décrite comme suit:

$$\omega(\cdot) = \begin{cases} 1 & \text{si } a \geq A \text{ et } x \geq Y(\cdot) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.27)$$

où $Y(\cdot)$ est une fonction dépendant de l'âge de la machine $a(t)$ et du niveau d'émission $e(t)$ qui donne le seuil critique sur le nombre de produits finis nécessaire de faire passer le taux de maintenance préventive de ω_{min} à ω_{max} .

Les différentes zones A, B, C sont décrites comme suit :

Zone A : Dans cette zone, il n'est pas recommandé d'envoyer la machine en maintenance préventive. La machine est encore en période de jeunesse, capable de satisfaire la demande avec une rareté de panne et pollue moins. Ainsi, le taux d'envoi en maintenance préventive $\omega(\cdot)$ est à sa valeur minimale.

Zone B : Ici, l'effet de détérioration de la machine est plus prononcé sur sa fiabilité et son index d'émission. Dû au vieillissement de la machine, on observera un dépassement précoce de la limite d'émission imposée par la législation. Le coût excédentaire d'émission étant

dispendieux, la politique recommandant l'envoi précipité de la machine en maintenance préventive est bien justifiée. Ce qui explique, le passage du taux d'envoi en maintenance préventive $\omega(\cdot)$ à sa valeur maximale.

Zone C : Comme illustre la Figure 3.7, cette zone est l'intersection des politiques de production et de maintenance préventive caractérisée par le point A , $Z(a, e) \cap Y(a, e) = \{A\}$. Nous l'appelons zone de faisabilité de la maintenance préventive. Cette zone définit de façon optimale l'âge de la machine, le niveau d'émission et le niveau d'inventaire recommandés pour l'envoi de la machine en maintenance préventive. Ainsi, la nouvelle politique optimale de maintenance préventive peut être écrite comme suit :

$$\omega^*(\cdot) = \begin{cases} \omega_{max} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{Zone } C \\ \omega_{min}, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.28)$$

Dans la prochaine section, nous validerons notre modèle et la structure de nos résultats obtenues à travers l'analyse de sensibilité.

3.5 Analyse de sensibilité

Les politiques de commande optimale obtenues sont validées par une analyse de sensibilité en faisant varier certains paramètres du modèle. Nous analysons le comportement du seuil de production $Z(\cdot)$ et de la trace de la politique de maintenance préventive $Y(\cdot)$ en faisant varier les paramètres suivant: le coût de pénurie c^- , coût de mise en inventaire c^+ , coût d'émission c^e , coût de la maintenance préventive c_0 et paramètre d'ajustement de l'index d'émission λ . Dans les cas suivant de variation des paramètres on peut noter que les symboles A_1, A_2 et A_3 sont mis en évidence sur les figures ci-dessous afin d'illustrer le point d'intersection de la trace $Y(\cdot)$ et du seuil de production $Z(\cdot)$ indiquant l'âge auquel il est recommandé d'envoyer la machine en maintenance préventive. Les trois points d'intersection A_1, A_2 et A_3 correspondent respectivement aux valeurs petites, moyennes et hautes des paramètres qui seront modifiés dans l'analyse de sensibilité.

3.5.1 Coût de pénurie

Les résultats présentés à la Figure 3.8 pour trois différentes valeurs de coût de pénurie $c^- = 50, 100$ et 150 montrent que lorsque le coût de pénurie augmente, la maintenance préventive de la machine est plus fortement recommandée. En effet, dans cette situation, le seuil critique de production $Z(\cdot)$ doit être augmenté lorsque c^- augmente afin d'éviter les pénuries lors des périodes de pannes de la machine, et pour atteindre ce niveau, la machine doit produire plus de pièces à son taux maximale production u_{max} . Une situation qui conduit à plus d'émission. Ainsi, la machine se détériorera plus rapidement, et pour cette raison, elle doit être envoyée en maintenance préventive plus tôt suivant son âge : $A_3 < A_2 < A_1$.

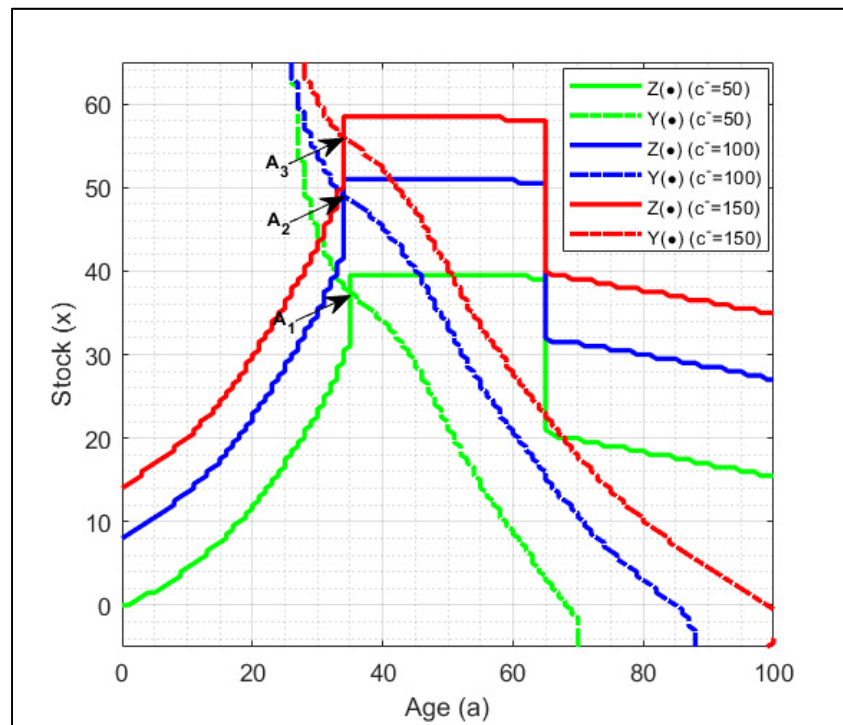


Figure 3.8 Variation de c^- et sa sensibilité sur $Z(a)$ et $Y(a)$

3.5.2 Coût de mise en inventaire

Les résultats présentés à la Figure 3.9 pour trois différentes valeurs de coût de mise en inventaire $c^+ = 4, 5$ et 6 montrent que lorsque le coût de mise en inventaire augmente, la

maintenance préventive de la machine est moins recommandée. En effet, dans cette situation où le coût de mise en inventaire augmente le système stocke moins, donc le seuil critique de production $Z(\cdot)$ doit être diminué pour réduire la zone de production au taux maximale de production u_{max} . Une situation qui conduit à moins d'émission. Ainsi, la machine se détériorera moins rapidement, et pour cette raison, nous observons l'envoi en maintenance préventive retardée de la machine suivant son âge : $A_1 < A_2 < A_3$.

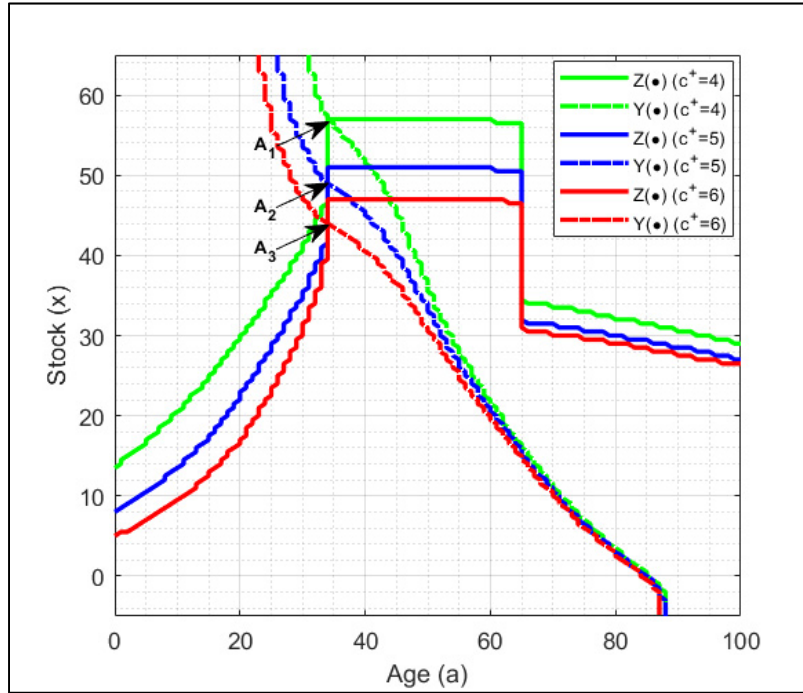


Figure 3.9 Variation du c^+ et sa sensibilité sur $Z(\cdot)$ et $Y(\cdot)$

3.5.3 Coût d'émission

Les résultats présentés à la Figure 3.10 pour trois différentes valeurs de coût de pénalité des émissions $c^e = 20, 40$ et 60 montrent que lorsque le coût des émissions augmente, la maintenance préventive de la machine est plus recommandée. En effet, l'augmentation de la pénalité des émissions entraîne le système à produire plus avant la limite d'émission et le pousse à baisser le rythme de production après la limite d'émission. Ce qui explique l'augmentation du seuil critique $Z_{1,2}(\cdot)$ et la diminution conséquente du seuil critique de

production $Z_3(\cdot)$ pour réduire la zone de production au taux maximale de production u_{max} qui est tout à fait réaliste. Une situation conduisant à moins d'émission sera bénéfique pour l'entreprise de respecter les exigences environnementales. Ainsi, la machine se détériorera plus rapidement, et pour cette raison, nous observons l'envoi en maintenance préventive plus tôt de la machine suivant son âge : $A_3 < A_2 < A_1$.

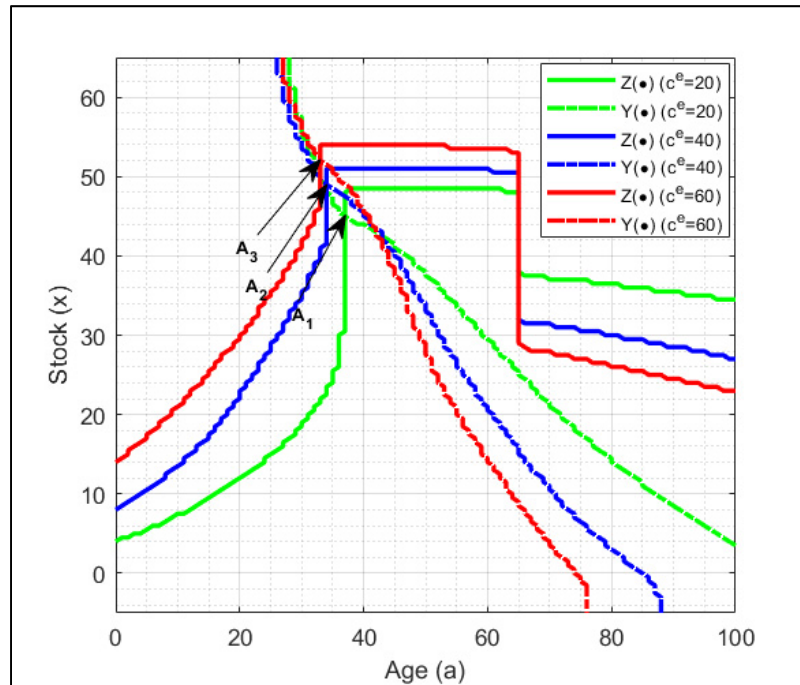


Figure 3.10 Variation du c^e et sa sensibilité sur $Z(\cdot)$ et $Y(\cdot)$

3.5.4 Coût de la maintenance préventive

Les résultats présentés à la Figure 3.11 pour trois différentes valeurs du coût de la maintenance préventive $c_{mp} = 1500, 2500$ et 3500 montrent que lorsque le coût de la maintenance préventive augmente, la maintenance préventive de la machine est moins recommandée. En effet, plus il est coûteux de faire la maintenance préventive de la machine, mieux il sera rentable pour l'entreprise de le faire un peu plus tard. C'est pour cette raison, que nous observons le décalage des points d'intersections des traces $Z(\cdot)$ et $Y(\cdot)$: $A_1 < A_2 < A_3$.

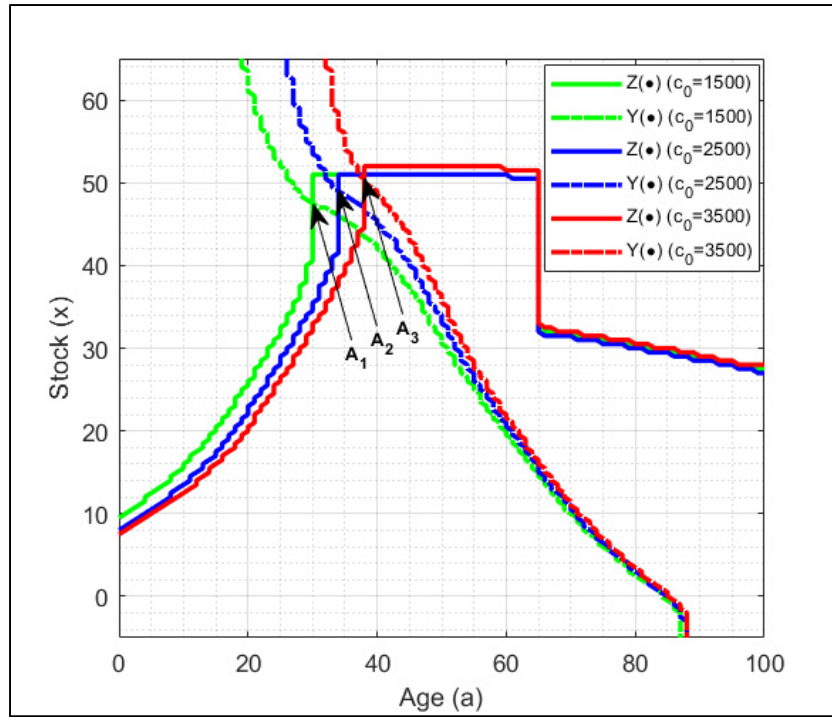


Figure 3.11 Variation du c_0 et sa sensibilité sur $Z(\cdot)$ et $Y(\cdot)$

3.5.5 Paramètre d'ajustement de l'index d'émission

Les résultats présentés à la Figure 3.12 pour trois différentes valeurs du paramètre d'ajustement de l'index d'émission $\lambda = 0.4, 0.6$ et 0.8 montrent que lorsque le paramètre d'ajustement de l'index d'émission augmente, la maintenance préventive de la machine est plus recommandée. En effet, l'augmentation de λ conduit à plus d'émission et l'atteinte précoce de la limite d'émission L . Ce qui entraîne le système à produire plus avant la limite d'émission et le pousse à baisser le rythme de production après la limite d'émission pour réduire le coût d'excédentaire d'émission. Ce qui explique l'augmentation du seuil critique $Z_{1,2}(\cdot)$ et la diminution conséquente du seuil critique de production $Z_3(\cdot)$ pour réduire la zone de production au taux maximale de production u_{max} qui est tout à fait réaliste et bénéfique pour l'entreprise de respecter les exigences environnementales. Ainsi, la machine se détériorera plus rapidement, et pour cette raison, nous observons l'envoi en maintenance préventive plus tôt de la machine suivant son âge : $A_3 < A_2 < A_1$.

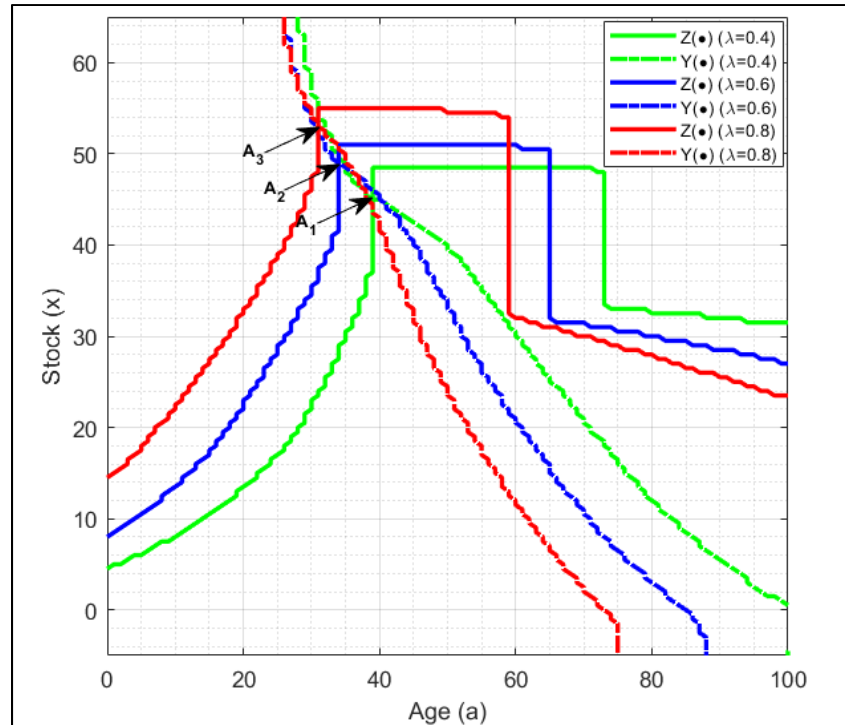


Figure 3.12 Variation du λ et sa sensibilité sur $Z(\square)$ et $Y(\square)$

3.6 Étude comparative

Sur la base de l'analyse de travaux de la littérature, nous comparons la performance de nos politiques de commande optimale, que nous désignons par politique-I, à celles de la littérature prenant en compte la dynamique de la machine, décrites comme suit :

- Politique-II : Cette politique est celle des travaux de (Ben-Salem et al., 2015b), caractérisée par deux seuils optimaux de production Z_1^{BS} et Z_2^{BS} , un âge à partir duquel il est recommandé d'envoyer la machine en maintenance préventive A^{BS} et une limite volontaire d'émission V^{BS} pour changer de seuil optimal de production. Ainsi cette politique-II à deux seuils donnée par les équations (3.29)-(3.31) peut être vue comme une version simplifiée de notre politique-I.

$$\begin{cases} si\ e \leq V^{BS} : \\ u(x, e) = \begin{cases} u_{\max} & si\ x < Z_1^{BS} \\ d & si\ x = Z_1^{BS} \\ 0 & si\ x > Z_1^{BS} \end{cases} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\begin{cases} si\ e > V^{BS} : \\ u(x, e) = \begin{cases} u_{\max} & si\ x < Z_2^{BS} \\ d & si\ x = Z_2^{BS} \\ 0 & si\ x > Z_2^{BS} \end{cases} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\omega(\cdot) = \begin{cases} 1 & si\ a \geq A^{BS} \text{ et } x \geq Z_2^{BS} \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (3.31)$$

Nous procédons l'analyse comparative de la politique optimale-I par rapport à la politique -II en faisant varier les paramètres suivant : coût de pénurie c^- , coût de mise en inventaire c^+ , coût d'émission c^e , coût de maintenance préventive c_0 et le paramètre d'ajustement de l'index d'émission λ . Comme données de base pour la comparaison, nous prenons $c^+ = 2$, $c^- = 150$, $c^e = 40$, $\theta_0 = 2$, $q_1 = 0.005$, $q_2 = 0.0075$, $q_{21} = 1/6$, $q_{31} = 1/12$, $u_{\max} = 2$, $d = 1.5$, $c_r = 25$, $c_0 = 2500$, $\omega_{\min} = 10^{-6}$, $\omega_{\max} = 1/15$. Nous considérons la performance économique de notre politique-I par le gain en \$ par rapport aux politiques- II qui représente la fonction valeur de notre modèle.

3.6.1 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de pénurie

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 3.2 et la représentation graphique à la Figure 3.13.

Tableau 3.2 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^-

	c^-	50	100	150	200	250
Politique-I	Z_{1min}	25	37	45	51	55
	Z_{1max}	69	83	91	97	101
	Z_{2max}	69	83	91	97	101
	Z_{2min}	65	79	87	93	97
	Z_{3max}	27	41	49	55	59
	Z_{3min}	23	35	43	49	55
	A	48	46	44	42	40
	Y	69	81	89	95	97
politique-II	Z_1^{BS}	37	51	59	65	69
	Z_2^{BS}	3	9	15	19	23
	A^{BS}	52	48	46	44	42
Coût politique-I		23877	26775	28585	29727	30845
Coût politique-II		25951	29044	31103	32425	33566
Gain politique I / II		2074	2269	2518	2698	2721

Sur la Figure 3.13, nous observons d'une part, lorsque le coût de pénurie c^- augmente, le coût des politiques augmente du fait de l'augmentation des seuils critiques de production (Tableau 3.2). Plus le système met des produits en inventaire plus ça coûte et on s'éloigne des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique optimale I et recommandant tardivement l'envoi en maintenance préventive de la machine, elle tolère donc plus les ruptures de stock et subit plus de pénalité d'émission respectivement. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique-I par rapport à la politique-II avec le coût de pénurie. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 8 à 9% sur la politique-II pour ces variations de coût de pénurie.

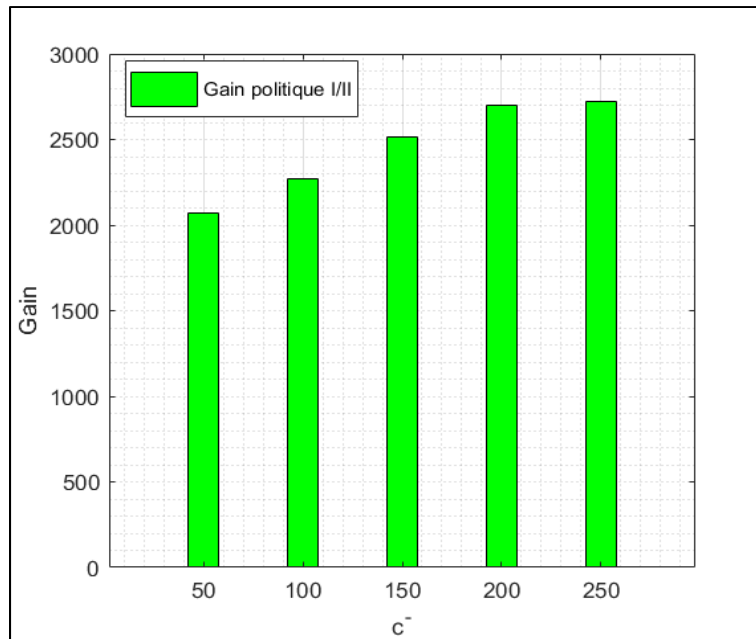


Figure 3.13 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de $\bar{c}$

3.6.2 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de mise en inventaire

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents et le gain de la politique optimale I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 3.3 et la représentation graphique à la Figure 3.14.

Tableau 3.3 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de $\bar{c}^+$

	$\bar{c}^+$	1	2	3	4	5
Politique-I	Z_{1min}	67	45	31	23	17
	Z_{1max}	113	91	77	69	63
	Z_{2max}	113	91	77	69	63
	Z_{2min}	109	87	75	67	61
	Z_{3max}	55	49	45	43	41
	Z_{3min}	49	43	41	39	37
	A	42	44	46	48	52
	Y	111	89	75	67	59
politique-II	Z_1^{BS}	67	59	55	51	47
	Z_2^{BS}	15	15	15	13	13
	A^{BS}	44	46	48	52	54

c^+	1	2	3	4	5
Coût total politique-I	24659	28585	32957	36774	40255
Coût total politique-II	22664	31103	35855	40188	44175
Gain politique I / II	1995	2518	2897	3414	3920

Sur la Figure 3.14, nous observons d'une part, lorsque le coût de mise en inventaire c^+ augmente, le coût des politiques augmente du fait de la diminution des seuils critiques de production (Tableau 3.3). En fait, le système produisant moins, il génère moins d'émission et se rapproche plus des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, la politique II stockant moins que la politique optimale I et recommandant tardivement l'envoi en maintenance préventive de la machine, elle tolère donc plus les ruptures de stock et subit plus de pénalité d'émission respectivement. Ces observations permettent d'expliquer l'augmentation du gain de la politique-I par rapport à la politique-II avec le coût de mise en inventaire. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 8 à 10% sur la politique-II pour ces variations de coût de mise en inventaire.

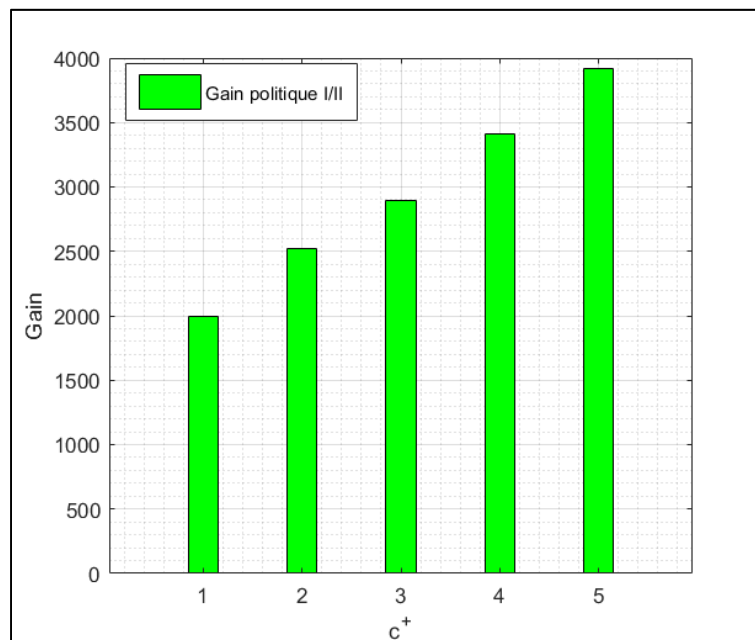


Figure 3.14 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^+

3.6.3 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût d'émissions

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 3.4 et la représentation graphique à la Figure 3.15.

Tableau 3.4 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^e

	c^e	20	30	40	50	60
Politique-I	Z_{1min}	33	39	45	51	53
	Z_{1max}	83	87	91	93	97
	Z_{2max}	83	87	91	93	97
	Z_{2min}	83	85	87	89	95
	Z_{3max}	57	53	49	47	45
	Z_{3min}	53	47	43	41	39
	A	48	46	44	42	40
	Y	75	87	89	93	97
politique-II	Z_1^{BS}	65	61	59	57	55
	Z_2^{BS}	27	19	15	13	11
	A^{BS}	52	48	46	44	42
Coût total politique-I		23045	25991	28585	31025	33667
Coût total politique-II		24949	28321	31103	33827	36542
Gain politique I / II		1904	2331	2518	2802	2875

Sur la Figure 3.15, Nous observons d'une part, lorsque le coût d'émissions c^e augmente, le coût des politiques augmente. L'explication apportée à cela est que les émissions étant plus pénalisées (afin d'amener le manufacturier à réduire ses émissions de GES), on observe une diminution des seuils critiques de production après la limite d'émission (Tableau 3.4). Ainsi le système a plus de chance de subir les pénuries, d'où l'influence du coût de pénurie. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique-I (avec ses seuils critiques de production décroissant) et recommandant tardivement l'envoi en maintenance préventive de la machine, elle tolère donc plus les ruptures de stock et subit plus de pénalité d'émission respectivement. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique I par rapport à II avec le coût

d'émissions. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance écomonique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 8 à 9% sur la politique II.

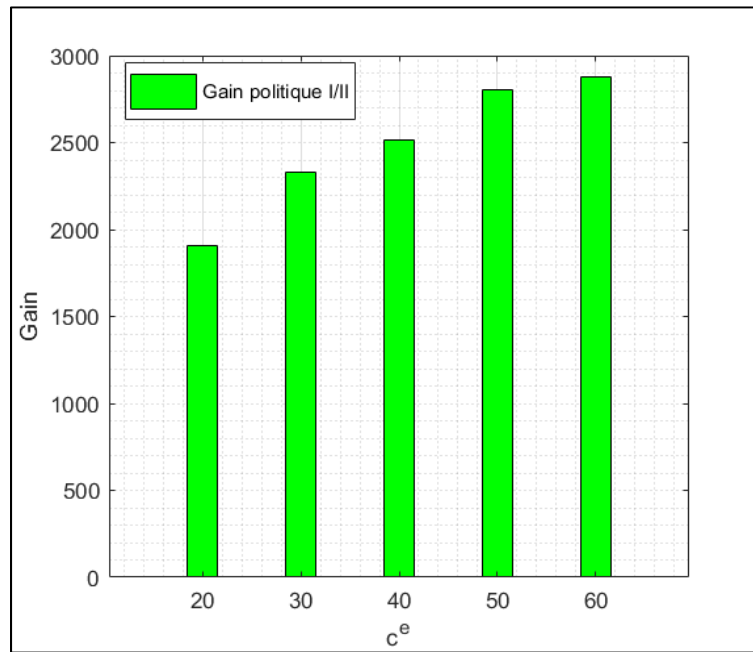


Figure 3.15 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^e

3.6.4 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de maintenance préventive

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 3.5 et la représentation graphique à la Figure 3.16.

Tableau 3.5 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_o

	c_o	500	1500	2500	3500	4500
Politique-I	Z_{1min}	53	49	45	43	39
	Z_{1max}	87	89	91	93	95
	Z_{2max}	87	89	91	93	95
	Z_{2min}	87	87	87	87	87
	Z_{3max}	49	49	49	49	49
	Z_{3min}	43	43	43	43	43
	A	36	40	44	50	56
	Y	85	87	89	93	95

c_o		1	2	3	4	5
politique-II	Z_1^{BS}	65	63	59	57	55
	Z_2^{BS}	15	15	15	15	15
	A^{BS}	42	44	46	54	58
Coût politique-I		25181	26900	28585	30234	31854
Coût politique-II		27693	29416	31103	32789	34473
Gain politique I / II		2512	2516	2518	2555	2618

Sur la Figure 3.16, Nous observons d'une part, lorsque le coût de maintenance préventive c_o augmente, le coût des politiques augmente. L'explication apportée à cela est que l'activité de maintenance préventive étant plus dispendieuse, la politique recommande la prise de décision tardive pour cette activité (Tableau 3.5). Une situation conduisant à plus d'émission. D'autre part, la politique-II stockant moins que la politique-I (avec ses seuils critiques de production décroissant) et recommandant tardivement l'envoi en maintenance préventive de la machine, elle tolère donc plus les ruptures de stock et subit plus de pénalité d'émission respectivement. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique I par rapport à II avec le coût d'émissions. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 8 à 10% sur la politique II.

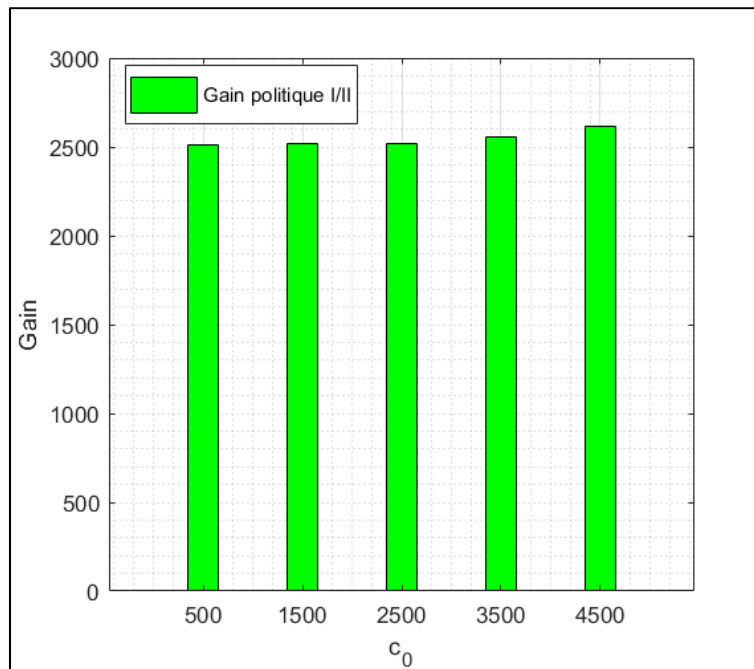


Figure 3.16 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_o

3.6.5 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du paramètre d'ajustement de l'index d'émission

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 3.6 et la représentation graphique à la Figure 3.17.

Tableau 3.6 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de λ

	λ	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Politique-I	Z_{1min}	41	43	45	49	51
	Z_{1max}	87	89	91	93	95
	Z_{2max}	87	89	91	93	95
	Z_{2min}	83	87	87	91	91
	Z_{3max}	49	49	49	49	49
	Z_{3min}	47	45	43	43	41
	A	48	46	44	42	40
	Y	87	89	89	93	95
politique-II	Z_1^{BS}	83	75	59	51	49
	Z_2^{BS}	17	17	15	13	13
	A^{BS}	52	48	46	44	42
Coût politique-I		22767	24515	28585	32150	34489
Coût politique-II		25103	26944	31103	35364	41038
Gain politique I / II		2336	2429	2518	3214	6549

Sur la Figure 3.17, Nous observons d'une part, lorsque le paramètre d'index d'émission λ augmente, le coût des politiques augmente. L'explication apportée à cela est que la machine étant plus polluante, elle génère plus d'émissions, une situation qui conduit à plus de pénalités. On observe une diminution des seuils critiques de production après la limite d'émission afin d'amener le manufacturier à réduire ses émissions de GES (Tableau 3.6). Ainsi le système a plus de chance de subir les pénuries, d'où l'influence du coût de pénurie. D'autre part, la politique II stockant moins que la politique-I (avec ses seuils critiques de production décroissant) et recommandant tardivement l'envoi en maintenance préventive de la machine, elle tolère donc plus les ruptures de stock et subit plus de pénalité d'émission respectivement. Ce qui explique l'augmentation du gain de la politique I par rapport à II avec le paramètre

d'index d'émission. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance écomonique de la politique I en terme de pourcentage de gain de 9 à 19% sur la politique II.

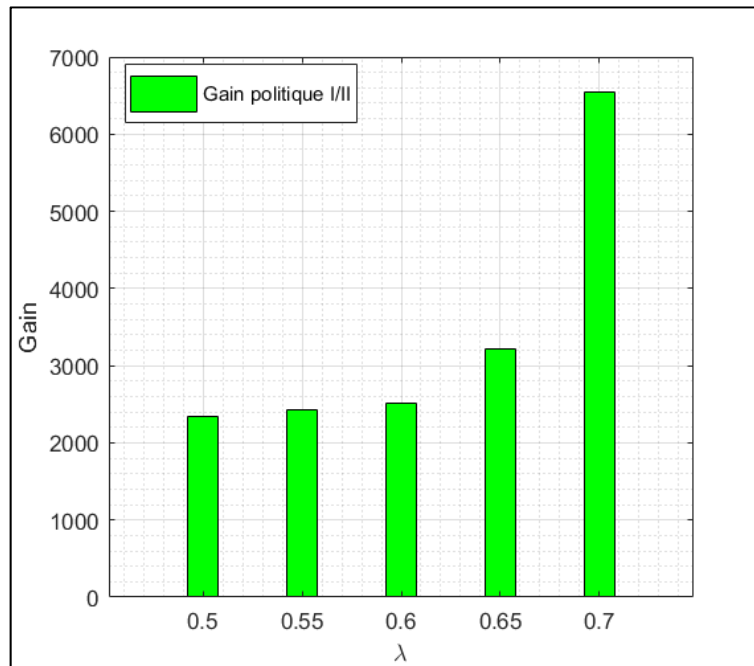


Figure 3.17 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de λ

Dans la section suivante, nous illustrons la mise en œuvre des résultats obtenus par un schéma d'implantation afin de faciliter la commande du système manufacturier.

3.7 Implications managériales

Les implications managériales de notre travail dans la pratique commerciale nécessitent des informations complètes et claires sur l'état du système manufacturier pour mettre en œuvre la politique de production et maintenance préventive obtenue. Le gestionnaire peut contrôler le système avec notre politique en observant le niveau de stock de service de la demande client, ses émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'âge de la machine. À la lumière de cette discussion, notre politique propose deux commandes : le taux de production pour bâtir le stock de sécurité et le taux d'envoi en maintenance préventive pour déclencher son activité. La politique conjointe basée sur la programmation dynamique stochastique obtenue est

raisonnable, pratique pour un contrôle d'usine, car elle permet au système de fonctionner de manière plus fluide et prévisible, et principalement en raison de sa facilité de mise en œuvre.

La mise en œuvre de notre politique de contrôle de la production est encore facilitée par l'utilisation d'un schéma logique d'implantation, ce qui nous guide dans la prise de décision. En supposant que la machine est opérationnelle et attend sa prochaine panne avec un niveau de stock (x), un niveau d'émission (e) et un âge (a). Le taux de production peut être facilement définie en trois niveaux : le premier pour bâtir le stock de sécurité pour contrer les temps de non disponibilité liés aux pannes et réparations, le second pour décider quand baisser ce stock selon la limite volontaire des émissions et le dernier pour indiquer quand baisser à nouveau le stock de sécurité lorsque le coût excédentaire d'émission devient très pénalisant. Ces niveaux sont représentés en intervalles et circonscrits en zones comme suit : $e < V$, $V \leq e < L$, $e \geq L$ (équations (3.24)-(3.26)) et Zone 1, Zone 2, Zone 3 respectivement (Figure 3.5). Le taux d'envoi en maintenance préventive peut être facilement définie en un niveau, celui pour atteindre l'âge à partir duquel le manufacturier prend la décision d'envoyer la machine en maintenance préventive et le niveau de stock confortable pour se prémunir contre sa non disponibilité pendant cette activité. Ce niveau est représenté par l'intervalle $a \geq A^*$ et circonscrit par la zone de faisabilité C (Figure 3.7).

Les seuils critiques de notre politique optimale conjointe obtenu étant variables et difficiles à mettre en application en pratique industrielle, nous avons déterminé une politique sous-optimale. Pour ce faire, nous procédons par découpage en parts égales des zones avec variation de seuils critiques. Nous avons subdivisé les zones 1 et 3 ($e < V$ et $e \geq L$ respectivement) de notre politique optimale de production défini par le seuil critique $Z_1(\cdot)$ et $Z_3(\cdot)$ respectivement. Pour ce qui est de la zone 2 ($V \leq e < L$), nous avons pris le minimum du seuil critique $Z_2(\cdot)$. La politique de contrôle à implanter présentée à la Figure 3.18 en subdivisant comme présente le Tableau 3.7 est une bonne approximation de la politique optimale. Nous choisissons en définitive le cas (4) du tableau avec une différence de coût de 0.75% comme la politique sous-optimale de contrôle à implanter. Les résultats obtenus des valeurs numériques des paramètres optimaux à utiliser dans la prise de décision pour faciliter la mise en œuvre de notre politique sont résumées ci-dessous :

$E_1 = 35, E_2 = 70, E_3 = 105, V = 220, L = 250, E_4 = 365, A^* = 34, A_1 = 50, A_2 = 66,$
 $A_3 = 82, Z_{11} = 9, Z_{12} = 25, Z_{13} = 35, Z_{14} = 52, Z_2 = 51.5, Z_{31} = 30.5, Z_{32} = 28, Y_1 = 42,$
 $Y_2 = 26, Y_3 = 10, Y_4 = 0.$

Tableau 3.7 Coût politique de contrôle

Politique optimale de contrôle -I (coût total)	Politique de contrôle à implanter					
	Cas		1	2	3	4
	Subdivisions en paliers	Zone 1	1	2	3	4
		Zone 2	1	1	1	1
		Zone 3	2	2	2	2
		Zone C	4	4	4	4
28091	Coût		29282	29215	28712	28302
	Différence par rapport à I		1191	1124	621	211
	Différence par rapport à I (%)		4.24	4	2.21	0.75

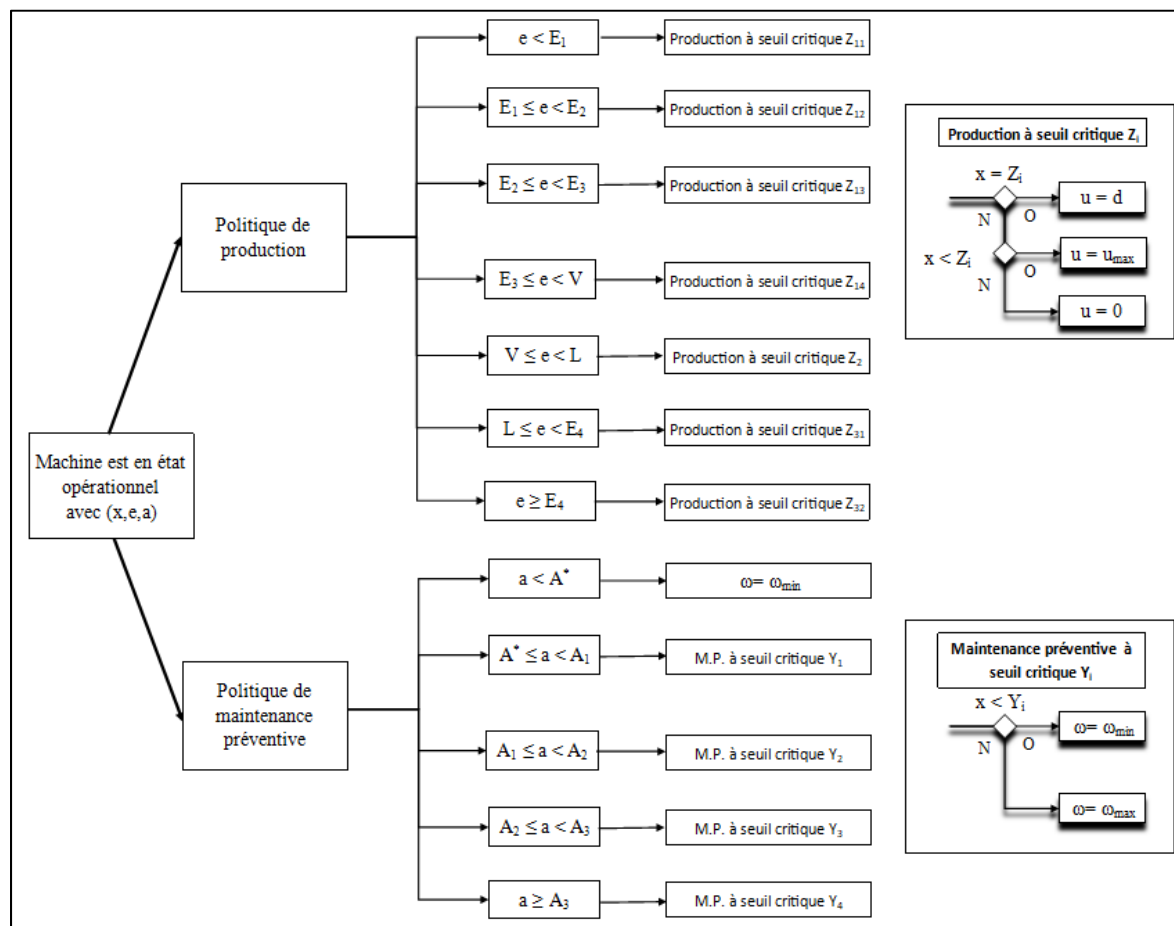


Figure 3.18 Schéma d'implantation de la politique de contrôle

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé simultanément les politiques optimales de production et de maintenance préventive d'un système manufacturier sujette à la détérioration sous contrôle des émissions de GES nocives à l'environnement.

En appliquant la théorie de commande stochastique, nous avons modélisé le système manufacturier au moyen d'une chaîne de Markov non homogène sur la base des variables de décision, le taux de production et le taux d'envoi en maintenance préventive. Par la suite, en utilisant l'approche de programmation dynamique stochastique nous avons développé les conditions d'optimum décrites par les équations de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). Nous avons résolu numériquement avec l'approche de Kushner et Dupuis et obtenu une politique de commande qui minimise le coût total de production. Les résultats ont montré que cette politique conjointe dépend du niveau d'émission et l'âge du système et se définit comme une politique environnementale à seuil critique (EHPP). Une analyse de sensibilité a été faite pour montrer l'effet de la variation de plusieurs paramètres sur nos politiques obtenues afin de valider notre modèle. Nous avons poursuivi par une étude comparative afin de positionner notre politique prescrite par rapport à celle de la littérature. Enfin, un schéma logique d'implantation de notre politique a été élaboré pour faciliter sa mise en œuvre en industrie. Il ressort que l'optimisation par l'approche de programmation dynamique stochastique apporte une grande amélioration dans le domaine de commande des systèmes manufacturiers avec détérioration intégrant le contrôle des émissions.

Au vu des grands enjeux environnementaux et les questions sur les changements climatiques, la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans secteur de l'industrie manufacturière est certes une solution. Mais aussi avec le déploiement de la logistique inverse assujetti par le nouveau modèle économique appelé économie circulaire, les organismes gouvernementaux incitent les manufacturiers à adopter cette nouvelle pratique dans leur gestion. L'objectif du prochain chapitre, permettra donc d'étendre nos modèles stochastiques de planification de la production pour des systèmes hybrides *manufacturing/remufacturing* en boucle fermée.

CHAPITRE 4

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UN SYSTÈME HYBRIDE MANUFACTURING/REMANUFACTURING EN BOUCLE FERMÉE SOUS CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE GES

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous traiterons le problème de commande optimale stochastique d'un système hybride *manufacturing/remanufacturing* en boucle fermée soumis aux perturbations aléatoires sous contrôle de ses émissions de GES. Le système manufacturier hybride est assimilé à deux machines (*manufacturing/remanufacturing*) produisant un seul type de produits (M2P1). Le critère de performance choisi est le coût total incluant le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, de *manufacturing* et *remanufacturing*, ainsi que le coût des émissions excédant la limite d'émission imposée par les autorités compétentes. Le but de ce chapitre est de déterminer les politiques de commande optimale de production qui minimisent le coût total sur un horizon de planification infini en tenant compte des exigences environnementales. L'atteinte de cette objectif se fera en six (6) étapes :

- Modélisation du système manufacturier basée sur la théorie de commande en contexte dynamique stochastique;
- Élaboration des conditions d'optimum du problème posé décrites par des équations aux dérivées partielles communément appelées équations d'HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman) par l'approche de programmation dynamique stochastique;
- Détermination des politiques de commande optimale de production par les méthodes numériques, solutions des équations qui décrivent l'optimum du problème formulé;
- Analyse de sensibilité afin de vérifier la validité du modèle proposé, la structure des résultats obtenus et leur robustesse.
- Étude comparative afin de positionner notre politique par rapport à celle de la littérature;
- Élaboration d'un schéma logique d'implantation pour faciliter la mise en œuvre en industrie de nos résultats obtenus.

4.2 Structure du système manufacturier

Dans cette étude, nous considérons les deux machines *manufacturing/remufacturing* sujettes aux pannes et réparations aléatoires produisant conjointement un type de produits à un taux $u_1(t)$ et $u_2(t)$ respectivement. Les produits finis sont entreposés afin de bâtir un stock $x(t)$ pour répondre à la demande client à taux constant d . L'approvisionnement des machines en matière première est maîtrisé et effectif en tout temps. La machine de *manufacturing* (M1) est destinée à la production à partir de la matière première et celle de *remanufacturing* (M2) destinée à la remise à neuf des produits en fin de vie recyclés provenant du marché.

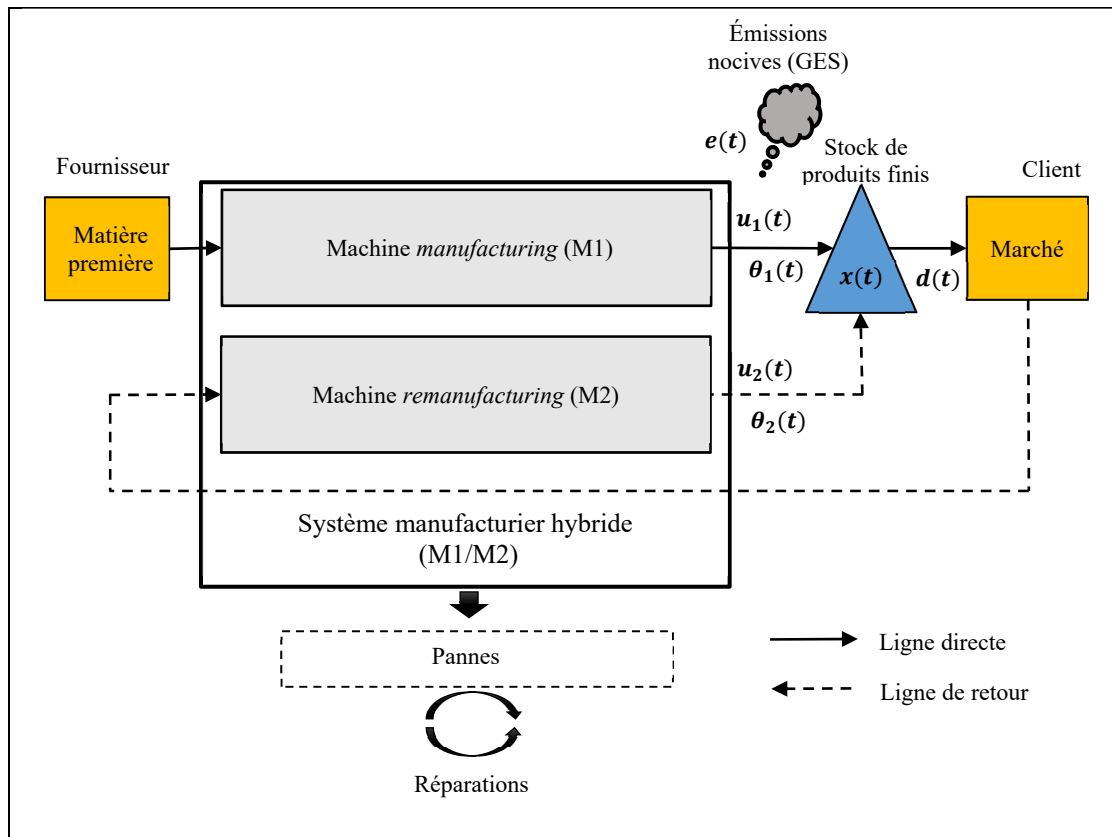


Figure 4.1 Structure du système manufacturier hybride

Sur l'aspect environnemental, nous caractérisons les machines de *manufacturing/remanufacturing* générant les émissions de gaz à effet de serre (GES) nocives $e(t)$ à l'environnement durant la production avec les index d'émission $\theta_1(t)$ et $\theta_2(t)$ respectivement.

Le système manufacturier est doté d'un dispositif de comptage des émissions en unité équivalente de volume de CO_2 . Selon l'approche de plafond des émissions, les émissions générées sont sanctionnées sous la forme d'une taxe environnementale si la limite d'émission standard L imposée par les autorités compétentes est dépassée.

4.3 Formulation du problème d'optimisation

Le système manufacturier étudié peut être modélisé par un système de commande stochastique à temps continu et à état hybride qui est composé d'une variable d'état discrète (mode du système au temps t $\xi(t)$) et de trois variables d'état continus (niveau d'inventaire de produits finis $x_1(t)$, niveau d'inventaire de produits retournés $x_2(t)$, et le niveau d'émission du système $e(t)$). Nous considérons l'activité de maintenance corrective remettant en opération les machines avec le même état d'usure.

4.3.1 Diagramme de transition d'états

Soit $\{\xi_m(t), t \geq 0\}$ le processus stochastique décrivant l'état de la machine m , $m = \{1,2\}$ à valeur dans $\Omega_1 = \{1,2\}$ et $\Omega_2 = \{1,2\}$ respectivement. Soit $\xi(t)$ le processus stochastique décrivant l'état du système à l'instant t . $\xi(t) = \{\xi_1(t), \xi_2(t)\}$.

Ainsi, le système manufacturier hybride peut être décrit à chaque temps t par le processus semi-Markovien $\xi(t)$ non homogène à états finis à valeur dans $\Omega = \{1,2,3,4\}$ (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Modes des deux machines du système manufacturier hybride

$\xi_1(t)$	1	1	2	2
$\xi_2(t)$	1	2	1	2
$\xi(t)$	1	2	3	4
$q_{12} = q_{34} = q_{12}^2, q_{21} = q_{43} = q_{21}^2, q_{13} = q_{24} = q_{12}^1, q_{31} = q_{42} = q_{21}^1.$				

Les probabilités de transitions sont données par l'équation (4.1).

$$P[\xi(t + \delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}(\cdot) \delta t + 0(t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}(\cdot) \delta t + 0(t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad (4.1)$$

où $q_{\alpha\beta}$ est le taux de transition du mode α au mode β avec $q_{\alpha\beta} \geq 0$ ($\alpha \neq \beta$).

$$q_{\alpha\alpha} = -\sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta}, \alpha, \beta \in \Omega \text{ et } \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0.$$

Le système manufacturier peut être aléatoirement dans l'un des six modes sur un horizon infini, comme décrit dans le diagramme de transition d'états à la Figure 4.2, avec les taux de transition fournis.

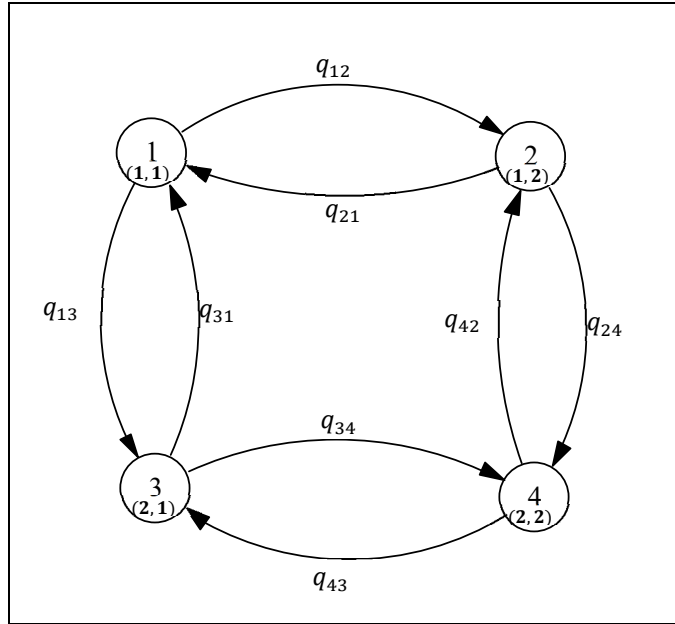


Figure 4.2 Diagramme de transition d'états

4.3.2 Matrice de taux transition d'états

Nous considérons les taux de transition q_{12}^1 et q_{12}^2 représentant l'inverse du temps moyen de bon fonctionnement (MTTF) des machines M1 et M2 respectivement avant la panne au mode 1. Parallèlement, le taux de transition q_{21}^1 , q_{21}^2 , représentant l'inverse du temps moyen de réparation (MTTR) de M1 et M2 au mode 2 respectivement. Les autres taux de transition sont nuls.

Par conséquent, le système étudié est caractérisé par la matrice de transition stochastique 4×4 , $Q = [q_{\alpha\beta}]$:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & 0 \\ q_{21} & q_{22} & 0 & q_{24} \\ q_{31} & 0 & q_{33} & q_{34} \\ 0 & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

4.3.3 Condition de faisabilité

Afin de répondre à la demande client pendant toute la durée de disponibilité de système hybride, la condition de faisabilité exprimée par la relation suivante doit être vérifiée :

$$\pi_1(u_{1max} + u_{2max}) + \pi_2 u_{1max} + \pi_3 u_{2max} > d \quad (4.3)$$

où π_i sont les probabilités limites au mode i , $i \in \{1,2,3\}$ connues comme les solutions en régime permanent des équations de Kolmogorov *forward*.

$$\dot{\pi} = \pi \times Q \quad (4.4)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $\dot{\pi} = 0$ avec $\sum_{i=1}^3 \pi_i = 1$ et u_{mmax} le taux maximal de production des machines m .

Les conditions de faisabilité individuelles des deux machines sont données par les relations suivantes :

$$\pi_1 u_{1max} > d \quad (4.5)$$

$$\pi_2 u_{2max} > d \quad (4.6)$$

Nous considérerons que les machines satisfont non seulement ensemble la relation (4.3) mais individuellement les relations (4.5)-(4.6) et la vitesse maximale de production de la machine de *manufacturing* supérieure à celle de la machine de *remanufacturing*.

4.3.4 Dynamique des stocks

La dynamique du stock est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x}(t) = u_1(t) + u_2(t) - d(t) \quad (4.7)$$

avec $t \in \mathbb{R}_+$, $x(0) = x_0$

où x_{10} est le niveau initial d'inventaire, u_1 et u_2 le taux de production de la machine M1 et M2 respectivement (unité de produits finis/unité de temps), et d le taux de demande constant. Quand $x(t) \geq 0$, le système dispose des produits finis en inventaire et dans le cas contraire en pénurie de produits finis.

4.3.5 Dynamique des émissions

En se référant aux travaux de (Ben-Salem et al., 2015a), nous pouvons utiliser le modèle linéaire qui décrit la relation entre le taux d'émission de la machine $\dot{e}(t)$ et son taux de production $u(t)$. Le niveau d'émission de la machine à chaque temps t est la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\dot{e}(t) = u_1(t) * \theta_1 + u_2(t) * \theta_2 \quad (4.8)$$

avec $t \in \mathbb{R}_+$ et $e(0) = e_0$, $e(T^+) = e(T^-)$.

où e_0 représente le niveau d'émission initial, θ_1 et θ_2 l'index d'émission des machines M1 et M2 (unité de volume d'émission/unité de produits finis). T^+ représente le temps juste à la fin d'une réparation, T^- le temps juste après la dernière opération.

4.3.6 Domaine de commande admissible

Le domaine de commande admissible $\Gamma(\xi)$ définit le plan de faisabilité des valeurs des variables de décisions $u_1(\cdot)$, $u_2(\cdot)$, $w(\cdot)$. Il dépend du processus stochastique $\xi(t)$ et est donné par :

$$\Gamma(\xi) = \left\{ \begin{array}{l} (u_1(\cdot), u_2(\cdot)) \in \mathbb{R}^2 \\ 0 \leq u_1(\cdot) \leq u_{1max} \text{Ind}\{\xi(t) = 1, 2\} \\ 0 \leq u_2(\cdot) \leq u_{2max} \text{Ind}\{\xi(t) = 1, 3\} \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

4.3.7 Coût total actualisé et fonction valeur

Le coût total instantané $g(\cdot)$ donné par l'équation (4.10) comprend le coût de mise en inventaire de produits finis, de pénurie, de *manufacturing* et *remanufacturing* ainsi que le coût de pénalité des émissions.

$$g(x, e, a, \xi) = c^+ x^+ + c^- x^- + c(u_1, u_2) + c_e(e) \quad (4.10)$$

Les constantes c^+ et c^- sont les coûts utilisés pour pénaliser respectivement la mise en inventaire et la pénurie des produits finis (en \$/unité de produits finis/ unité de temps), avec $x^+ = \max(0, x)$, $x^- = \min(0, x)$.

Nous considérons $c(u_1, u_2)$ la fonction coût linéaire de production du système hybride.

$$c(u_1, u_2) = (c_M u_1 + c_R u_2) \text{Ind}\{\xi(t) = 1\} + c_M u_1 \text{Ind}\{\xi(t) = 2\} + c_R u_2 \text{Ind}\{\xi(t) = 3\} \quad (4.11)$$

où c_M et c_R sont les coûts de *manufacturing* et *remanufacturing* respectivement (en \$/unité de produits finis/unité de temps). la notation $\text{Ind}\{\delta(\cdot)\}$ la fonction indicateur de la condition $\delta(\cdot)$ définie comme suit :

$$\text{Ind}\{\delta(\cdot)\} = \begin{cases} 1 & \text{si } \delta(\cdot) \text{ est vrai} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.12)$$

Se référant à l'approche de plafond d'émission, si le niveau d'émission excède la limite standard d'émission L fixé par les autorités compétentes, la quantité excédante est pénalisée avec un coût environnemental (adapté de (Ben-Salem et al., 2015a)) :

$$c_e(e) = c^e \times \max\{0, (e(t) - L)\} \quad (4.13)$$

où c^e est le coût pénalisant les émissions excédant L (\$/unité de volume d'émission).

L'objectif de cette recherche est de trouver les variables de décision, à savoir les taux de production $u_1(\cdot)$ et $u_2(\cdot)$ qui minimiseraient le coût total actualisé attendu $J(\cdot)$ donné par :

$$J(x, e, u_1, u_2, \xi) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} [g(x, e, \xi)] dt \right] \quad (4.14)$$

| $x(0) = x_0, \xi(0) = \alpha$

Où ρ est le taux d'actualisation. x_0 et α sont les valeurs initiales des variables d'états x et ξ .

La fonction valeur du problème posé est donnée par :

$$v(x, e, \xi) = \min_{u_1, u_2 \in \Gamma} J(x, e, u_1, u_2, \xi) \quad (4.15)$$

4.3.8 Conditions d'optimum

La fonction valeur $v(x, e, \xi)$ satisfait un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées communément appelées équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) par l'application de l'approche de programmation dynamique stochastique. C'est ainsi qu'il est la solution des équations suivantes :

$$\rho v(x, e, \alpha) = \min_{u \in \Gamma} \left\{ \begin{aligned} &g(x, e, \alpha) + \frac{\partial v(\cdot)}{\partial x} (u_1 + u_2 - d) \\ &+ \frac{\partial v(\cdot)}{\partial e} (\theta_1 u_1 + \theta_2 u_2) + \sum_{\beta \in A} q_{\alpha\beta} v(x, \varphi_e(\beta), \beta) \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

où $\alpha \in \Omega$, $\varphi_e(\xi)$ décrit respectivement la discontinuité des émissions du système définie comme suit au moment du saut τ pour le processus ξ .

$$\varphi_e(\xi) = \begin{cases} e(\tau^-) \text{ si } \begin{cases} \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 2 \\ \xi(\tau^+) = 1 \text{ et } \xi(\tau^-) = 3 \end{cases} \\ e(\tau^-) \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.9 Conditions d'optimum approximé

Les équations d'HJB (4.16) sont résolues numériquement en approximant la fonction $v(x, e, \xi)$ par la fonction $v_h(x, e, \xi)$ et les dérivées partielles du premier ordre de la fonction valeur $\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial x}$ et $\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial e}$ par des différences finies en faisant intervenir un pas de discrétisation h_x suivant le stock de produits finis et h_e suivant les émissions du système. Cette méthode de résolution par méthodes numériques est basée sur l'approche de (Kushner & Dupuis, 1992). Cette approche a été aussi utilisée dans plusieurs travaux, parmi lesquels nous pouvons citer

(Kouedeu et al., 2015; Polotski et al., 2016; Ouaret et al., 2018). Nous discrétisons sur le stock de produits finis x et le niveau d'émissions e de façon à obtenir N_x et N_e points tel que :

$$N_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{h_{x_1}} + 1, N_e = \frac{e_{max} - e_{min}}{h_e} + 1.$$

L'approximation des dérivées partielles de la fonction valeur $v(\cdot)$ en différences finies est donnée de la manière suivante :

$$\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{v_h(x + h_x, e, \xi) - v_h(x, e, \xi)}{h_x} & \text{si } \dot{x} \geq 0 \\ \frac{v_h(x, e, \xi) - v_h(x - h_x, e, \xi)}{h_x} & \text{si } \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial v(x, e, \xi)}{\partial e} = \frac{v_h(x, e + h_e, \xi) - v_h(x, e, \xi)}{h_e} \quad (4.19)$$

En remplaçant les équations (4.18) et (4.19) dans l'équation (4.16) et après simplification, on obtient les équations de programmation dynamique suivantes :

Mode 1 : M1 et M2 opérationnelles

$$v_h(x, e, 1) = \min_{u_1, u_2 \in \Gamma} \left\{ \frac{1}{\left(\rho + \frac{|u_1 + u_2 - d|}{h_{x_1}} + \frac{(\theta_1 u_1 + \theta_2 u_2)}{h_e} - q_{11} \right)} \left[\begin{aligned} & c^+ x^+ + c^- x^- + c_M u_1 + c_R u_2 + c^e \max\{0, (e - L)\} \\ & + \frac{|u_1 + u_2 - d|}{h_x} \left(v_h(x + h_x, e, 1) I_1^+ + v_h(x - h_x, e, 1) I_1^- \right) \\ & + \frac{(\theta_1 u_1 + \theta_2 u_2)}{h_e} v_h(x, e + h_e, 1) \\ & + q_{12} v_h(x, e, 2) + q_{13} v_h(x, \varphi_e(3), 3) \end{aligned} \right] \right\} \quad (4.20)$$

Mode 2 : M1 opérationnelle et M2 en panne

$$v_h(x, e, 2) = \min_{u_1 \in \Gamma} \left\{ \frac{1}{\left(\rho + \frac{|u_1 - d|}{h_x} \right)} \left[\begin{array}{l} c^+ x^+ + c^- x^- + c_M u_1 + c^e \max\{0, (e - L)\} \\ + \frac{|u_1 - d|}{h_x} \left(v_h(x + h_x, e, 2) I_1^+ \right. \\ \left. + v_h(x - h_x, e, 2) I_1^- \right) \\ + \frac{\theta_1 u_1}{h_e} v_h(x, e + h_e, 2) \\ \left(+ q_{21} v_h(x, e, 1) \right. \\ \left. + q_{24} v_h(x, \varphi_e(4), 4) \right) \end{array} \right] \right\} \quad (4.21)$$

Mode 3 : M1 en panne et M2 opérationnelle

$$v_h(x, e, 3) = \min_{u_2 \in \Gamma} \left\{ \frac{1}{\left(\rho + \frac{|u_2 - d|}{h_x} \right)} \left[\begin{array}{l} c^+ x^+ + c^- x^- + c_R u_2 + c^e \max\{0, (e - L)\} \\ + \frac{|u_2 - d|}{h_x} \left(v_h(x + h_x, e, 3) I_1^+ \right. \\ \left. + v_h(x - h_x, e, 3) I_1^- \right) \\ + \frac{\theta_2 u_2}{h_e} v_h(x, e + h_e, 3) \\ \left(+ q_{31} v_h(x, \varphi_e(1), 1) \right. \\ \left. + q_{34} v_h(x, \varphi_e(4), 4) \right) \end{array} \right] \right\} \quad (4.22)$$

Mode 4 : M1 et M2 en panne

$$v_h(x, e, 4) = \frac{1}{\left(\rho + \frac{d}{h_x} \right)} \left[\begin{array}{l} c^+ x^+ + c^- x^- \\ + \frac{d}{h_x} (v_h(x - h_x, e, 4)) \\ \left(+ q_{42} v_h(x, \varphi_e(2), 2) \right. \\ \left. + q_{43} v_h(x, \varphi_e(3), 3) \right) \end{array} \right] \quad (4.23)$$

Avec $I_1^+ = \text{Ind}\{u_1 + u_2 - d \geq 0\}$, $I_1^- = \text{Ind}\{u_1 + u_2 - d < 0\}$.

Dans la section suivante, un exemple numérique permettra d'illustrer la politique de commande optimale de production obtenue.

4.4 Résolution numérique

Cette section fournit un exemple numérique pour illustrer les résultats obtenus. Ceci se fera par une simulation dans le logiciel Matlab Version R2020b. Le domaine de résolution D est défini par :

$$D = G_{h_x} * G_{h_e}$$

avec $G_{h_x} = \{x: -5 \leq x \leq 70\}$; $G_{h_e} = \{e: 0 \leq e \leq 350\}$. $h_x = 0.5, h_e = 5$.

Les autres valeurs des paramètres nécessaires dans l'exemple numérique tirées de la littérature sont présentées dans le Tableau 4.2. Ces valeurs respectent bien la condition de faisabilité énoncée par l'inéquation (4.3).

Tableau 4.2 Données de l'exemple numérique

c_1^+	c_1^-	c_M	c_R	c^e	u_{1max}	u_{2max}	d
5	200	150	50	60	3.5	3.25	3
L	θ_1	θ_2	q_{12}^1	q_{12}^2	q_{21}^1	q_{21}^2	ρ
250	1.5	3	100^{-1}	80^{-1}	6^{-1}	6^{-1}	0.01

La politique de production du système étudié illustrée aux Figure 4.3 à Figure 4.5 est une extension de la politique environnementale à seuil critique des travaux de notre chapitre I dans un contexte de logistique inverse. Ces figures présentent le taux de production des différentes machines basé sur le nombre de produits finis à bâtir en inventaire afin de se prémunir contre les pannes et les réparations et les pénalités d'émission excédant la limite L .

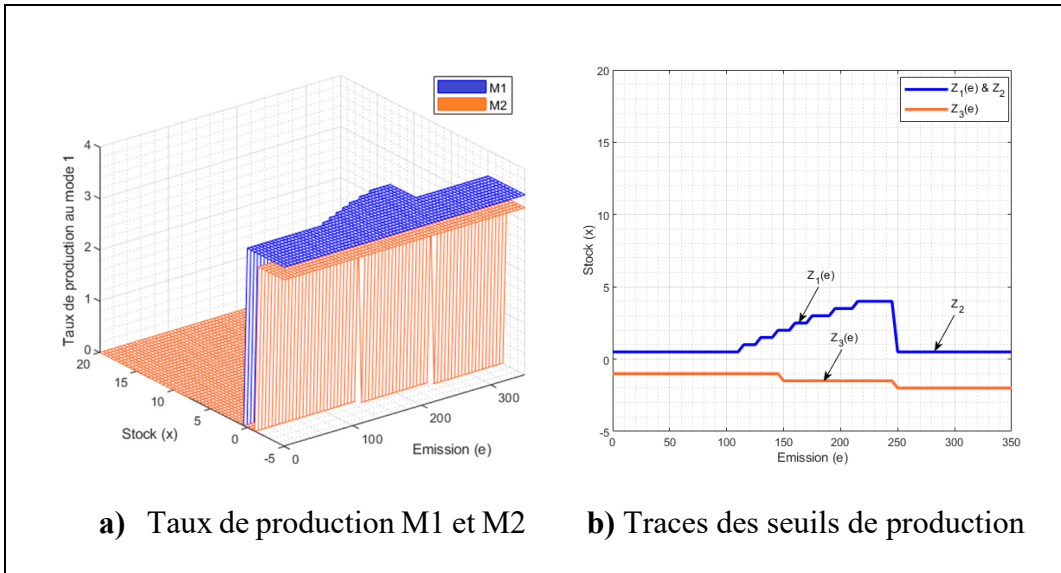
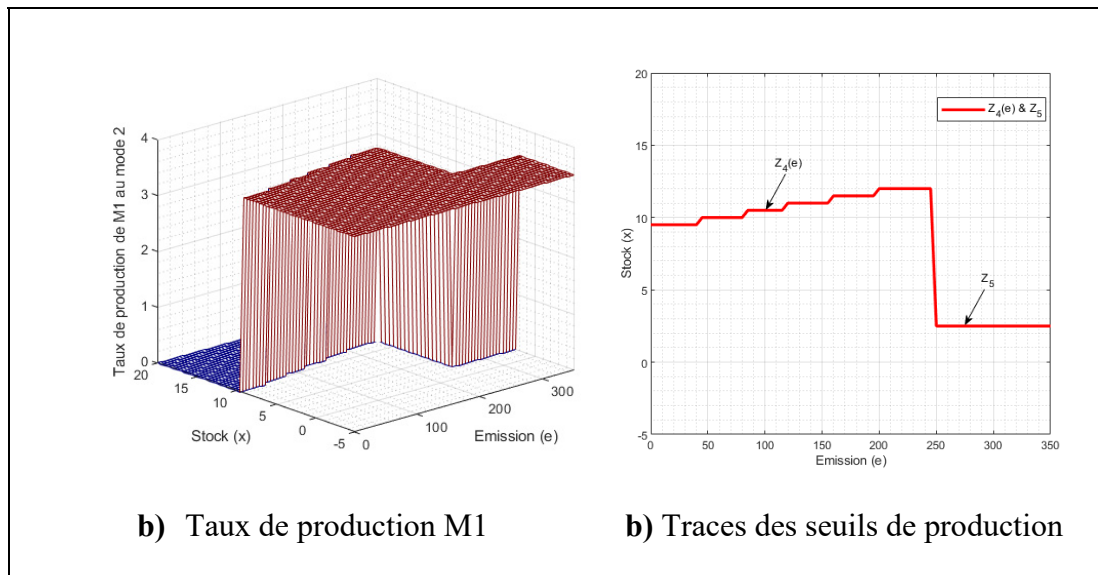


Figure 4.3 Production lorsque les deux machines sont opérationnelles

Figure 4.4 Production lorsque la machine de *remanufacturing* en panne

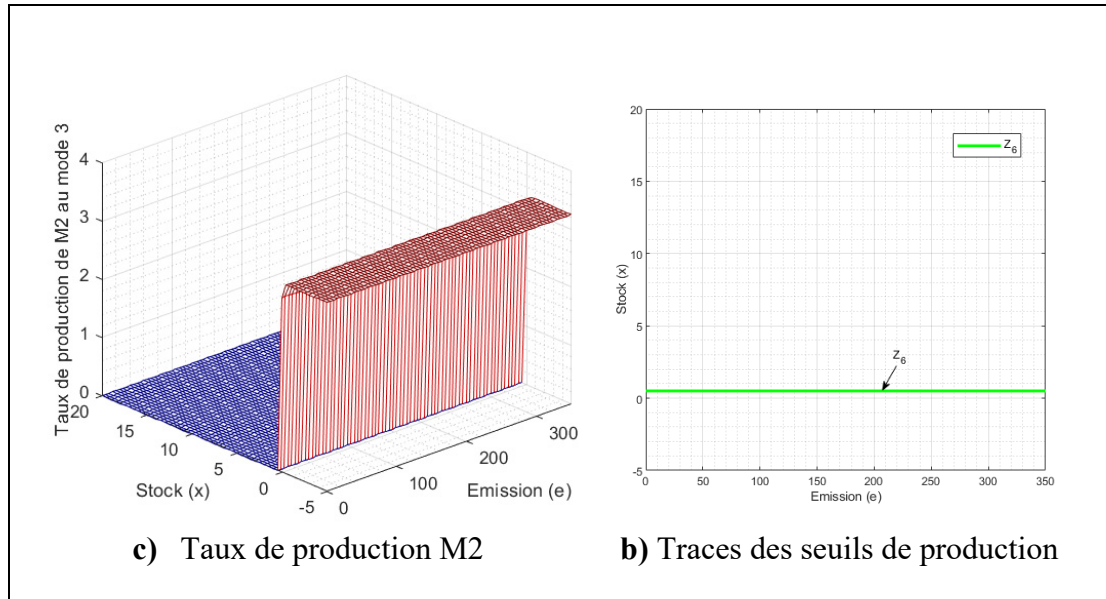


Figure 4.5 Production lorsque la machine de *manufacturing* est en panne

La commande optimale de production du système hybride *manufacturing/remufacturing* illustrée aux Figure 4.3 à Figure 4.5 est définie aux équations (4.24)-(4.29).

- Lorsque les deux machines sont opérationnelles, le système produit avec les deux machines *manufacturing* et *remufacturing* suivant la commande :

$$\begin{cases} \text{si } e < L : \\ u_1(x, e, 1) = \begin{cases} u_{1\max} & \text{si } x < Z_1(e) \\ d & \text{si } x = Z_1(e) \\ 0 & \text{si } x > Z_1(e) \end{cases} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\begin{cases} \text{si } e \geq L : \\ u_1(x, e, 1) = \begin{cases} u_{1\max} & \text{si } x < Z_2 \\ d & \text{si } x = Z_2 \\ 0 & \text{si } x > Z_2 \end{cases} \end{cases} \quad (4.25)$$

$$u_2(x, e, 1) = \begin{cases} u_{2\max} & \text{si } x < Z_3(e) \\ d & \text{si } x = Z_3(e) \\ 0 & \text{si } x > Z_3(e) \end{cases} \quad (4.26)$$

Où $Z_1(e)$, Z_2 sont les seuils critiques de production de la machine M1 et $Z_3(e)$ le seuil critique de production de la machine M2 dans ce mode.

- Lorsque la machine de *remanufacturing* en panne, le système produit seulement avec la machine de *manufacturing* suivant la commande :

$$\begin{cases} si\ e < L : \\ u_1(x, e, 2) = \begin{cases} u_{1max} & si\ x < Z_4(e) \\ d & si\ x = Z_4(e) \\ 0 & si\ x > Z_4(e) \end{cases} \end{cases} \quad (4.27)$$

$$\begin{cases} si\ e \geq L : \\ u_1(x, e, 1) = \begin{cases} u_{1max} & si\ x < Z_5 \\ d & si\ x = Z_5 \\ 0 & si\ x > Z_5 \end{cases} \end{cases} \quad (4.28)$$

Où $Z_4(e)$, Z_5 sont les seuils critiques de production de la machine M1 dans ce mode.

- Lorsque la machine de *manufacturing* en panne, le système produit seulement avec la machine *remanufacturing* suivant la commande :

$$u_2(x, e, 3) = \begin{cases} u_{2max} & si\ x < Z_6 \\ d & si\ x = Z_6 \\ 0 & si\ x > Z_6 \end{cases} \quad (4.29)$$

Où Z_6 est le seuil critique de production de la machine M2 dans ce mode.

La politique de production du système hybride suit les règles suivantes :

Les deux machines opérationnelles :

- Si le niveau d'inventaire courant est inférieur au seuil critique $Z_3(e)$, le taux de production des machines M1 et M2 doit être passé à leur valeur maximale u_{1max} et u_{2max} respectivement;
- Si le niveau d'inventaire courant est égale au seuil critique $Z_3(e)$, le taux de production de M1 doit être maintenu sa valeur maximale et le taux de production de M2 doit être passé à la valeur du taux de demande d ;
- Si le niveau d'inventaire courant est entre le seuil critique $Z_3(e)$ et $Z_1(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L , Z_2 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 doit être maintenu sa valeur maximale et le taux de production de M2 doit être passé à la valeur 0;

- Si le niveau d'inventaire courant est égale au seuil critique $Z_1(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L et Z_2 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 doit être passé à la valeur du taux de demande d et le taux de production de M2 maintenu à la valeur 0;
- Si le niveau d'inventaire courant est supérieur au seuil critique $Z_1(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L et Z_2 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 et M2 doit être passé à la valeur 0;

La machine de *manufacturing* en opération et *remanufacturing* en panne :

- Si le niveau d'inventaire courant est inférieur au seuil critique $Z_4(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L , Z_5 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 doit être passé à la valeur maximale u_{1max} ;
- Si le niveau d'inventaire courant est égale au seuil critique $Z_4(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L et Z_5 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 doit être passé à la valeur du taux de demande d ;
- Si le niveau d'inventaire courant est supérieur au seuil critique $Z_4(e)$ pour le niveau d'émission courant inférieur à la limite L et Z_5 pour le niveau d'émission courant supérieur à la limite L , le taux de production de M1 doit être passé à la valeur 0;

La machine de *remanufacturing* en opération et *manufacturing* en panne :

- Si le niveau d'inventaire courant est inférieur au seuil critique Z_6 , le taux de production de M2 doit être passé à la valeur maximale u_{1max} ;
- Si le niveau d'inventaire courant est égale au seuil critique Z_6 , le taux de production de M2 doit être passé à la valeur du taux de demande d ;
- Si le niveau d'inventaire courant est supérieur au seuil critique Z_6 , le taux de production de M2 doit être passé à la valeur 0.

Dans la prochaine section, nous validerons notre modèle et la structure de nos résultats obtenus à travers l'analyse de sensibilité.

4.5 Analyse de sensibilité

La politique de commande optimale de production obtenue est validée par une analyse de sensibilité en faisant varier certains paramètres du modèle. Nous analysons le comportement des seuils critiques de production $Z_i (i = 1, 2, 3)$ relatives au mode où les deux machines sont en opération, en faisant varier les paramètres coût (coût de *manufacturing* et *remanufacturing*, coût d'émission) et les paramètres du système (index d'émission et taux maximal de production des machines). Les couleurs, vert, bleu et rouge correspondent respectivement aux valeurs petites, moyennes et hautes des paramètres qui seront modifiés dans l'analyse de sensibilité. Pour des raisons de clarté, nous illustrons nos résultats par deux figures respectivement pour les machines M1 et M2.

4.5.1 Coût de *manufacturing*

Les résultats présentés à la Figure 4.6 pour trois différentes valeurs de coût de *manufacturing* $c_M = 50, 100, 150$ montrent que l'augmentation de c_M pousse le système à produire moins avec la machine M1 au taux maximal et produire plus avec la machine M2. Nous observons alors la diminution du seuil critique de production Z_1 de la machine de *manufacturing* et l'augmentation du seuil critique de production Z_3 de la machine de *remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique car le système étant hybride, la machine M2 viendra en soutien afin de rentabiliser les investissements de l'entreprise.

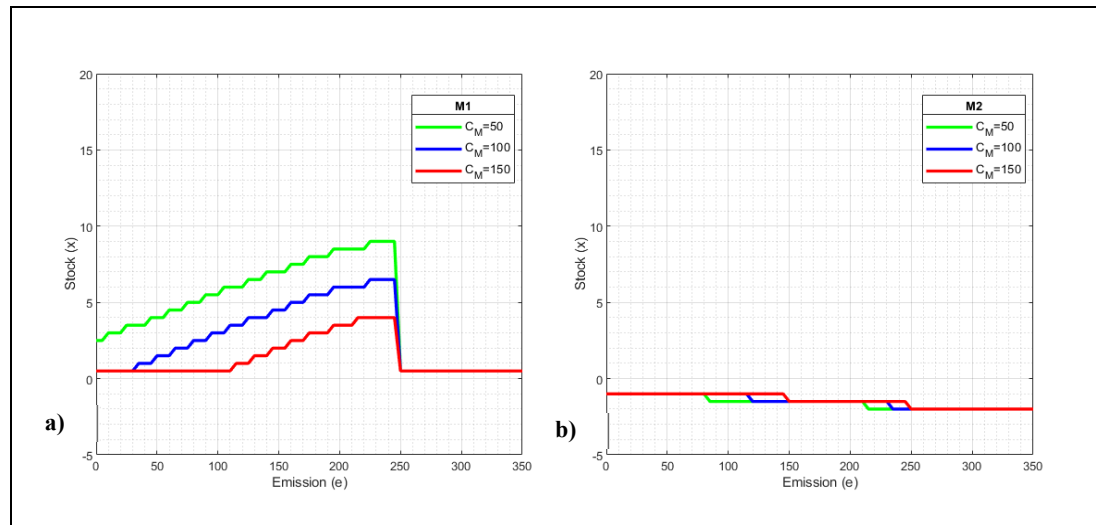


Figure 4.6 Variation de c_M et sa sensibilité sur les traces Z

4.5.2 Coût de *remanufacturing*

Les résultats présentés à la Figure 4.7 pour trois différentes valeurs de coût de *remanufacturing* $c_M = 50, 100, 150$ montrent que l'augmentation de c_R pousse le système à produire plus avec la machine M1 au taux maximal et produire moins avec la machine M2. Nous observons alors l'augmentation du seuil critique de production Z_1 de la machine de *manufacturing* et la diminution du seuil critique de production Z_3 de la machine de *remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique car le système étant hybride, la machine M1 assurera la suppléance de la machine M2 afin de rentabiliser les investissements de l'entreprise.

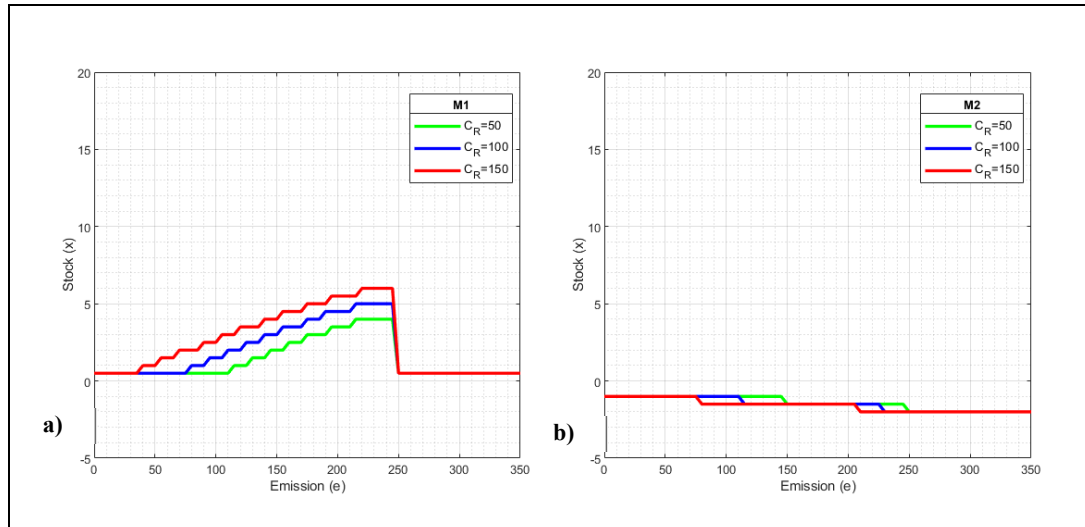


Figure 4.7 Variation de c_R et sa sensibilité sur les traces Z

4.5.3 Coût d'émission

Les résultats présentés à la Figure 4.8 pour trois différentes valeurs de coût d'émission $c^e = 40, 60, 80$ montrent que l'augmentation de c^e pousse le système à produire plus avec la machine M1 au taux maximal et produire moins avec la machine M2. Nous observons alors l'augmentation du seuil critique de production Z_1 de la machine de *manufacturing* et la diminution du seuil critique de production Z_3 de la machine de *remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique car la machine M2 est la plus polluante. Le système étant hybride, il sera donc rentable de l'assister avec la machine M1.

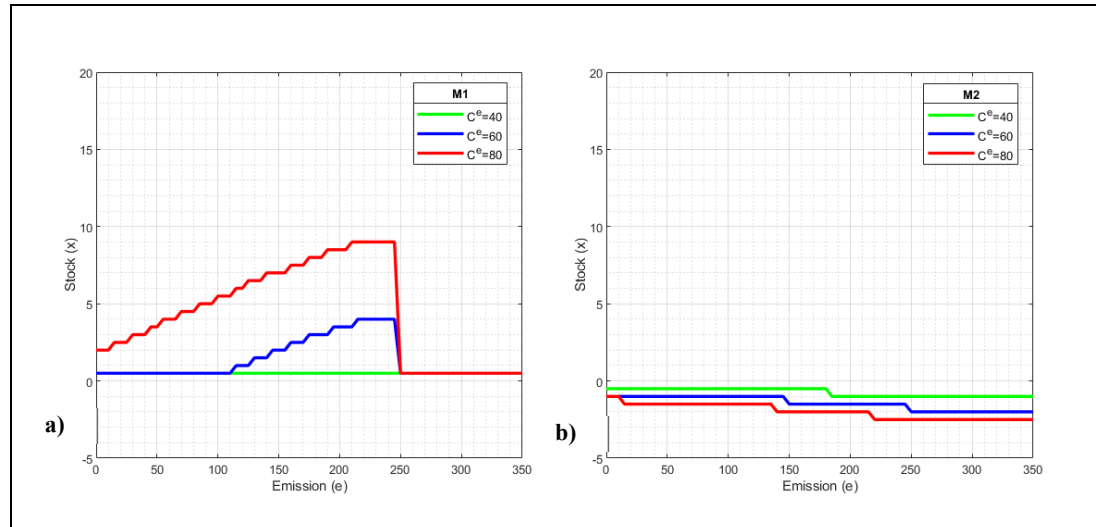


Figure 4.8 Variation de c^e et sa sensibilité sur les traces Z

4.5.4 Index d'émission de la machine de *manufacturing*

Les résultats présentés à la Figure 4.9 pour trois différentes valeurs de l'index d'émission de la machine de *manufacturing* $\theta_1 = 0.5, 1.5, 2.5$ montrent que l'augmentation de θ_1 conduisant à plus d'émissions, pousse le système à produire moins avec la machine M1 au taux maximal et produire plus avec la machine M2. Nous observons alors la diminution du seuil critique de production Z_1 de la machine de *manufacturing* et l'augmentation du seuil critique de production Z_3 de la machine de *remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique pour éviter le coût excédentaire énorme des émissions après la limite d'émission L d'une part et d'autre part équilibrer les contributions des deux machines bien que la machine de *remanufacturing* étant plus polluante.

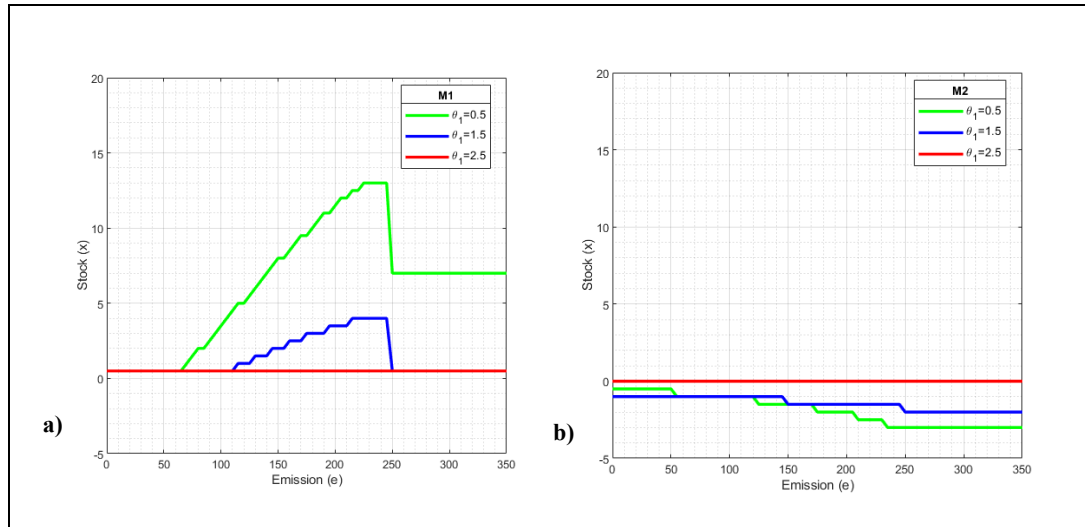


Figure 4.9 Variation de θ_1 et sa sensibilité sur les traces Z

4.5.5 Index d'émission de la machine de *remanufacturing*

Les résultats présentés à la Figure 4.10 pour trois différentes valeurs de l'index d'émission de la machine de *remanufacturing* $\theta_2 = 2, 3, 4$ montrent que l'augmentation de θ_2 conduisant à plus d'émissions, pousse le système à produire plus avec la machine M1 au taux maximal et produire moins avec la machine M2. Nous observons alors l'augmentation du seuil critique de production Z_1 de la machine de *manufacturing* et la diminution du seuil critique de production Z_3 de la machine de *remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique pour éviter le coût excédentaire énorme des émissions après la limite d'émission L d'une part et d'autre part équilibrer les contributions des deux machines.

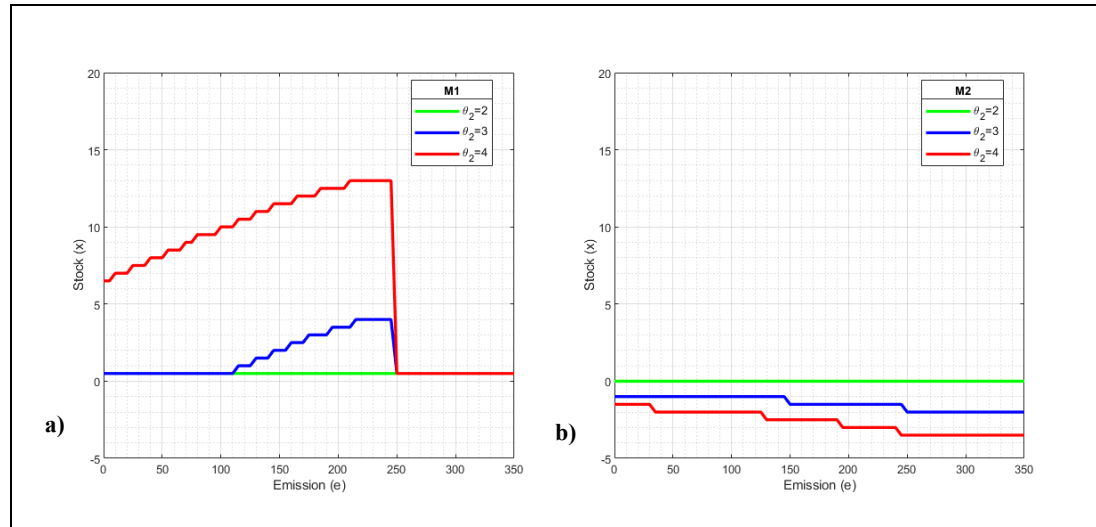


Figure 4.10 Variation de θ_2 et sa sensibilité sur les traces Z

4.5.6 Taux maximal de *manufacturing* et *remanufacturing*

Les résultats présentés aux Figure 4.11-Figure 4.12 (respectivement, Figure 4.13) pour cinq différentes valeurs du taux maximal de *manufacturing* (dont deux à gauche du cas de base et deux à droite pour explorer les situations où la machine de *manufacturing* satisfait la condition de faisabilité individuelle ou non) $u_{1max} = 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5$ (respectivement trois différentes valeurs du taux maximal de *remanufacturing* $u_{2max} = 1.25, 2.25, 3.25$) montrent que l'augmentation de u_{1max} (respectivement u_{2max}) pousse le système à produire moins avec les machines M1 et M2 au taux maximal. Nous observons alors la diminution des seuils critiques de production Z_1 et Z_3 des machines de *manufacturing/remanufacturing* avec le niveau d'émission. Ce qui est tout à fait logique car l'augmentation de la capacité de production des machines conduit à bâtir plus de produits finis à l'unité de temps et plus d'émissions. Il est donc recommandé de baisser les niveaux optimaux de stock afin de rentabiliser les investissements de l'entreprise.

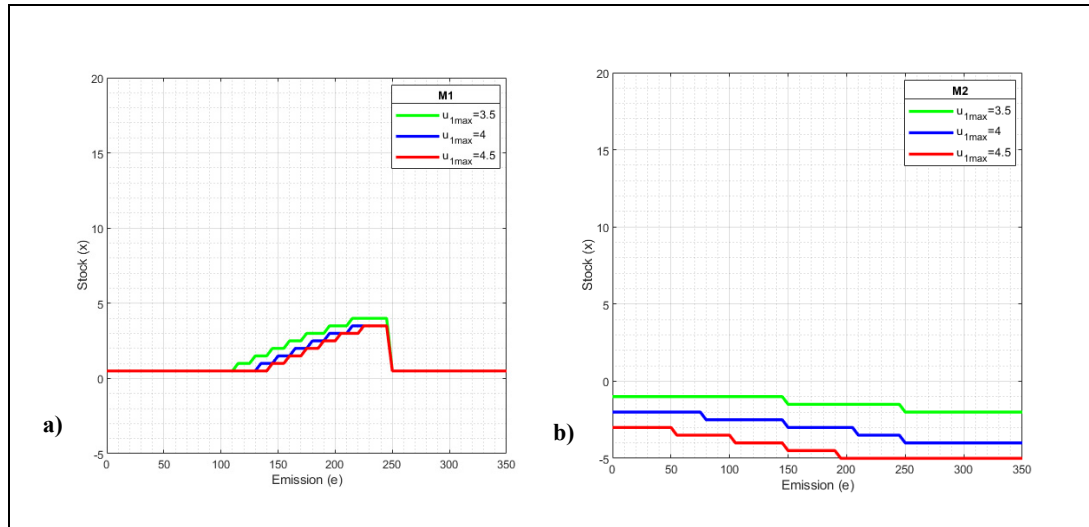


Figure 4.11 Variation de u_{lmax} et sa sensibilité sur les traces Z
(faisabilité individuelle des deux machines)

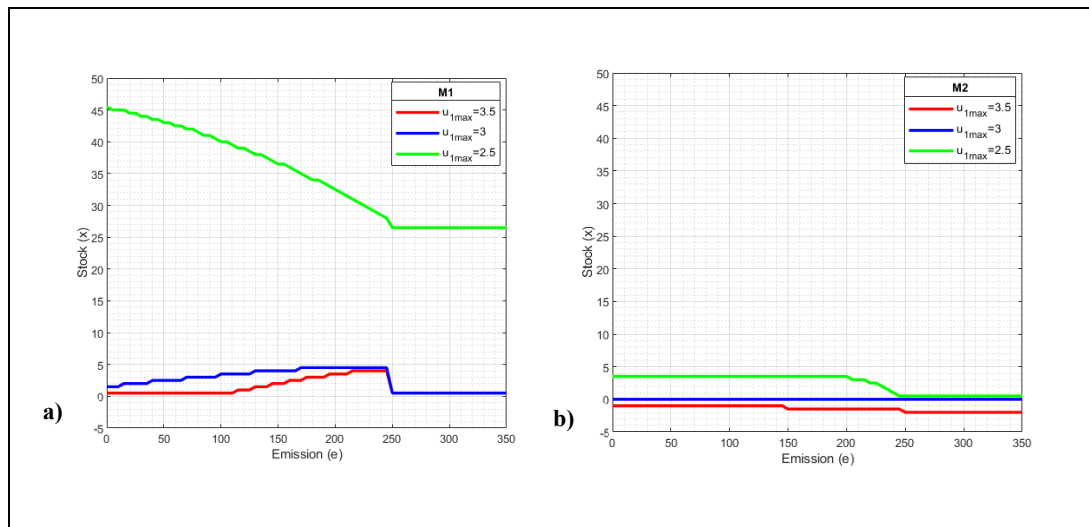


Figure 4.12 Variation de u_{lmax} et sa sensibilité sur les traces Z
(uniquement la faisabilité de la machine de *remanufacturing*)

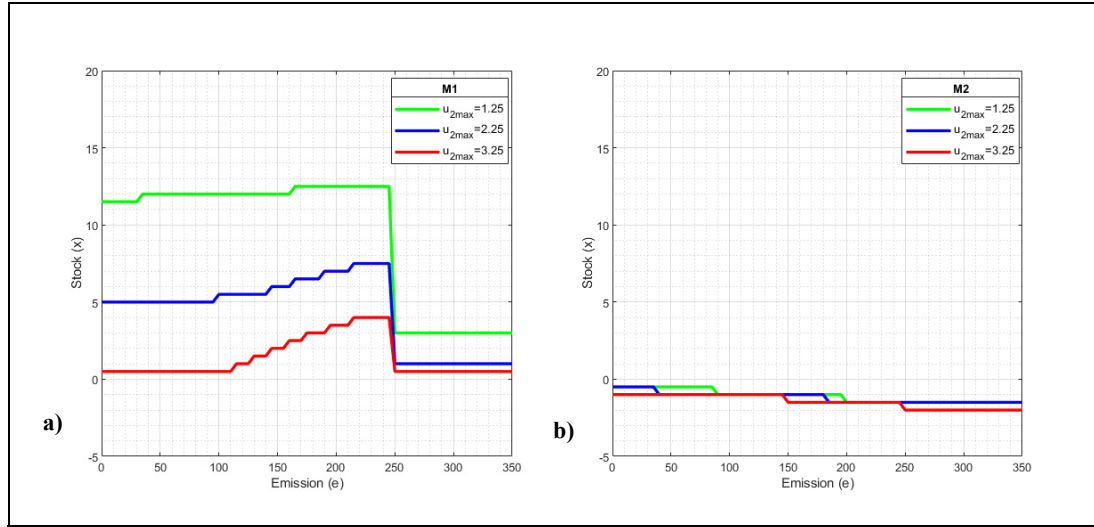


Figure 4.13 Variation de u_{2max} et sa sensibilité sur les traces Z
(avec uniquement la faisabilité de la machine de *remanufacturing*)

Dans la section suivante, nous menons une étude comparative pour mettre en évidence les avantages économiques de nos politiques de commande optimale proposées.

4.6 Étude comparative

Sur la base de l'analyse des travaux de notre chapitre I, nous comparons la performance de notre politique de commande optimale, que nous désignons par politique-I, à celle de la politique prescrite dans ce précédent chapitre décrite comme suit:

- Politique-II : Cette politique optimale de production caractérisée par trois niveaux suivant les émissions, a été démontrée plus performante que celles des travaux de (Akella & Kumar, 1986; Ben-Salem et al., 2015a). Elle est définie par les seuils critiques de production $Z_1, Z_2(e), Z_3$ donnés par les équations (4.30)-(4.32).

$$\begin{cases} \text{si } e < V : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_1 \\ d & \text{si } x = Z_1 \\ 0 & \text{si } x > Z_1 \end{cases} \end{cases} \quad (4.30)$$

$$\begin{cases} \text{si } V \leq e < L : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_2(e) \\ d & \text{si } x = Z_2(e) \\ 0 & \text{si } x > Z_2(e) \end{cases} \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\begin{cases} \text{si } e \geq L : \\ u(x, e, 1) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x < Z_3 \\ d & \text{si } x = Z_3 \\ 0 & \text{si } x > Z_3 \end{cases} \end{cases} \quad (4.32)$$

Nous appliquerons la politique optimale II sur chacune des machines de *manufacturing* et *remanufacturing*, et la comparaison par rapport à la politique-I (collaboration des deux machines) se fera indépendamment. Nous procédons l'analyse comparative en faisant varier les paramètres suivant : coût de *manufacturing* c_M , coût de *remanufacturing* c_R , coût d'émission c^e . Notre comparaison de la politique du système hybride à deux machines par rapport celle d'un système à une machine n'aura tout son sens avec l'intégration dans cette étude des coûts de l'amortissement des machines. Ces coûts de l'amortissement des machines sont des coûts fixes et n'ont aucun impact sur les politiques de commande. Comme données de cas de base pour la comparaison, nous prenons $c^+ = 2$, $c^- = 150$, $c_M = 150$, $c_R = 50$, $c^e = 60$. Les coûts fixes $c_{a_{M1}} = 8000$ et $c_{a_{M2}} = 5000$ sont respectivement les valeurs des coûts de l'amortissement des machines de *manufacturing* et *remanufacturing* (en \$). Nous considérons la performance économique de notre politique-I par le gain en \$ par rapport aux politiques-II qui représente la fonction valeur de notre modèle.

4.6.1 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de *manufacturing*

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 4.3 et la représentation graphique à la Figure 4.14.

Tableau 4.3 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_M

	c_M	50	100	150	200	250
Politique-I	Z_{1min}	19	13	9	5	3
	Z_{1max}	25	21	17	13	9
	Z_2	3	3	3	3	3
	Z_{3max}	-1	-1	-1	-1	-1
	Z_{3min}	-3	-3	-1	-1	-1
Politique-II sur la machine de <i>manufacturing</i>	Z_1	43	39	37	33	31
	Z_{2max}	43	39	37	33	31
	Z_{2min}	39	35	33	29	27
	Z_3	11	11	9	9	7
Politique-II sur la machine de <i>remanufacturing</i>	Z_1	57	57	57	57	57
	Z_{2max}	57	57	57	57	57
	Z_{2min}	51	51	51	51	51
	Z_3	13	13	13	13	13
Coût politique-I		286624	303562	321137	338873	357022
Coût politique-II sur la machine de <i>manufacturing</i>		295068	312984	331248	349913	368973
Coût politique-II sur la machine de <i>remanufacturing</i>		564493	571728	579020	586356	593730
Gain politique I / II sur la machine <i>manufacturing</i>		8444	9422	10111	11040	11951
Gain politique I / II sur la machine <i>remanufacturing</i>		277869	268166	257883	247483	236708

Sur la Figure 4.14, nous observons d'une part, lorsque le coût de *manufacturing* c_M augmente, le coût des politiques augmente du fait de la diminution des seuils critiques de production (Tableau 4.3). En fait le système produisant moins, on se rapproche des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, nous observons que l'application de la politique-II sur les machines de *manufacturing* et *remanufacturing* permet de stocker plus que la politique optimale I, donc le système met plus de produits en inventaire. Ce qui est tout à logique car avec la politique-I, les machines produisent conjointement. Par contre avec la politique-II elles travaillent individuellement pour satisfaire la demande client. Ces observations permettent d'expliquer l'augmentation avec le coût de *manufacturing* du gain de la politique I par rapport à la politique- II appliquée sur la machine de *manufacturing*. Il faut noter que nous relevons l'effet contraire quand la politique-II est appliquée sur la machine de *remanufacturing* pour la raison que la variation du coût de *manufacturing* ne l'impacte pas. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 3%

sur la politique-II quand la production est effectuée par la machine de *manufacturing* et 67 à 97% par la machine de *remanufacturing* pour ces variations de coût de *manufacturing*.

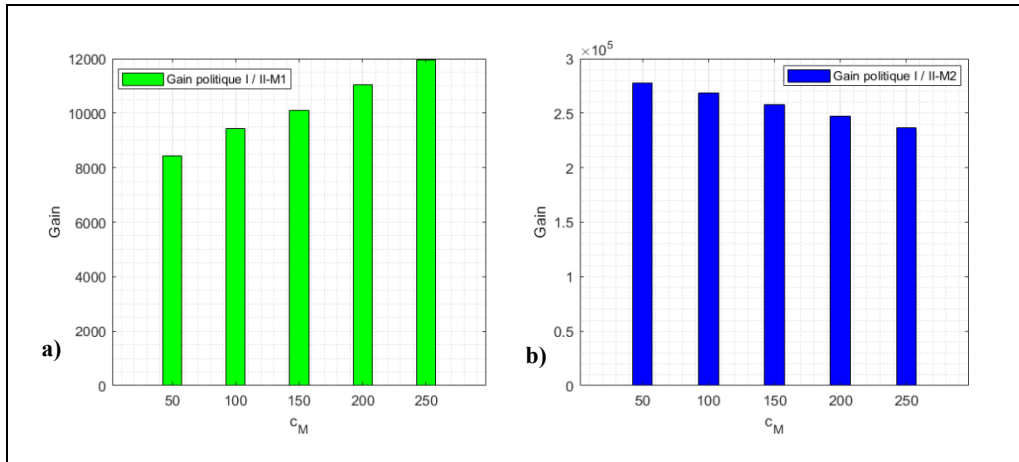


Figure 4.14 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_M

4.6.2 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût de *remanufacturing*

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 4.4 et la représentation graphique à la Figure 4.15.

Tableau 4.4 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c_R

	c_R	25	50	75	100	125
Politique-I	Z_{1min}	7	9	9	11	13
	Z_{1max}	17	17	17	17	17
	Z_2	3	3	3	3	3
	Z_{3max}	-1	-1	-1	-1	-1
	Z_{3min}	-1	-1	-3	-3	-5
Politique-II sur la machine de <i>manufacturing</i>	Z_1	37	37	37	37	37
	Z_{2max}	37	37	37	37	37
	Z_{2min}	33	33	33	33	33
	Z_3	9	9	9	9	9
Politique-II sur la machine de <i>remanufacturing</i>	Z_1	61	57	55	53	51
	Z_{2max}	61	57	55	53	51
	Z_{2min}	53	51	49	47	45
	Z_3	13	13	13	11	11

c_R	25	50	75	100	125
Coût politique-I	320801	321137	321231	321564	321897
Coût politique-II sur la machine de <i>manufacturing</i>	331248	331248	331248	331248	3248
Coût politique-II sur la machine de <i>remanufacturing</i>	571886	579020	586153	593276	600376
Gain politique I / II sur la machine <i>manufacturing</i>	10447	10111	10017	9684	9351
Gain politique I / II sur la machine <i>remanufacturing</i>	251085	257883	264922	271712	278479

Sur la Figure 4.15, nous observons d'une part, lorsque le coût de *remanufacturing* c_R augmente, le coût des politiques augmente du fait de l'augmentation des seuils critiques de production de la politique- I et la diminution de ceux de la politique- II (Tableau 4.4). En fait le système hybride bâtissant plus de produits en inventaire, plus ça coute et la machine de *remanufacturing* avec la politique-II produisant moins, on se rapproche des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, nous observons que l'application de la politique-II sur les machines de *manufacturing* et *remanufacturing* permet de stocker plus que la politique optimale I, donc le système met plus de produits en inventaire. Ce qui est tout à logique car avec la politique-I, les machines produisent conjointement. Par contre avec la politique-II elles travaillent individuellement pour satisfaire la demande client. Ces observations permettent d'expliquer l'augmentation avec le coût de *manufacturing* du gain de la politique I par rapport à la politique- II appliquée sur la machine de *remanufacturing*. Il faut noter que nous relevons l'effet contraire quand la politique-II est appliquée sur la machine de *manufacturing* pour la raison que la variation du coût de *manufacturing* ne l'impacte pas. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 3% sur la politique-II quand la production est effectuée par la machine de *manufacturing* et 79 à 87% par la machine de *remanufacturing* pour ces variations de coût de *remanufacturing*.

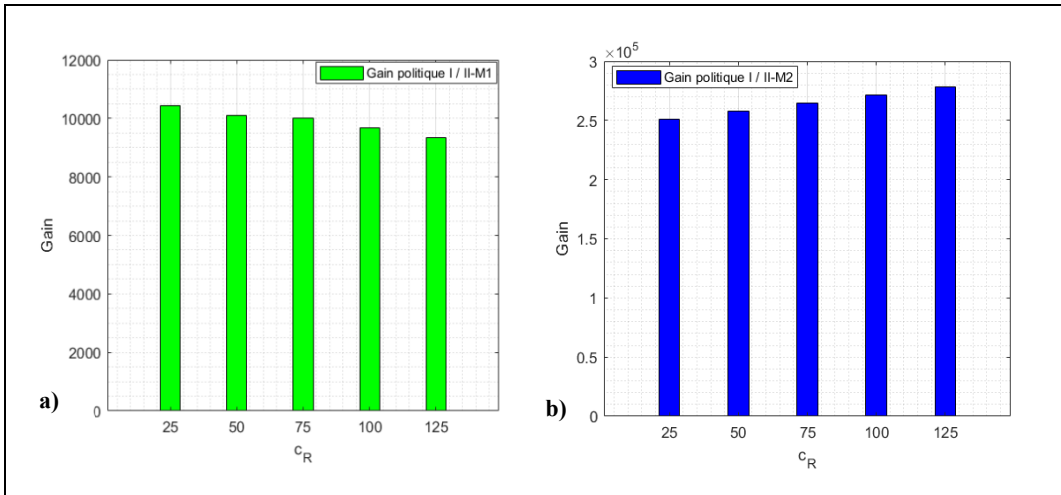


Figure 4.15 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c_R

4.6.3 Comparaison politique I par rapport à II avec variation du coût d'émission

Les seuils critiques des politiques I et II, les coûts inhérents, et le gain de la politique optimale I par rapport à II sont présentés dans le Tableau 4.5 et la représentation graphique à la Figure 4.16.

Tableau 4.5 Comparaison politique I par rapport à II pour différentes valeurs de c^e

	c^e	20	40	60	80	100
Politique-I	Z_{1min}	3	5	9	15	21
	Z_{1max}	3	9	17	21	25
	Z_2	3	3	3	3	3
	Z_{3max}	1	1	-1	-1	-1
	Z_{3min}	1	-1	-1	-3	-5
politique-II sur la machine de manufacturing	Z_1	37	37	37	37	37
	Z_{2max}	37	37	37	37	37
	Z_{2min}	35	33	33	31	31
	Z_3	23	15	9	5	3
politique-II sur la machine de remanufacturing	Z_1	63	59	57	57	55
	Z_{2max}	63	59	57	57	55
	Z_{2min}	59	53	51	49	47
	Z_3	37	21	13	7	3

c^e	20	40	60	80	100
Coût politique-I	149832	238203	321137	404175	484933
Coût politique-II sur la machine de <i>manufacturing</i>	165558	251644	331248	410429	486681
Coût politique-II sur la machine de <i>remanufacturing</i>	248513	418112	579020	719229	890451
Gain politique I / II sur la machine de <i>manufacturing</i>	15726	13441	10111	6254	1748
Gain politique I / II sur la machine de <i>remanufacturing</i>	98681	179909	257883	315054	405518

Sur la Figure 4.16, nous observons d'une part, lorsque le coût d'émission c^e augmente, le coût des politiques amène du fait de l'augmentation des seuils critiques de production pour la politique- I et la diminution de ceux de la politique- II (Tableau 4.5). En fait le système hybride bâtissant plus de produits en inventaire, plus ça coûte et les machines de *manufacturing/remanufacturing* avec la politique-II produisant moins, on se rapproche des ruptures de stock très pénalisantes. D'autre part, nous observons que l'application de la politique-II sur les machines de *manufacturing* et *remanufacturing* permet de stocker plus que la politique optimale I, donc le système met plus de produits en inventaire. Ce qui est tout à logique car avec la politique-I, les machines produisent conjointement. Par contre avec la politique-II elles travaillent individuellement pour satisfaire la demande client. Ces observations permettent d'expliquer l'augmentation avec le coût d'émission du gain de la politique I par rapport à la politique- II appliquée sur la machine de *remanufacturing* (la plus polluante). Il faut noter que nous relevons l'effet contraire quand la politique-II est appliquée sur la machine de *manufacturing* pour la raison qu'elle pollue moins et c'est elle qui assiste celle de *remanufacturing* dans le système hybride. Des résultats obtenus, il ressort aussi une performance économique de la politique-I en terme de pourcentage de gain de 1% à 11% sur la politique-II quand la production est effectuée par la machine de *manufacturing* et 66 à 84% par la machine de *remanufacturing* pour ces variations de coût d'émission.

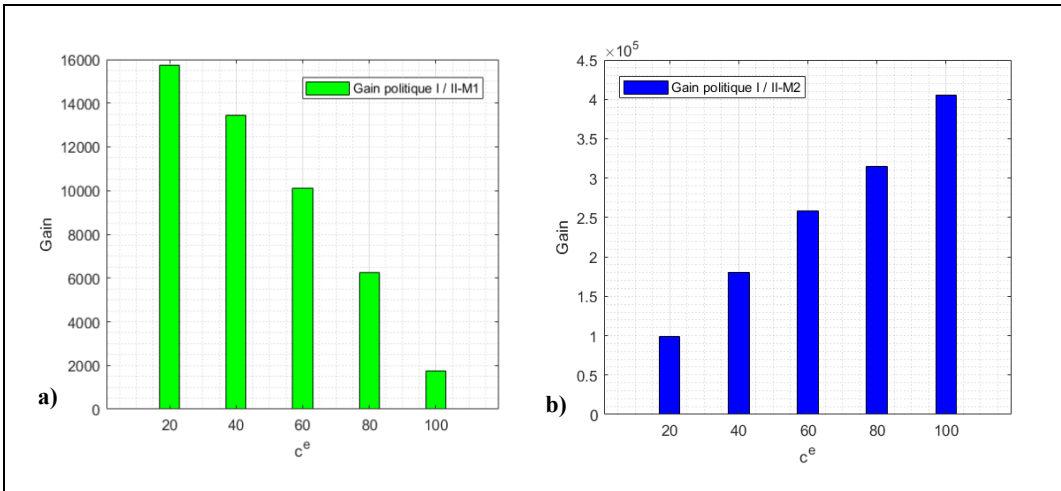


Figure 4.16 Gain politique I par rapport à II pour plusieurs valeurs de c^e

Dans la section suivante, nous illustrons la mise en œuvre des résultats obtenus par un schéma d'implantation afin de faciliter la commande du système manufacturier.

4.7 Implications managériales

Les implications managériales de notre travail dans la pratique commerciale nécessitent des informations complètes sur l'état du système manufacturier pour mettre en œuvre les résultats obtenus. Le gestionnaire peut contrôler le système avec notre politique en observant le niveau de stock de service ainsi que son niveau d'émissions de gaz à effet de serre. À la lumière de cette discussion, notre politique propose une commande, celui pour bâtir le stock de sécurité. Nos résultats nous ont révélé que pour ces considérations de caractéristiques de notre système hybride, c'est la machine de machine de *manufacturing* qui bâtit le stock de sécurité car étant moins polluante et celle de *remanufacturing* apporte sa contribution en situation de rupture de stock. La mise en œuvre de notre politique de contrôle de la production est facilitée par l'utilisation d'un schéma logique d'implantation, ce qui nous guide dans la prise de décision.

En supposant que la machine de *manufacturing* est opérationnelle et attend sa prochaine panne avec un niveau de stock (x) et un niveau d'émission (e). Le taux de production peut être facilement définie en deux niveaux : le premier pour bâtir le stock de sécurité pour contrer les temps de non disponibilité liés aux pannes et réparations, et le deuxième pour indiquer quand

baissier le stock de sécurité lorsque le coût excédentaire d'émission devient très pénalisant. Ces niveaux sont représentés en intervalles comme suit : $e < L$, $e \geq L$ (équations (4.24)-(4.25), (4.27)-(4.28)).

Les seuils critiques de notre politique optimale $Z_{1,2,3}$ étant variables et difficiles à mettre en application en pratique industrielle, nous avons déterminé une politique sous-optimale. Pour ce faire, nous procédons par découpage des zones avec variation de seuils critiques en part égales. La politique de contrôle à implanter en subdivisant comme présente la Figure 4.17 est une bonne approximation de la politique optimale avec une différence de coût de 0.58% (Tableau 4.6).

Les résultats obtenus des valeurs numériques des paramètres optimaux à utiliser dans la prise de décision pour faciliter la mise en œuvre de notre politique sont résumées ci-dessous:

$$E_{11} = 115, E_{12} = 165, E_{13} = 215, E_{21} = 150, E_{31} = 40, E_{32} = 120, E_{33} = 200, \\ L = 250, Z_{11} = 0.5, Z_{12} = 1.5, Z_{13} = 2.5, Z_{14} = 4, Z_2 = 0.5, Z_{31} = -1, Z_{32} = -2, \\ Z_{41} = 9.5, Z_{42} = 10.5, Z_{43} = 11, Z_{44} = 12, Z_5 = 2.5, Z_6 = 0.5.$$

Tableau 4.6 Coût politique de contrôle

	Coût	Différence par rapport à I	Différence par rapport à I (%)
Politique optimale de contrôle- I	319921	-	-
Politique sous-optimale de contrôle à implanter	321763	1843	0.58

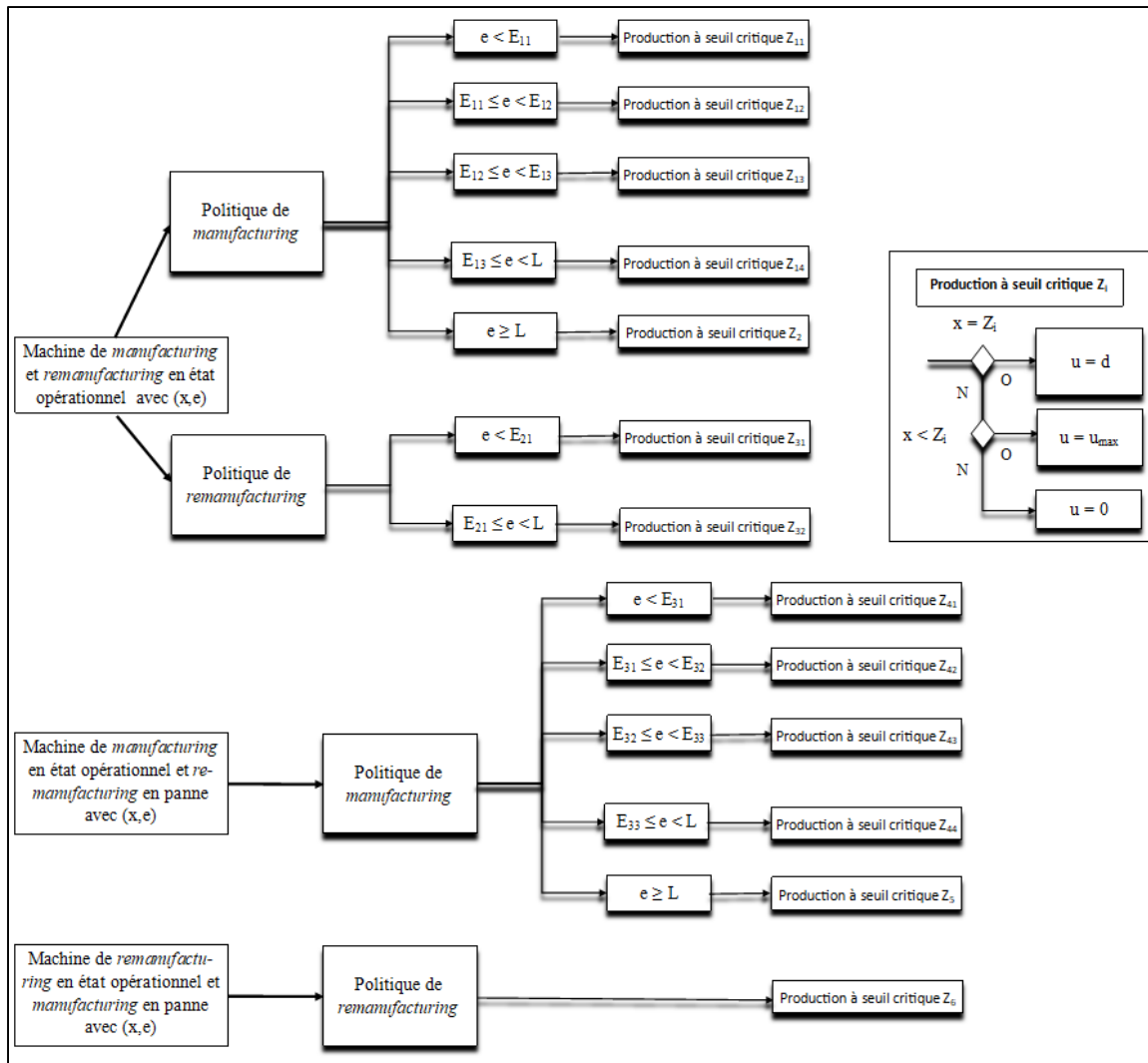


Figure 4.17 Schéma d'implantation de la politique de contrôle du système hybride

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les politiques optimales de production d'un système manufacturier hybride sujette aux pannes et réparations aléatoires et les contraintes environnementales notamment la réduction des émissions de GES d'une part et la valorisation des produits en fin de vie d'autre part.

En appliquant la théorie de commande stochastique, nous avons modélisé le système manufacturier hybride constituée de deux machines en parallèle (*manufacturing/*

remanufacturing) au moyen d'une chaîne de Markov homogène sur la base d'une variable de décision, le taux de production. Par la suite, en utilisant l'approche de programmation dynamique stochastique nous avons développé les conditions d'optimum décrites par les équations de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). Nous avons résolu numériquement avec l'approche de Kushner et Dupuis et obtenu une politique de commande qui minimise le coût total de production. Une analyse de sensibilité a été faite pour montrer l'effet de la variation de plusieurs paramètres sur nos politiques obtenues afin de valider notre modèle. Nous avons poursuivi par une étude comparative afin de positionner notre politique prescrite par rapport à celle de la politique à un système constitué d'une machine polluante. Enfin, un schéma logique d'implantation de notre politique a été élaboré pour faciliter sa mise en œuvre dans la pratique industrielle.

Les résultats ont montré que l'addition d'une machine collaborative pour atténuer les émissions est une solution avantageuse et économique à long terme. Il ressort que l'optimisation par l'approche de programmation dynamique stochastique apporte également une grande amélioration dans le domaine de commande des systèmes manufacturiers sous les aspects environnementaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion, l'objectif principal de ce présent mémoire était d'élaborer les politiques de commande optimale rétroactive des systèmes manufacturiers en boucle fermée en contexte dynamique stochastique minimisant le coût total encouru et prenant en compte les émissions de GES générées dans la prise de décision. Notre travail a été élaboré en quatre (4) chapitres.

Le chapitre 1 consistait à effectuer une étude bibliographique et analyser les revues scientifiques passées et récentes, liées au sujet de recherche. Ce faisant, nous avons présenté les généralités sur les systèmes manufacturiers et la théorie de commande optimale stochastique. Nous avons poursuivi par la présentation de l'aspect environnemental dans le secteur manufacturier et le concept de la logistique inverse à travers les travaux de recherche. En se basant sur les limites des travaux déjà réalisés à partir de la revue critique de la littérature, nous avons situé notre travail et en ressortir son originalité. De par le volume des revues consultées, un tableau de synthèse a été donné à la fin du chapitre.

Le chapitre 2 avait pour but de traiter le problème de planification de la production d'un système manufacturier soumis à des pannes et réparations aléatoires sous le contrôle de ses émissions de GES. Le système étudié était constitué d'une unité de production fabriquant un seul type de produits. La modélisation du système a été faite par une chaîne de Markov homogène. La résolution par les méthodes numériques des équations HJB a permis de déterminer la politique optimale de production. Cette politique obtenue était de type seuil critique et une étude comparative nous a montré son avantage par rapport à la politique environnementale (EHPP) et la politique classique (HPP) dans un contexte sans contrôle des émissions. Pour confirmer nos résultats, des analyses de sensibilité ont été faites.

Le chapitre 3 était consacré à l'extension du modèle du chapitre précédent en intégrant le contrôle de la maintenance préventive. En effet, nous avons considéré la dégradation du système manufacturier. Le taux de panne et l'index d'émission de l'unité de production augmentaient avec son âge. L'activité de maintenance préventive permettait donc d'améliorer la disponibilité du système et de réduire les émissions de GES. Une chaîne de Markov non homogène a été utilisée pour développer le modèle d'optimisation stochastique du système

étudié avec deux variables de décision; le taux de production et le taux d'envoi en maintenance préventive. Après résolution par les méthodes numériques du problème formulé, les résultats obtenus nous ont montré également que les politiques optimales étaient de type à seuil critique et plus performantes que celles de la littérature. Ces résultats ont été validés par des analyses de sensibilité.

Le chapitre 4 visait la planification de la production d'un système manufacturier hybride *manufacturing/remanufacturing* en boucle fermée sous le contrôle des émissions de GES. Le système étudié était constitué de deux machines soumis aux pannes et réparations aléatoires fabriquant un seul type de produit. L'objectif était de déterminer les politiques de commande de *manufacturing* et *remanufacturing* qui minimisent le coût total et permettent la réduction des émissions de GES. Éventuellement, les résultats obtenus ont montré qu'en contexte de logistique inverse, la production avec la collaboration des deux machines est une solution efficace et avantageuse pour réduire les émissions du système sans perdre de vue l'aspect économique. Les observations faites par les diverses analyses de sensibilité nous ont montré que les résultats obtenus étaient valides.

Les différentes politiques optimales obtenus dans ce travail de recherche nous révèlent que la loi de commande optimale prend comme rétroaction non seulement le niveau d'inventaire de produits finis, mais aussi le niveau d'émissions générées. Les résultats obtenus nous montrent également que le système doit bâtir un stock de sécurité optimal pour se prémunir contre les périodes d'indisponibilité du système manufacturier liés aux pannes ou à l'activité de maintenance préventive et les excédents d'émissions.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons abouti à des résultats solides ayant des retombées scientifiques, économiques et environnementales. La contribution scientifique de ce travail réside dans la formulation des modèles d'optimisation avec la problématique de l'intégration de la dimension environnementale dans la commande des systèmes manufacturiers en utilisant l'approche par programmation dynamique stochastique pour les modèles d'optimisation et les méthodes numériques pour la résolution. Ce travail de recherche a permis de montrer qu'il est toujours profitable pour les gestionnaires d'adopter de nouvelles stratégies optimales de production afin d'endiguer les dommages de la pollution liés à l'activité industrielle qui pèsent

sur l'environnement. Malgré la complexité de la démarche d'optimisation (nombre et durée de simulation, choix des zones de résolution...), les modèles proposés ont été validés par des analyses de sensibilité. Les contributions de cette recherche constituent une base solide pour des travaux futurs. Nous recommandons quelques pistes de recherche future:

- Intégrer les aspects relatifs aux perturbations aléatoires au niveau de la demande des clients et le retour des produits usagés du marché.
- Étendre l'étude en intégrant les problèmes de dégradation des machines de *manufacturing* et *remanufacturing*. Cette extension pourrait donc tenir compte du contrôle de la maintenance des machines dans la commande de ces systèmes manufacturiers.
- Intégrer le contrôle de l'élimination des produits usagés récupérés du marché, non conformes au processus de *remanufacturing*. Un procédé d'inspection pourrait être considéré dans la structure de la chaîne logistique inverse.
- Considérer la structure des lois de commande obtenue dans ce mémoire pour des problèmes plus complexes tels que des cas de systèmes manufacturiers plus larges, constitués de plusieurs machines et plusieurs produits. Une approche combinant la théorie de commande stochastique, la simulation et la méthodologie des surfaces de réponse pourrait être utilisée pour ces cas d'espèces.

ANNEXE I

PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER AVEC PANNES ET REPARATIONS ALEATOIRES ET CONTRÔLE DES EMISSIONS

```
clear

hx=0.5; % pas suivant x
he=2; % pas suivant e
Umax=3.25; % taux maximal de production
q12=1/105; % taux de panne
q21=1/6; % taux de réparation
d=3; % taux de demande du produit
rho=0.01; % taux d'actualisation
L=250; % Limite d'émissions de GES par la législation
cp=5; % pénalise le stock positif des produits finis
cm=100; % pénalise le stock négatif des produits finis
cu=0; % pénalise la production
cmc=0; % Coût de maintenance corrective de la machine
ce=5; % Coût de taxation d'émissions atmosphériques par unité
de volume de CO2
theta_zero=2; % Volume émis de GES par la machine par produit
fabriqué
xinf=-5; % borne inférieure du stock de produits finis -10
xsup=120; % borne supérieure du stock de produits finis 60
einf=0; % borne inférieure des émissions de GES
esup=350;
Pi1=q21/(q12+q21);
Pi2=q12/(q12+q21);
Nx=1+(xsup-xinf)/hx;
Ne=1+(esup-einf)/he;
cont1=[]; % taux de production au mode 1
VP1M=[];
VP2M=[];
VP3M=[];
xx=[];
ee=[];
UU1=[];
UU1(1)=0;
UU1(2)=d;
UU1(3)=Umax;
Vp1=zeros(Nx,Ne);
Vp2=zeros(Nx,Ne);
```

```

Vp3=zeros(Nx,Ne);
Va1=zeros(Nx,Ne);
Va2=zeros(Nx,Ne);
Va3=zeros(Nx,Ne);
X1_op=[];
Z1_op=[];
i_op=[];
it=0;precis=0.01;
Err=1000000;%pour while err > precis

%Condition de faisabilité
if (Pi1)*Umax < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end
for i=1:Nx
    for j=1:Ne
        cont1(i,j)=0;
    end
end
C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
while Err > precis %boucle d'itération
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
    it=it+1;
    %
    % Policy evaluation
    %
    for j=1:Ne
        e=einf+(j-1)*he;
        ee(j)=e;
        for i=1:Nx
            x=xinf+(i-1)*hx;
            xx(i)=x;
            u1=cont1(i,j);
            [Va11,Va21]=
Cost_Mdl1(i,j,x,e,hx,he,u1,d,q12,q21,Vp1,Vp2,Nx,Ne,rho,cp,cm,c
u,cmc,ce,L,theta_zero);
            Va1(i,j)=Va11;
            Va2(i,j)=Va21;
            if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))>C1MAX
                C1MAX=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
            end
            if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))<C1MIN
                C1MIN=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
            end
            if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))>C1MAX

```

```

        C1MAX=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
    end
    if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
    end
    end % de for i
end % de for j policy evaluation
vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(vmin-vmax)

Vp1=Va1;
Vp2=Va2;

%
% policy improvement
%
V1_op=5e+10;
V2_op=5e+10;
for j=1:Ne
    V1_op=5e+10;
    Iop=1;
    e=einf+(j-1)*he;
    ee(j)=e;
    for i=1:Nx
        x=xinf+(i-1)*hx;
        xx(i)=x;
        VP1M=1000000;
        VP2M=1000000;
        %for c on regarde quelle est la commande (u1) qui
        minimise le coût
        for c1=1:3
            u1=UU1(c1); % 0 d Umax

            [Vy11, Vy21]=
            Cost_Mdl1(i,j,x,e,hx,he,u1,d,q12,q21,Vp1,Vp2,Nx,Ne,rho,cp,cm,c
            u,cmc,ce,L,theta_zero);
            Va1(i,j)=Vy11;
            Va2(i,j)=Vy21;
            if Va1(i,j) < VP1M
                VP1M=Vy11;
                cont1(i,j)=u1;
            end
            if Va2(i,j) < VP2M
                VP2M=Vy21;
            end
        end
    end
end

```

```

        if Vy11 < V1_op
            V1_op=Vy11;
            if i > 1
                if cont1(i,j) ~= cont1(i-1,j)
                    X1_op=x;
                    Iop=i;
                end
            else
                X1_op=xinf;
                Iop=1;
            end
        end
    end % for c1
    Va1(i,j)=VP1M;
    Va2(i,j)=VP2M;
end % for i=Nx policy improv.
Z1_op(j)=X1_op;
i_op(j)=Iop;
end % for j=1:Na policy improv.
end % iteration while

% calcul du coût

TC_op Va1(65,24); % coût politique à l'optimum

figure(1)
mesh(ee,xx,Va1)
xlabel ('Emission(e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('v(x,e,1)')
title ('Value function at mode 1')
grid on

figure(2)
mesh(ee,xx,Va2)
xlabel ('Emission(e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('v(x,e,2)')
title ('Value function at mode 2')
grid on

figure(3)
mesh(ee,xx,cont1)
xlabel ('Emission(e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('u1(x,e,1)')

```

```

title('Production rate mode 1')
grid on

figure(4)
plot(ee,Z1_op)
xlabel ('Emission(e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces stratégie de production')
grid on

%%

% sous-programme de comparaison des politiques

Vp1=zeros(Nx,Ne);
Vp2=zeros(Nx,Ne);
Vp3=zeros(Nx,Ne);
Va1=zeros(Nx,Ne);
Va2=zeros(Nx,Ne);
Va3=zeros(Nx,Ne);

CZ1Z2=[];
it=0;
if (Pi1)*Umax < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end
for i=1:Nx
    for j=1:Ne
        cont1(i,j)=0;
    end
end

V=250; %Limite volontaire d'émission

% Paramètres optimisés politique à deux seuils

Z1=69;
Z2=23;

Err=5e+10;
C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
while Err > precis %boucle d'itération
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;

```

```

it=it+1;
%
% Policy evaluation
%
for j=1:Ne
    e=einf+(j-1)*he;
    ee(j)=e;
    for i=1:Nx
        x=xinf+(i-1)*hx;
        xx(i)=x;
        u1=cont1(i,j);
        [Va11, Va21]=
Cost_Mdl1(i,j,x,e,hx,he,u1,d,q12,q21,Vp1,Vp2,Nx,Ne,rho,cp,cm,c
u,cmc,ce,L,theta_zero);
        Va1(i,j)=Va11;
        Va2(i,j)=Va21;
        if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
        end
        if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
        end
        if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
        end
        if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
        end
    end % de for i=1:Nx
end % de for j=1:Na policy evaluation
vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(vmin-vmax)

Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
%
% policy improvement
%

for j=1:Ne
    cmpt=1;
    e=einf+(j-1)*he;
    ee(j)=e;
    CostXX=0;

```

```

for i=1:Nx
    x=xinf+(i-1)*hx;
    xx(i)=x;

    if e < V
        Zhpp=Z1;
    elseif e >= V
        Zhpp=Z2;
    end

    if x<Zhpp
        u1=UU1(3);
    elseif x==Zhpp
        u1=UU1(2);
        Iop_c=i;
    else
        u1=UU1(1);
    end

    [Vy11, Vy21]=
Cost_Mdl1(i,j,x,e,hx,he,u1,d,q12,q21,Vp1,Vp2,Nx,Ne,rho,cp,cm,c
u,cmc,ce,L,theta_zero);
    Va1(i,j)=Vy11;
    Va2(i,j)=Vy21;
    cont1(i,j)=u1;
end % for i
    i_op_c(j)=Iop_c;
end %for j

end % itération while

Diff=0; % initialisation différence coût en pourcentage
Diff1=0; % initialisation différence coût

CZ1Z2=Va1(65,24); % coût politique au point de comparaison
Diff=100*((CZ1Z2-TC_op)/TC_op);
Diff1=(CZ1Z2-TC_op);
%
```


ANNEXE II

PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER AVEC DÉGRADATION ET CONTRÔLE DES EMISSIONS

```
clear

hx=0.5; % pas suivant x
ha=1; % pas suivant a
Umax=2; % taux max de production
q1=0.005; % Paramètre 1 taux de panne
q2=0.0075; % Paramètre 2 taux de panne
q12max=0.0125; % Paramètre 1 taux de panne max
q21=1/6; % Taux de réparation
q31=1/12; % Taux de retour de l'entretien majeur
d=1.5; % taux de demande du produit
rho=0.01; % taux d'actualisation
cp=5; % pénalise le stock positif des produits
cm=100; % pénalise le stock négatif des produits
cmc=25; % Coût de maintenance corrective de la machine
cmp=2500; % Coût de maintenance préventive de la machine
ce=40; % Coût de taxation d'émissions atmosphériques par volume
de CO2
k1=0.8; % Paramètre d'ajustage de l'âge de la machine
k2=0.000005; % Paramètre 3 d'ajustage du taux de panne
k3=0.02; % Paramètre 1 de l'index d'émission des GES en fonction
de l'âge
alpha=0.6; % Paramètre 2 d'ajustage de l'index d'émission des
GES en fonction de l'âge
theta_zero=2; % Volume émis de GES par la machine par pièce
produite
Wmin=0.000001; % taux minimum d'envoi de la machine en MP
Wmax=1/15; % taux maximum d'envoi de la machine en MP
xinf=-5; % borne inférieure du stock de produits finis
xsup=120; % borne supérieure du stock de produits finis
ainf=0; % borne inférieure de l'âge de la machine
asup=100; % borne supérieure de l'âge de la machine
Pil=0.8811;
Nx=1+(xsup-xinf)/hx;
Na=1+(asup-ainf)/ha;
N=1;
eps=0.5;
L=250;
```

```

theta=[];
cont1=[]; % taux de production au mode 1
major_repair=[]; %taux de maintenance préventive
VP1M=[];
VP2M=[];
VP3M=[];
xx=[];
aa=[];
ee=[];
ak=[];
ek=[];
A=[];
E=[];
Kp=[];
Ka=[];
n=[];
aMP=[];
UU1=[];
UU2=[];
UU1(1)=0;
UU1(2)=d;
UU1(3)=Umax;
UU2(1)=Wmin;
UU2(2)=Wmax;
q12=[];
Vp1=zeros(Nx,Na,N);
Vp2=zeros(Nx,Na,N);
Vp3=zeros(Nx,Na,N);
Va1=zeros(Nx,Na,N);
Va2=zeros(Nx,Na,N);
Va3=zeros(Nx,Na,N);
X1_op=[];
Z1_op=[];
it=0;
precis=0.01;
Err=1000000; %pour while err > precis

%Condition de faisabilité
if P11*Umax < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end

for k=1:N
    for j=1:Na
        for i=1:Nx

```

```

        cont1(i,j,k)=0;
        major_repair(i,j,k)=Wmin;
    end
end
end
for k=1:N
    Ka(k)=1;
end
C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
while Err > precis %boucle d'itération
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
    it=it+1;
    cpt=0;
    %
    % Policy evaluation
    %
    for k=1:N
        n(k)=k-1;
        if k==1
            c=1;
            A(k)=0;
            E(k)=0;
        else
            A(k)=eps*aa(c)+A(k-1);
            E(k)=ee(c)+E(k-1);
        end
        cpt=cpt+1;
        for j=1:Na
            a=ainf+(j-1)*ha;
            aa(j)=a;
            ak(j,k)=aa(j)+A(k);
            theta=theta_zero*(exp(k3*alpha*ak(j,k)));

            ee(j)=((theta_zero/(k1*k3*alpha))*(exp(k3*alpha*(ak(j,k)))-1));

            ek(j,k)=ee(j)+E(k);
            aMP(k)=aa(c);
            for i=1:Nx
                x=xinf+(i-1)*hx;
                xx(i)=x;

                da=k1*cont1(i,j,k);
                u1=cont1(i,j,k);
                W=major_repair(i,j,k);
                if W == Wmax

```

```

        cpt=cpt+1;
    end
    q12=q1+(q2*(1-exp(-
(k2*(ak(j,k))*(ak(j,k))*(ak(j,k)))));
    [Vx11, Vx21, Vx31]=
Cost_Mdl2_II2(i,j,k,x,ek,hx,ha,u1,W,d,q12,q21,q31,Vp1,Vp2,Vp3,
Nx,Na,da,rho,cp,cm,cmc,cmp,ce,L,N);
    Va1(i,j,k)=Vx11;
    Va2(i,j,k)=Vx21;
    Va3(i,j,k)=Vx31;
    if abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k));
    end
    if abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k));
    end
    if abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k));
    end
    if abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k));
    end
    if abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k));
    end
    if abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k));
    end

    if cpt==1
        c=j;
    end

    end % de for i=1:Nx
end % de for k=1:N
end % de for j=1:Na policy evaluation
vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(vmin-vmax)

Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
Vp3=Va3;
%
% policy improvement
%
```

```

cpt=0;
for k=1:N
    V1_op=5e+10;
    n(k)=k-1;
    if k==1
        c=1;
        A(k)=0;
        E(k)=0;
    else
        A(k)=eps*aa(c)+A(k-1);
        E(k)=ee(c)+E(k-1);
    end
    cpt=0;
    for j=1:Na
        V1_op=5e+10;
        cmpt=1;
        a=ainf+(j-1)*ha;
        aa(j)=a;
        ak(j,k)=aa(j)+A(k);
        theta=theta_zero*(exp(k3*alpha*ak(j,k)));

ee(j)=((theta_zero/(k1*k3*alpha))*((exp(k3*alpha*(ak(j,k))))-1));

        ek(j,k)=ee(j)+E(k);
        aMP(k)=aa(c);
        for i=1:Nx
            x=xinf+(i-1)*hx;
            xx(i)=x;
            VP1M=10000000;
            VP2M=10000000;
            VP3M=10000000;
            %for c on regarde quelle est la commande (u1,W)
qui minimise le coût
            for c1=1:3
                u1=UU1(c1); % 0 d Umax
                da=k1*u1;
                for c2=1:2
                    W=UU2(c2); % Wmin Wmax

                    q12=q1+(q2*(1-exp(-
(k2*(ak(j,k))*(ak(j,k)*(ak(j,k))))));
                    [Vy11, Vy21, Vy31]=
Cost_Mdl2_II2(i,j,k,x,ek,hx,ha,u1,W,d,q12,q21,q31,Vp1,Vp2,Vp3,
Nx,Na,da,rho,cp,cm,cmc,cmp,ce,L,N);
                    Va1(i,j,k)=Vy11;

```

```

Va2(i,j,k)=Vy21;
Va3(i,j,k)=Vy31;

if Va1(i,j,k) < VP1M
    VP1M=Vy11;
    cont1(i,j,k)=u1;
    major_repair(i,j,k)=W;

end
if Va2(i,j,k) < VP2M
    VP2M=Vy21;
end
if Va3(i,j,k) < VP3M
    VP3M=Vy31;
end
if Vy11 < V1_op
    V1_op=Vy11;
    if i > 1
        if cont1(i,j,k) ~= cont1(i-
1,j,k)

            if cmpt == 1
                if cont1(i,j,k)==0
                    X1_op=x;
                else
                    X1_op=x-hx;
                end
            elseif cmpt == 2
                if cont1(i,j,k)==0
                    X1_op=x-hx;
                end
            end
        end
    end
else
    X1_op=xinf;
end
end
end % for c2
end % for c1

if major_repair(i,j,k) == Wmax
    cpt=cpt+1;
end

if i > 1
    if cont1(i,j,k) ~= cont1(i-1,j,k)
        cmpt=cmpt+1;
    end
end

```

```

        end
    else
        cmpt=1;
    end
    Va1(i,j,k)=VP1M;
    Va2(i,j,k)=VP2M;
    Va3(i,j,k)=VP3M;

    if cpt==1
        c=j;
    end
    end % for i=1:Nx policy improv.
    Z1_op(j,k)=X1_op;
    end % for j=Na policy improv.
    end % for k=N policy improv.
end % iteration while

% calcul du coût
TC_op=Va1(115,19,1); % Coût politique à l'optimum

% Hedging_point mode 1
Hedging_point1 = X1_op

figure(1)
mesh(ak(:,1),xx,Va1(:,:,1))
xlabel ('Age(a)')
ylabel ('Niveau de stock (x)')
zlabel ('v(x,a,1)')
title ('Value function at mode 1')
grid on

figure(2)
mesh(ak(:,1),xx,Va2(:,:,1))
xlabel ('Age(a)')
ylabel ('Niveau de stock (x)')
zlabel ('v(x,a,2)')
title ('Value function at mode 2')
grid on

figure(3)
mesh(ak(:,1),xx,Va3(:,:,1))
xlabel ('Age(a)')
ylabel ('Niveau de stock (x)')
zlabel ('v(x,a,3)')
title ('Value function at mode 3')
grid on

```

```

figure(4)
mesh(ak(:,1),xx,cont1(:, :,1))
xlabel ('Age(a)')
ylabel ('Niveau de stock (x)')
zlabel('Taux de production')
title('Politique de production')
grid on

figure(5)
mesh(ak(:,1),xx,major_repair(:, :,1))
xlabel ('Age(a)')
ylabel ('Niveau de stock (x)')
zlabel('Taux de Maintenance Preventive')
title('Strategie de Maintenance Preventive')
grid on

figure(6)
plot(aa,Z1_op(:,1))
xlabel ('Age (a)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des stratégies de production et de maintenance
préventive')
grid on

figure(7)
plot(ek(:,1),Z1_op(:,1))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des stratégies de production et de maintenance
préventive')
grid on

%%

% sous-programme de comparaison des politiques

Vp1=zeros(Nx,Na,N);
Vp2=zeros(Nx,Na,N);
Vp3=zeros(Nx,Na,N);
Va1=zeros(Nx,Na,N);
Va2=zeros(Nx,Na,N);
Va3=zeros(Nx,Na,N);

CZ1Z2=0;
it=0;

```

```

if (Pi1)*Umax < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end

for k=1:N
    for j=1:Na
        for i=1:Nx
            cont1(i,j,k)=0;
            major_repair(i,j,k)=Wmin;
        end
    end
end

end

V=250; %Limite d'émission

%paramètres optimisés politique deux seuils

Z1=55;
Z2=17;
A1=48;

Err=5e+10;
C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
while Err > precis %boucle d'itération
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
    it=it+1;
    cpt=0;
    %
    % Policy evaluation
    %
    for k=1:N
        n(k)=k-1;
        if k==1
            c=1;
            A(k)=0;
            E(k)=0;
        else
            A(k)=eps*aa(c)+A(k-1);
            E(k)=ee(c)+E(k-1);
        end
        cpt=cpt+1;
        for j=1:Na
            a=ainf+(j-1)*ha;
            aa(j)=a;
            ak(j,k)=aa(j)+A(k);
        end
    end
end

```

```

theta=theta_zero*(exp(k3*alpha*ak(j,k)));

ee(j)=((theta_zero/(k1*k3*alpha))*(exp(k3*alpha*(ak(j,k)))-
1));

ek(j,k)=ee(j)+E(k);
aMP(k)=aa(c);
for i=1:Nx
    x=xinf+(i-1)*hx;
    xx(i)=x;

    da=k1*cont1(i,j,k);
    u1=cont1(i,j,k);
    W=major_repair(i,j,k);

    if W == Wmax
        cpt=cpt+1;
    end

    q12=q1+(q2*(1-exp(-
(k2*(ak(j,k))*(ak(j,k))*(ak(j,k))))));
    [Vx11, Vx21, Vx31]=
Cost_Mdl2_II2(i,j,k,x,ek,hx,ha,u1,W,d,q12,q21,q31,Vp1,Vp2,Vp3,
Nx,Na,da,rho,cp,cm,cmc,cmp,ce,L,N);
    Va1(i,j,k)=Vx11;
    Va2(i,j,k)=Vx21;
    Va3(i,j,k)=Vx31;
    if abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k));
    end
    if abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va1(i,j,k)-Vp1(i,j,k));
    end
    if abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k));
    end
    if abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va2(i,j,k)-Vp2(i,j,k));
    end
    if abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k))>C1MAX
        C1MAX=abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k));
    end
    if abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k))<C1MIN
        C1MIN=abs(Va3(i,j,k)-Vp3(i,j,k));
    end
end

```

```

        if cpt==1
            c=j;
        end

        end % de for i=1:Nx
    end % de for k=j
end % de for j=1:Na policy evaluation
vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(vmin-vmax)

Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
Vp3=Va3;
%
% policy improvement
%
cpt=0;
for k=1:N
    n(k)=k-1;
    if k==1
        c=1;
        A(k)=0;
        E(k)=0;
    else
        A(k)=eps*aa(c)+A(k-1);
        E(k)=ee(c)+E(k-1);
    end
    cpt=cpt+1;
    for j=1:Na
        cmpt=1;
        a=ainf+(j-1)*ha;
        aa(j)=a;
        ak(j,k)=aa(j)+A(k);
        theta=theta_zero*(exp(k3*alpha*ak(j,k)));

ee(j)=((theta_zero/(k1*k3*alpha))*((exp(k3*alpha*(ak(j,k)))-
1)));

        ek(j,k)=ee(j)+E(k);
        aMP(k)=aa(c);
        for i=1:Nx
            x=xinf+(i-1)*hx;
            xx(i)=x;
            VP1M=10000000;
            VP2M=10000000;
            VP3M=10000000;

```

```

% commande (u1,W) imposée
if ee(j) < V
    Zhpp=Z1;
elseif ee(j) >= V
    Zhpp=Z2;
end
Ahpp=A1;
if x<Zhpp
    u1=UU1(3);
elseif x==Zhpp
    u1=UU1(2);
    Iop_c=i;
else
    u1=UU1(1);
end
if a<Ahpp
    W=UU2(1);
else
    if x<Z2
        W=UU2(1);
    else
        W=UU2(2);
    end
end

q12=q1+(q2*(1-exp(-
(k2*(ak(j,k))*(ak(j,k)*(ak(j,k))))));
[ Vy11, Vy21, Vy31]=
Cost_Mdl2_II2(i,j,k,x,ek,hx,ha,u1,W,d,q12,q21,q31,Vp1,Vp2,Vp3,
Nx,Na,da,rho,cp,cm,cmc,cmp,ce,L,N);
    Va1(i,j,k)=Vy11;
    Va2(i,j,k)=Vy21;
    Va3(i,j,k)=Vy31;
    cont1(i,j,k)=u1;
    major_repair(i,j,k)=W;
end % for i=1:Nx policy improv.
end % for j=Na policy improv.
end % for k=N policy improv.
end % itération while

Diff=0; % initialisation différence coût en pourcentage
Diff1=0; % initialisation différence coût
CZ1Z2=Va1(115,19,1); % coût politique au point de comparaison
Diff=100*((CZ1Z2-TC_op)/TC_op);
Diff1=(CZ1Z2-TC_op);
%
```

ANNEXE III

PROGRAMME MATLAB PRINCIPAL (OPTIMISATION ET COMPARAISON) : SYSTÈME MANUFACTURIER HYBRIDE MANUFACTURING REMANUFACTURING AVEC CONTRÔLE DES EMISSIONS

```
clear
hx1=0.5; % pas suivant x
he=5; % pas suivant e
U1max=3.5; % taux maximal de production
U2max=3.25; % taux maximal de production
q121=1/100; % Taux de panne de la machine M2
q211=1/6; % Taux de réparation de la machine M1
q122=1/80; % Taux de panne de la machine M2
q212=1/6; % Taux de réparation de la machine M2
d=3; % taux de demande client
rho=0.01; % taux d'actualisation
c1p=5; % pénalise le stock positif des produits finis
c1m=200; % pénalise le stock négatif des produits finis
c1u=150; % pénalise la production avec la machine de
manufacturing
c2u=50; % pénalise la production avec la machine de
remanufacturing
ce=60; %60 % Coût de taxation d'émissions excèdent la limite
d'émission par unité de volume de CO2
theta_zero1=1.5; % Index émission de GES par la machine M1 par
produits finis
theta_zero2=3; % Index émission de GES par la machine M2 par
produits finis
x1inf=-5; % borne inferieure du stock de produits finis
x1sup=70; % borne superieure du stock de produits finis
einf=0; % borne inferieure des émissions de GES du système
hybride
esup=350; % borne superieure des émissions de GES du système
hybride
Pi1=q212*q211/(q122*q121+q122*q211+q212*q121+q212*q211);
Pi2=q122*q211/(q122*q121+q122*q211+q212*q121+q212*q211);
Pi3=q212*q121/(q122*q121+q122*q211+q212*q121+q212*q211);
Pi4=q122*q121/(q122*q121+q122*q211+q212*q121+q212*q211);
Nx1=1+(x1sup-x1inf)/hx1;
Ne=1+(esup-einf)/he;
L=250; % limite d'émission de la législation
cont11=[]; % taux de production de M1 au mode 1
cont12=[]; % taux de production de M2 au mode 1
```

```

cont21=[] ; % taux de production de M1 au mode 2
cont32=[] ; % taux de production de M2 au mode 3

VP1M=[] ;
VP2M=[] ;
VP3M=[] ;
VP4M=[] ;
xx1=[] ;
xx2=[] ;
ee=[] ;
UU11=[] ;
UU12=[] ;
UU11(1)=0;
UU11(2)=d;
UU11(3)=U1max;
UU12(1)=0;
UU12(2)=d;
UU12(3)=U2max;
Vp1=zeros(Nx1,Ne) ;
Vp2=zeros(Nx1,Ne) ;
Vp3=zeros(Nx1,Ne) ;
Vp4=zeros(Nx1,Ne) ;
Va1=zeros(Nx1,Ne) ;
Va2=zeros(Nx1,Ne) ;
Va3=zeros(Nx1,Ne) ;
Va4=zeros(Nx1,Ne) ;
X11_op=[] ;
X12_op=[] ;
X21_op=[] ;
X32_op=[] ;
Z11_op=[] ;
Z12_op=[] ;
Z21_op=[] ;
Z32_op=[] ;
Z=[] ;
it=0;precis=0.01;
Err=1000000; %pour while err > precis

%Condition de faisabilité
if Pi1*(U1max+U2max)+Pi2*U1max+Pi3*U2max < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end
% Faisabilité sur Machine M1
if U1max*(q211/(q121+q211)) < d
    disp('Problème non faisable');

```

```

        return
    end
    % Faisabilité sur Machine M2
    if U2max*(q212/(q122+q212)) < d
        disp('Problème non faisable');
        return
    end

    for j=1:Ne
        for i=1:Nx1
            cont11(i,j)=0;
            cont12(i,j)=0;
            cont21(i,j)=0;
            cont32(i,j)=0;
        end
    end
    %Iniatialisation des vecteurs de commande

    for j=1:Ne
        Z11_op=0;
        Z12_op=0;
        Z21_op=0;
        Z32_op=0;
    end
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;

    while Err > precis %boucle d'itération
        C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
        it=it+1;

        %
        % Policy evaluation
        %

        for j=1:Ne
            e=einf+(j-1)*he;
            ee(j)=e;
            for i=1:Nx1
                x1=x1inf+(i-1)*hx1;
                xx1(i)=x1;

                de1=theta_zero1*cont11(i,j);
                de2=theta_zero2*cont12(i,j);
                de3=theta_zero1*cont21(i,j);
                de4=theta_zero2*cont32(i,j);
                u11=cont11(i,j);
                u12=cont12(i,j);
            end
        end
    end
end

```

```

        u21=cont21(i,j);
        u32=cont32(i,j);

        [Vx11,          Vx21,          Vx31,          Vx41]=
Cost_Mdl_III(i,j,x1,e,hx1,he,u11,u12,u21,u32,d,q121,q122,q211,
q212,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Nx1,Ne,de1,de2,de3,de4,rho,c1p,c1m,c1u,c2
u,ce,L);

        Va1(i,j)=Vx11;
        Va2(i,j)=Vx21;
        Va3(i,j)=Vx31;
        Va4(i,j)=Vx41;
        if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
        end
        if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
        end
        if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
        end
        if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
        end
        if abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j));
        end
        if abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j));
        end
        if abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j));
        end
        if abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j));
        end

        end % de for i=1:Nx1
    end % de for j=1:Ne policy evaluation
    vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
    vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
    Err=abs(vmin-vmax)

    Vp1=Va1;
    Vp2=Va2;
    Vp3=Va3;
    Vp4=Va4;

```

```

%
% policy improvement
%

V1_op=5e+10;
V2_op=5e+10;
V3_op=5e+10;
V4_op=5e+10;
for j=1:Ne
    V1_op=5e+10;
    V2_op=5e+10;
    V3_op=5e+10;
    V4_op=5e+10;

    e=einf+(j-1)*he;
    ee(j)=e;

    for i=1:Nx1
        x1=x1inf+(i-1)*hx1;
        xx1(i)=x1;

        VP1M=100000000;
        VP2M=100000000;
        VP3M=100000000;
        VP4M=100000000;

        %for c on regarde quelle est la commande (u1,u2)
qui minimise le coût
        for c1=1:3
            u11=UU11(c1); % 0 d U1max
            u21=UU11(c1);
            for c2=1:3
                u12=UU12(c2); % 0 d U2max
                u32=UU12(c2);

                de1=theta_zero1*u11;
                de2=theta_zero2*u12;
                de3=theta_zero1*u21;
                de4=theta_zero2*u32;
                [Vy11, Vy21, Vy31, Vy41]=
Cost_Mdl_III(i,j,x1,e,hx1,he,u11,u12,u21,u32,d,q121,q122,q211,
q212,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Nx1,Ne,de1,de2,de3,de4,rho,c1p,c1m,c1u,c2
u,ce,L);

                Val(i,j)=Vy11;

```

```

Va2(i,j)=Vy21;
Va3(i,j)=Vy31;
Va4(i,j)=Vy41;

if Va1(i,j) < VP1M
    VP1M=Vy11;
    cont11(i,j)=u11;
    cont12(i,j)=u12;
end
if Va2(i,j) < VP2M
    VP2M=Vy21;
    cont21(i,j)=u21;
end
if Va3(i,j) < VP3M
    VP3M=Vy31;
    cont32(i,j)=u32;
end
if Va4(i,j) < VP4M
    VP4M=Vy41;
end
if Vy11 < V1_op
    V1_op=Vy11;
    if i > 1
        if cont11(i,j) ~=
cont11(i-1,j)
            X11_op=x1;
        end
        if cont12(i,j) ~=
cont12(i-1,j)
            X12_op=x1;
        end
    else
        X11_op=x1inf;
        X12_op=x1inf;
    end
end
if Vy21 < V2_op
    V2_op=Vy21;
    if i > 1
        if cont21(i,j) ~=
cont21(i-1,j)
            X21_op=x1;
        end
    else
        X21_op=x1inf;
    end
end

```

```

end
if Vy31 < V3_op
    V3_op=Vy31;
    if i > 1
        if cont32(i,j) ~=
cont32(i-1,j)
            X32_op=x1;
        end
    else
        X32_op=x1inf;
    end
end
end % for c2
end % for c1

Va1(i,j)=VP1M;
Va2(i,j)=VP2M;
Va3(i,j)=VP3M;
Va4(i,j)=VP4M;

end % for i=1:Nx1
Z11_op(j)=X11_op;
Z12_op(j)=X12_op;
Z21_op(j)=X21_op;
Z32_op(j)=X32_op;
end % for j=Ne policy improv.
end % iteration while

% calcul du coût
TC_op=Va1(19,50); % Coût politique à l'optimum

figure(1)
mesh(ee,xx1,Va1(:, :))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('v(x,e,1)')
title ('Value function at mode 1')
grid on

figure(2)
mesh(ee,xx1,Va2(:, :))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('v(x,e,2)')
title ('Value function at mode 2')
grid on

```

```

figure(3)
mesh(ee,xx1,Va3(:,,:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel ('v(x,e,3)')
title ('Value function at mode 3')
grid on

figure(4)
mesh(ee,xx1,cont11(:,,:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel('Taux de production de M1 au mode 1')
title('Politique de manufacturing')
grid on

figure(5)
mesh(ee,xx1,cont12(:,,:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel('Taux de production de M2 au mode 1')
title('Politique de remanufacturing')
grid on

figure(6)
mesh(ee,xx1,cont21(:,,:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel('Taux de production de M1 au mode 2')
title('Politique de manufacturing')
grid on

figure(7)
mesh(ee,xx1,cont32(:,,:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
zlabel('Taux de production de M2 au mode 3')
title('Politique de remanufacturing')
grid on

figure(11)
plot(ee,Z11_op(:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des politiques de production M1')

```

```

grid on

figure(12)
plot(ee,Z12_op(:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des politiques de production M2')
grid on

figure(13)
plot(ee,Z21_op(:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des politiques de production M1')
grid on

figure(14)
plot(ee,Z32_op(:))
xlabel ('Emission (e)')
ylabel ('Stock (x)')
title('Traces des politiques de production M2')
grid on

%%

% Comparaison par rapport à la politique environnementale
appliquée sur chacune des machines

UU11=[];
UU12=[];
% Application sur M1 ou M2
UU11(1)=0;
UU11(2)=0; %d
UU11(3)=0; %U1max
UU12(1)=0;
UU12(2)=d; %d
UU12(3)=U2max; %U2max

Vp1=zeros(Nx1,Ne);
Vp2=zeros(Nx1,Ne);
Vp3=zeros(Nx1,Ne);
Vp4=zeros(Nx1,Ne);
Va1=zeros(Nx1,Ne);
Va2=zeros(Nx1,Ne);
Va3=zeros(Nx1,Ne);
Va4=zeros(Nx1,Ne);

```

```

X11_op=[];
X12_op=[];
X21_op=[];
X32_op=[];
Z11_op=[];
Z12_op=[];
Z21_op=[];
Z32_op=[];
Z=[];
it=0;precis=0.01;
Err=1000000; %pour while err > precis

%Condition de faisabilité
if Pi1*(U1max+U2max)+Pi2*U1max+Pi3*U2max < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end
% Faisabilité sur Machine M1
if U1max*(q211/(q121+q211)) < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end
% Faisabilité sur Machine M2
if U2max*(q212/(q122+q212)) < d
    disp('Problème non faisable');
    return
end

for j=1:Ne
    for i=1:Nx1
        cont11(i,j)=0;
        cont12(i,j)=0;
        cont21(i,j)=0;
        cont32(i,j)=0;
    end
end %Iniatisation des vecteurs de commande

for j=1:Ne
    Z11_op=0;
    Z12_op=0;
    Z21_op=0;
    Z32_op=0;
end
C1MAX=0; C1MIN=5e+10;

while Err > precis %boucle d'itération

```

```

C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
it=it+1;

%
% Policy evaluation
%

    for j=1:Ne
        e=einf+(j-1)*he;
        ee(j)=e;
        for i=1:Nx1
            x1=x1inf+(i-1)*hx1;
            xx1(i)=x1;

            de1=theta_zero1*cont11(i,j);
            de2=theta_zero2*cont12(i,j);
            de3=theta_zero1*cont21(i,j);
            de4=theta_zero2*cont32(i,j);
            u11=cont11(i,j);
            u12=cont12(i,j);
            u21=cont21(i,j);
            u32=cont32(i,j);

            [Vx11,          Vx21,          Vx31,          Vx41]=
Cost_Mdl_III(i,j,x1,e,hx1,he,u11,u12,u21,u32,d,q121,q122,q211,
q212,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Nx1,Ne,de1,de2,de3,de4,rho,c1p,c1m,c1u,c2
u,ce,L);

            Va1(i,j)=Vx11;
            Va2(i,j)=Vx21;
            Va3(i,j)=Vx31;
            Va4(i,j)=Vx41;
            if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))>C1MAX
                C1MAX=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
            end
            if abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j))<C1MIN
                C1MIN=abs(Va1(i,j)-Vp1(i,j));
            end
            if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))>C1MAX
                C1MAX=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
            end
            if abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j))<C1MIN
                C1MIN=abs(Va2(i,j)-Vp2(i,j));
            end
            if abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j))>C1MAX
                C1MAX=abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j));
            end
        end
    end

```

```

        if abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va3(i,j)-Vp3(i,j));
        end
        if abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j));
        end
        if abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va4(i,j)-Vp4(i,j));
        end

        end % de for i=1:Nx1
    end % de for j=1:Ne policy evaluation
    vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
    vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
    Err=abs(vmin-vmax)

    Vp1=Va1;
    Vp2=Va2;
    Vp3=Va3;
    Vp4=Va4;

    %
    % policy improvement
    %

    V1_op=5e+10;
    V2_op=5e+10;
    V3_op=5e+10;
    V4_op=5e+10;
    for j=1:Ne
        V1_op=5e+10;
        V2_op=5e+10;
        V3_op=5e+10;
        V4_op=5e+10;

        e=einf+(j-1)*he;
        ee(j)=e;

        for i=1:Nx1
            x1=x1inf+(i-1)*hx1;
            xx1(i)=x1;

            VP1M=10000000;
            VP2M=10000000;
            VP3M=10000000;

```

```

VP4M=10000000;

%for c on regarde quelle est la commande (u1,u2)
qui minimise le coût
for c1=1:3
    u11=UU11(c1); % 0 d U1max
    u21=UU11(c1);
    for c2=1:3
        u12=UU12(c2); % 0 d U2max
        u32=UU12(c2);

        de1=theta_zero1*u11;
        de2=theta_zero2*u12;
        de3=theta_zero1*u21;
        de4=theta_zero2*u32;
        [Vy11, Vy21, Vy31, Vy41]=
Cost_Mdl_III(i,j,x1,e,hx1,he,u11,u12,u21,u32,d,q121,q122,q211,
q212,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Nx1,Ne,de1,de2,de3,de4,rho,c1p,c1m,c1u,c2
u,ce,L);

        Va1(i,j)=Vy11;
        Va2(i,j)=Vy21;
        Va3(i,j)=Vy31;
        Va4(i,j)=Vy41;

        if Va1(i,j) < VP1M
            VP1M=Vy11;
            cont11(i,j)=u11;
            cont12(i,j)=u12;
        end
        if Va2(i,j) < VP2M
            VP2M=Vy21;
            cont21(i,j)=u21;
        end
        if Va3(i,j) < VP3M
            VP3M=Vy31;
            cont32(i,j)=u32;
        end
        if Va4(i,j) < VP4M
            VP4M=Vy41;
        end
        if Vy11 < V1_op
            V1_op=Vy11;
            if i > 1
                if cont11(i,j) ~=
cont11(i-1,j)
                    X11_op=x1;

```

```

end
if cont12(i,j) ~=
    X12_op=x1;
end
else
    X11_op=x1inf;
    X12_op=x1inf;
end
end
if Vy21 < V2_op
    V2_op=Vy21;
    if i > 1
        if cont21(i,j) ~=
            X21_op=x1;
        end
        else
            X21_op=x1inf;
        end
    end
    if Vy31 < V3_op
        V3_op=Vy31;
        if i > 1
            if cont32(i,j) ~=
                X32_op=x1;
            end
            else
                X32_op=x1inf;
            end
        end
    end
end % for c2
end % for c1

Va1(i,j)=VP1M;
Va2(i,j)=VP2M;
Va3(i,j)=VP3M;
Va4(i,j)=VP4M;

end % for i=1:Nx1
Z11_op(j)=X11_op;
Z12_op(j)=X12_op;
Z21_op(j)=X21_op;
Z32_op(j)=X32_op;
end % for j=Ne policy improv.

```

```
end % iteration while

Diff=0; % initialisation différence coût en pourcentage
Diff1=0; % initialisation différence coût

CZ1Z2=Val(19,50); % coût politique au point de comparaison
Diff=100*((CZ1Z2-TC_op)/TC_op);
Diff1=(CZ1Z2-TC_op)
```


LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdessalem, M., Riopel, D., Hadj-Alouane, A. (2007). Conception pour la logistique inverse : Proposition d'un cahier des charges. (*CIRRELT-2007-26*), Montréal, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport.
- Afshar-Bakeshloo, M., Bozorgi-Amiri, A., Sajadi, S. M., & Jolai, F. (2018). A multi-objective Environmental Hedging Point Policy with customer satisfaction criteria. *Journal of Cleaner Production*, 179, 478-494.
- Agrawal, A., Harhalakis, G., Minis, I., & Nagi, R. (1996). 'Just-In-Time' Production of Large Assemblies. *IIE Transactions*, 28(8), 653-667.
- Akella, R., & Kumar, P. (1986). Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(2), 116-126.
- Arora, S., & Cason, T. (1996). Why Do Firms Volunteer to Exceed Environmental Regulations? Understanding Participation in EPA's 33/50 Program. *Land Economics*, 72(4), 413-432.
- Arora, S., & Gangopadhyay, S. (1995). Toward a theoretical model of voluntary overcompliance. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 28(3), 289-309.
- Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2014). Joint production and setup control policies : An extensive study addressing implementation issues via quantitative and qualitative criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5), 809-826.
- Basnet, C., & Mize, J. H. (1995). A rule-based, object-oriented framework for operating flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 33(5), 1417-1431.
- Ben Salem, A. (2014). *Commande des systèmes manufacturiers non-fiabiles en intégrant des aspects environnementaux*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Canada).
- Bennekrouf, M., Benyoucef, L., & Sari, Z. (2010). *Problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses : Etat de l'art*. In 8ème Conférence Internationale de Modélisation et de Simulation-MOSIM 2010.
- Ben-Salem, A., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015a). An Environmental Hedging Point Policy to control production rate and emissions in unreliable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 53(2), 435-450.
- Ben-Salem, A., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015b). Environmental issue in an alternative production-maintenance control for unreliable manufacturing system subject to

- degradation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1), 383-398.
- Bhattacharya, A. K., & Coleman, J. L. (1994). Linking manufacturing strategy to the design of a customized hybrid production control system. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7(2), 134-141.
- Blackman, A., & Boyd, J. (2002). Tailored Regulation: Will Voluntary Site-Specific Environmental Performance Standards Improve Welfare? *Southern Economic Journal*, 69(2), 309-326.
- Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Beek, P., Hordijk, L., & Van Wassenhove, L. N. (1995). Interactions between operational research and environmental management. *European Journal of Operational Research*, 85(2), 229-243.
- Bonney, M., & Jaber, M. Y. (2011). Environmentally responsible inventory models : Non-classical models for a non-classical era. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 43-53.
- Boukas, E. K., & Haurie, A. (1990). Manufacturing flow control and preventing maintenance : A stochastic control approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(9), 1024-1031.
- Bouslah, B., Gharbi, A., Pellerin, R., & Hajji, A. (2013). Optimal production control policy in unreliable batch processing manufacturing systems with transportation delay. *International Journal of Production Research*, 51(1), 264-280.
- Bouslikhane, S., Hajej, Z., & Rezg, N. (2018). An Optimal Integrated Maintenance to production with Carbon Emission for a Closed-loop System. *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 177-182.
- Brouhle, K., Griffiths, C., & Wolverton, A. (2005). The Use of Voluntary Approaches for Environmental Policymaking in the U.S. In E. Croci (Éd.), *The Handbook of Environmental Voluntary Agreements : Design, Implementation and Evaluation Issues* (p. 107-134). Springer Netherlands.
- Brouhle, K., Griffiths, C., & Wolverton, A. (2009). Evaluating the role of EPA policy levers : An examination of a voluntary program and regulatory threat in the metal-finishing industry. *Journal of Environmental Economics and Management*, 57(2), 166-181.
- Brundtland. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*. Repéré à <https://digitallibrary.un.org/record/139811>.
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management : Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360-387.

- Chen, C., & Monahan, G. E. (2010). Environmental safety stock : The impacts of regulatory and voluntary control policies on production planning, inventory control, and environmental performance. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1280-1292.
- Chen, X., Benjaafar, S., & Elomri, A. (2013). The carbon-constrained EOQ. *Operations Research Letters*, 41(2), 172-179.
- Cooper, D. R., & Allwood, J. M. (2012). Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life. *Environmental Science & Technology*, 46(18), 10334-10340.
- Corbett, C. J., & Kirsch, D. A. (2001). International Diffusion of Iso 14000 Certification. *Production and Operations Management*, 10(3), 327-342.
- Dobos, I. (1998). Production-inventory control under environmental constraints. *International Journal of Production Economics*, 56-57, 123-131.
- Dobos, I. (1999). Production strategies under environmental constraints in an Arrow–Karlin model. *International Journal of Production Economics*, 59(1), 337-340.
- Dobos, I. (2001). Production strategies under environmental constraints : Continuous-time model with concave costs. *International Journal of Production Economics*, 71(1), 323-330.
- Dowlatshahi, S. (2000). Developing a Theory of Reverse Logistics. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 30(3), 143-155.
- Drake, D. F., Kleindorfer, P. R., & Wassenhove, L. N. V. (2016). Technology Choice and Capacity Portfolios under Emissions Regulation. *Production and Operations Management*, 25(6), 1006-1025.
- Elhafsi, M., & Bai, S. X. (1996). Optimal production control of a dynamic two-product manufacturing system with setup costs and setup times. *Journal of Global Optimization*, 9(2), 183-216.
- Elkington, J. (1998). Partnerships from Cannibals with Forks : The Triple Bottom Line of 21st-Century Business. *ENVIRONMENTAL QUALITY MANAGEMENT*, 8(1), 37-52.
- Entezaminia, A., Gharbi, A., & Ouhimmou, M. (2020). Environmental hedging point policies for collaborative unreliable manufacturing systems with variant emitting level technologies. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119539.
- Entezaminia, A., Gharbi, A., & Ouhimmou, M. (2021). A joint production and carbon trading policy for unreliable manufacturing systems under cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, 293, 125973.

- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Wassenhove, L. N. V. (2001). The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156-173.
- Gao, J., Chen, X., & Zheng, D. (2010). *Remanufacturing oriented adaptive repair system for worn components*. 13-18.
- Geyer, R., & Jackson, T. (2004). Supply Loops and Their Constraints : The Industrial Ecology of Recycling and Reuse. *California Management Review*, 46(2), 55-73.
- 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), 6539-6557.
- Gouvernement du Québec. (2020). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990. *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission*, 44. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/index.htm>
- Hajej, Z., Rezg, N., & Bouslikhane, S. (2019). A Joint Production and Maintenance Optimization of Closed-Loop Production System under Carbon Emission with a Switching Subcontractor Consideration. *Applied Sciences*, 9(6), 1105.
- Hajej, Z., Rezg, N., & Gharbi, A. (2017a). Ecological optimization for forecasting production and maintenance problem based on carbon tax. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5), 1595-1606.
- Hajej, Z., Rezg, N., & Gharbi, A. (2017b). Joint optimization of production and maintenance planning with an environmental impact study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1), 1269-1282.
- Hennequin, S., & Ramirez Restrepo, L. M. (2016a). Fuzzy model of a joint maintenance and production control under sustainability constraints. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1216-1221.
- Hennequin, S., & Restrepo, L. M. R. (2015). A fuzzy hedging point policy for sustainable manufacturing system. *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, 1041-1047.
- Jaber, M. Y., Glock, C. H., & Saadany, A. M. A. E. (2013). Supply chain coordination with emissions reduction incentives. *International Journal of Production Research*, 51(1), 69-82.

- Jain, R. K. (1993). *Regulatory framework : United States, Canada, and Mexico*. In : Kolluru, R.V. (Ed.), *Environmental Strategies Handbook*. McGraw-Hill, Inc., New York, p. 67–117.
- Jorjani, S., Leu, J., & Scott, C. (2004). Model for the allocation of electronics components to reuse options. *International Journal of Production Research*, 42(6), 1131-1145.
- Kang, K., Pu, W., & Ma, Y. (2018). *A Dynamic Programming-Based Sustainable Inventory-Allocation Planning Problem with Carbon Emissions and Defective Item Disposal under a Fuzzy Random Environment* [Research Article]. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Kenne, J. P., & Boukas, E. K. (2003). Hierarchical control of production and maintenance rates in manufacturing systems. *J Qual Maint Eng*, 9(1), 66-82.
- Kenne, J. P., & Gharbi, A. (2000). Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control*, 11(6), 581-588.
- Kenne, J. P., & Nkeungoue, L. J. (2008). Simultaneous control of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system. *Applied Numerical Mathematics*, 58(2), 180-194.
- Kenne, J.-P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 81-93.
- Khanna, M., Quimio, W. R. H., & Bojilova, D. (1998). Toxics Release Information : A Policy Tool for Environmental Protection. *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(3), 243-266.
- Kimemia, J., & Gershwin, S. B. (1983). An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System. *IIE Transactions*, 15(4), 353-362.
- Kouedou, A. F. (2014). *Optimisation conjointe des stratégies de production et de réutilisation en environnements incertains*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, Canada).
- Kouedou, A. F., Kenné, J.-P., Dejax, P., Songmene V, Polotski V. (2015). Stochastic models and numerical solutions for manufacturing/remanufacturing systems with applications to the printer cartridge industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 662-671.
- Kushner, H. J., & Dupuis, P. G. (1992). Numerical methods for stochastic control problems in continuous time. *New York. Springer-Verlag*.
- Lambert, S., & Riopel, D. (2003). Logistique inverse : Revue de littérature. *Les Cahiers du GÉRAD*, G-2003-61. Montréal. École Polytechnique de Montréal, 45p.

- Lavoie, P., Gharbi, A., & Kenné, J.-P. (2010). A comparative study of pull control mechanisms for unreliable homogenous transfer lines. *International Journal of Production Economics*, 124(1), 241-251.
- Lee, W. L., & Yik, F. W. H. (2004). Regulatory and voluntary approaches for enhancing building energy efficiency. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(5), 477-499.
- Li, S. (2014a). Optimal control of production-maintenance system with deteriorating items, emission tax and pollution R&D investment. *International Journal of Production Research*, 52(6), 1787-1807.
- Li, S. (2014b). Optimal control of the production–inventory system with deteriorating items and tradable emission permits. *International Journal of Systems Science*, 45(11), 2390-2401.
- Li, S., & Gu, M. (2012). The effect of emission permit trading with banking on firm's production–inventory strategies. *International Journal of Production Economics*, 137(2), 304-308.
- Marcus, P. A., & Willig, J. T. (1997). *Moving ahead with ISO 14000: Improving environmental management and advancing sustainable development*. J. Wiley and Sons.
- Neto, Q. F. J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J. A. E. E., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains : The WEEE case. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4463-4481.
- Olsder, G. J., & Suri, R. (1980). Time-optimal control of parts-routing in a manufacturing system with failure-prone machines. *1980 19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, 722-727.
- ONU. (2019). State of commodity dependence 2019. *United Nations Conference on Trade and Development*.
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., & Gharbi, A. (2018). Stochastic optimal control of random quality deteriorating hybrid manufacturing/remanufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 172-185.
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., Gharbi, A., & Polotski, V. (2015). Joint Production and Replacement Strategy for a Quality Deteriorating Failure-Prone Manufacturing System. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1198-1203.
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., Gharbi, A., & Polotski, V. (2017). Age-dependent production and replacement strategies in failure-prone manufacturing systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(3), 540-554.

- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Baltimore MD: Johns Hopkins University Press, 378p.
- Polotski, V., Kenne, J.-P., & Gharbi, A. (2016). Production Policy Optimization in Flexible Manufacturing-Remanufacturing Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 295-300.
- Quebec circulaire. (2021). *Enjeux et définition*. Repéré à <https://www.quebeccirculaire.org/static/Enjeux-et-definition.html>
- Quirion, P. (2010). Complying with the Kyoto Protocol under uncertainty : Taxes or tradable permits? *Energy Policy*, 38(9), 5166-5173.
- Rishel, R. (1975). Control of systems with jump Markov disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 20(2), 241-244.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J.-P., Montañó-Arango, O., & Hernandez-Gress, E. S. (2016). Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, 171, 134-150.
- Salim, B., Zied, H., & Nidhal, R. (2017). An optimal mathematical modeling for manufacturing/remanufacturing problem under carbon emission constraint. *2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, 1-5.
- Sethi, S. P., Zhang, Q., & Zhou, X. Y. (1997). Hierarchical production controls in a stochastic two-machine flowshop with a finite internal buffer. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(1), 1-13.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.
- Shin, R., & Chen, Y.-C. (2000). Seizing Global Opportunities for Accomplishing Agencies' Missions : The Case of ISO 14000. Repéré à <https://www.semanticscholar.org/paper/Seizing-Global-Opportunities-for-Accomplishing-The-Shin-Chen/b16c5cf1cd08c2fe3ca53a7cc47ec80f9c0e5455>
- Silva Filho, O. S. (2011). An open-loop solution for a stochastic production-remanufacturing planning problem. *Proceedings of the 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 369-378.
- Spengler, Th., Püchert, H., Penkuhn, T., & Rentz, O. (1997). Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 308-326.

- Stevenson, W. J., & Benedetti, C. (2007). *La gestion des opérations : Produits et services* (2^e édition). Chenelière/ McGraw-Hill.
- Sutherland, J. W., Adler, D. P., Haapala, K. R., & Kumar, V. (2008). A comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production. *CIRP Annals*, 57(1), 5-8.
- Tamani, K. (2008). *Développement d'une méthodologie de pilotage intelligent par régulation de flux adaptée aux systèmes de production*. (Thèse de doctorat, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, France).
- Thesen, A. (1999). Some simple, but efficient, push and pull heuristics for production sequencing for certain flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 37(7), 1525-1539.
- Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, 37(2), 114-136.
- Toptal, A., Özlü, H., & Konur, D. (2014). Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations. *International Journal of Production Research*, 52(1), 243-269.
- Wallace, D. (1995). *Environmental Policy and Industrial Innovation : Strategies in Europe, the USA and Japan*. Routledge.
- Williams, D., & Wirth, A. (1996). A New Heuristic for a Single Machine Scheduling Problem with Set-up Times. *Journal of the Operational Research Society*, 47(1), 175-180.
- Yan, H., & Zhang, Q. (1995). A numerical method in optimal production and setup scheduling of stochastic manufacturing systems : Summary of results. *Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control*, vol.3, 2872-2877.