

Optimisation des stratégies de production intégrant les aspects santé et sécurité au travail : cas de la transformation du granit

par

Kevin Gildas DONGMO TAMBAH

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME
EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN
GÉNIE DES RISQUES DE SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 18 AOÛT 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Kevin Gildas DONGMO TAMBAH, 2020

©Tous droits réservés

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Victor Songmene, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

Mme Tassedra Boukherroub, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

LE 05 AOÛT 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Kenné ainsi qu'à mon codirecteur, le professeur Victor Songmene pour leurs précieux conseils, leurs encouragements et leur soutien financier m'ayant permis d'achever ce travail. Je leur transmets toute ma reconnaissance pour leur participation à ce travail de recherche.

J'exprime ma gratitude au professeur Lucas Hof qui m'a fait l'honneur de présider le jury de la soutenance ainsi qu'à la professeure Tasseda Boukherroub pour avoir accepté de participer à la soutenance en tant que membre du jury.

J'ai une pensée profonde pour mon défunt père, Maurice Dongmo pour l'éducation et les valeurs qu'il m'a transmises.

Je remercie grandement ma maman, Yvette Tsamene epse Dongmo pour son soutien inconditionnel, ses conseils ainsi que ses sacrifices consentis à mon égard qui m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui.

Je remercie également mon frère Raoul Dongmo et ma sœur Nelly Dongmo pour leurs supports moraux.

Je remercie ma tendre compagne Leticia Djuidje pour son appui et ses multiples encouragements.

Je remercie enfin tous ceux qui directement ou indirectement m'ont soutenu pendant toute la durée de cette recherche, en particulier Mr Jules Kouam chercheur au département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure.

Optimisation des stratégies de production intégrant les aspects santé et sécurité au travail : cas de la transformation du granit

Kevin Gildas DONGMO TAMBAH

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un travail qui vise à développer une stratégie de planification de la production dans le but d'optimiser les coûts tout en tenant compte de la santé et la sécurité des employés. Le système manufacturier étudié est spécialisé dans la transformation du granit. Ce procédé est responsable de la production des particules de silice cristalline qui, une fois inhalées, vont provoquer la maladie pulmonaire connue sous le nom de silicose. Afin de réduire l'exposition à ces particules de silice cristalline, les industriels doivent implémenter dans leurs systèmes de production des mesures de prévention nécessaires et efficaces. Ces mesures représentent un investissement qui va accroître le coût total de production. Cela dit, les manufacturiers doivent donc revoir leur stratégie de production afin de tenir compte des coûts occasionnés par la santé et la sécurité au travail.

La première partie de cette étude vise à intégrer dans le système manufacturier les méthodes de réduction des particules en vue d'établir une stratégie d'optimisation qui tient compte de la santé de l'opérateur exposé aux particules de silice émises durant l'usinage. Le système est constitué d'une machine de production à laquelle sont associés deux équipements de protection qui visent à réduire la concentration de la silice cristalline en dessous de la limite prévue par la réglementation. L'ensemble est soumis à des pannes et réparations aléatoires. Le produit fini obtenu est un bloc de granit poli utilisé pour la fabrication des comptoirs de cuisine. Malheureusement, les mesures de prévention adoptées se dégradent avec le temps augmentant ainsi le risque d'exposition aux particules de silice cristalline.

La deuxième partie du travail a pour but d'intégrer la dégradation des équipements de réduction de poussières ainsi que la contrainte de la limite d'exposition professionnelle dans la modélisation du système manufacturier. Le système est décrit par un processus Markovien non homogène. Une approche de recherche simultanée des stratégies de production et de maintenance préventive est adoptée dans le but de déterminer les politiques optimales de production et de remplacement. La maintenance préventive vise à assurer la disponibilité et l'efficacité des mesures de prévention afin de respecter la valeur limite d'exposition professionnelle prévue par la réglementation. Une étude menée par l'IRSSST montre que près d'un quart d'accident au travail survient lors des activités de maintenance.

Afin de réduire ce nombre d'accidents, nous avons dans la dernière partie de ce mémoire intégré le cadencage dans la modélisation du système manufacturier ceci dans le but d'assurer la sécurité du personnel de maintenance. Pour éliminer tout risque de démarrage prématuré lors des interventions sur l'équipement, nous avons considéré le cadencage comme une étape à part entière. La modélisation a été faite par la chaîne de Markov non homogène. Dans toutes les trois parties de ce mémoire, la solution optimale du problème posé

est atteinte par le biais des équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman. Une analyse de sensibilité est ensuite faite pour confirmer les résultats obtenus.

Mots-clés : Systèmes manufacturiers, commande optimale stochastique, planification de la production, maintenance préventive, silicose, cadenassage.

Optimization of production strategies integrating occupational health and safety aspects: the case of granite processing

Kevin Gildas DONGMO TAMBAH

ABSTRACT

This thesis presents work that aims to develop a production planning strategy to optimize costs while taking into account the occupational health and safety of employees. The manufacturing system studied is specialized in the transformation of granite. This process is responsible for the production of crystalline silica particles which, once inhaled, will cause the lung disease known as silicosis. In order to reduce exposure to these crystalline silica particles, manufacturers must implement necessary and effective prevention measures in their production systems. These measures represent an investment that will increase the total cost of production. That said, manufacturers must therefore review their production strategy to take into account the costs incurred by occupational health and safety.

The first part of this study aims to integrate particulate matter reduction methods into the manufacturing system in order to establish an optimization strategy that takes into account the health of the operator exposed to silica particles emitted during machining. The system consists of a production machine to which two protective equipment is associated in order to reduce the concentration of crystalline silica below the regulatory limit. The whole system is subject to random breakdowns and repairs. The finished product obtained is a block of polished granite used in the manufacture of kitchen countertops. Unfortunately, the preventive measures adopted degrade over time, increasing the risk of exposure to crystalline silica particles.

The second part of the work aims to integrate the degradation of dust abatement equipment as well as the occupational exposure limit constraint in the modelling of the manufacturing system. The system is described by a non-homogeneous Markovian process. A simultaneous research approach of production and preventive maintenance strategies is adopted in order to determine optimal production and replacement policies. Preventive maintenance aims to ensure the availability and effectiveness of preventive measures to meet the regulatory occupational exposure limit value. A study conducted by the IRSST shows that nearly a quarter of occupational accidents occur during maintenance activities.

In order to reduce this number of accidents, the last part of this paper integrates padlocking into the modelling of the manufacturing system in order to ensure the safety of maintenance personnel. In order to eliminate any risk of premature start-ups during equipment interventions, we have considered the lockout as a step in its own right. The modelling was done using the non-homogeneous Markov chain. In all three parts of this paper, the optimal solution to the problem posed is achieved through the Hamilton-Jacobi-Bellman equations. A sensitivity analysis is then performed to confirm the results obtained.

Keywords: Manufacturing systems, optimal stochastic control, production planning, preventive maintenance, silicosis, lockout.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Systèmes manufacturiers	5
1.2.1 Systèmes manufacturiers discrets	5
1.2.2 Systèmes manufacturiers continus.....	6
1.2.3 Systèmes manufacturiers hybrides.....	6
1.3 Dynamique des systèmes manufacturiers	6
1.4 Types de systèmes manufacturiers.....	7
1.5 Structure du système étudié	8
1.6 Commande optimale stochastique et systèmes manufacturiers	10
1.7 Les poussières de silice.....	13
1.7.1 Définition (poussières de silice).....	13
1.7.2 Silice cristalline alvéolaire et ses effets sur la santé	15
1.8 Maintenance et production.....	19
1.9 Politique de cadencage.....	21
1.10 Synthèse de la revue de littérature	22
1.11 Conclusion	24
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Transformation du granit	25
2.3 Problématique	30
2.4 Objectifs de la recherche.....	31
2.5 Méthodologie de la recherche.....	32
2.6 Contribution et structure du mémoire	33
2.7 Hypothèses de modélisation	34
2.8 Conclusion	35
CHAPITRE 3 PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE UNITÉ DE TRANSFORMATION DU GRANIT SUJETTE À DES PANNES ET RÉPARATIONS ALÉATOIRES	37
3.1 Introduction.....	37
3.2 Formulation du problème.....	37
3.3 Modélisation	41
3.3.1 Matrice des taux de transition	41
3.3.2 Domaine des commandes admissibles.....	42
3.3.3 Dynamique de l'inventaire.....	42
3.3.4 Conditions de faisabilité du système et probabilités limites	42

3.3.5	Coût instantané et coût total.....	44
3.3.5.1	Coût instantané.....	44
3.3.5.2	Coût total.....	44
3.4	Conditions d'optimum	45
3.5	Méthodes numériques	46
3.6	Exemple numérique	49
3.7	Analyse de sensibilité	55
3.7.1	Variation du coût de rupture de stock et du temps moyen de bon fonctionnement de la machine (MTTF).....	55
3.7.2	Variation du coût de rupture de stock et du temps moyen de réparation de la machine (MTTR)	56
3.7.3	Variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de bon fonctionnement de l'unité de ventilation locale (MTTF)	57
3.7.4	Variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de réparation de l'unité de ventilation locale (MTTR)	58
3.8	Conclusion	60
CHAPITRE 4 PLANIFICATION DE LA PRODUCTION INTÉGRANT LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET LA LIMITE D'EXPOSITION AUX PARTICULES DE SILICE : APPLICATION À LA TRANSFORMATION DU GRANIT		
4.1	Introduction.....	63
4.2	Formulation du problème.....	63
4.3	Dynamique du système	66
4.4	Domaine de commande admissible	70
4.5	Faisabilité du système	70
4.6	Coût instantané et coût total actualisé.....	71
4.7	Conditions d'optimum et méthodes numériques	71
4.7.1	Approche numérique.....	72
4.7.2	Exemple numérique	76
4.8	Analyse des résultats.....	78
4.9	Analyse de sensibilité	83
4.9.1	Variation du coût de rupture de stock	84
4.9.2	Variation du coût de mise en inventaire	85
4.9.3	Variation du coût de maintenance préventive.....	86
4.9.4	Variation de la limite d'exposition	86
4.10	Modélisation du système à 3 modes d'une unité de transformation du granit soumis à la contrainte de limitation d'exposition aux particules de silice.....	88
4.10.1	Exemple numérique	89
4.10.2	Analyse des résultats.....	89
4.10.3	Analyse de sensibilité	91
4.11	Conclusion	93

CHAPITRE 5	MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE UNITÉ DE TRANSFORMATION DE GRANIT AVEC CADENASSAGE	95
5.1	Introduction.....	95
5.2	Formulation du problème.....	95
5.2.1	Matrice de taux de transition.....	97
5.2.2	Domaine de commande admissible	97
5.2.3	Condition de faisabilité	98
5.2.4	Dynamique continue	98
5.2.5	Coût instantané et coût total actualisé.....	99
5.2.6	Condition d'optimum.....	99
5.3	Approche numérique.....	100
5.4	Exemple numérique	102
5.4.1	Analyse des résultats.....	103
5.5	Analyse de sensibilité	111
5.6	Conclusion	117
CONCLUSION.....		119
ANNEXE I	PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 3) : SYSTÈME DE PRODUCTION AVEC PANNES ET RÉPARATIONS ALÉATOIRES.....	123
ANNEXE II	ÉQUATIONS DU SYSTÈME À 3 MODES.....	133
ANNEXE III	PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 4) : SYSTÈME DE PRODUCTION AVEC MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET LIMITE D'EXPOSITION : CAS DE 12 MODES ..	137
ANNEXE IV	PREMIÈRE PAGE DE L'ARTICLE	151
ANNEXE V	PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 4) : MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET PLANIFICATION DE LA PRODUCTION AVEC CADENASSAGE.....	153
BIBLIOGRAPHIE.....		161

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Quelques valeurs d'exposition limite.....15
Tableau 1.2	Synthèse de la revue de littérature22
Tableau 2.1	Concentration des particules respirables en mg/m^3 tiré de Jared et al. (2014), p.124.....28
Tableau 3.1	Dynamique du système39
Tableau 3.2	Description des modes des systèmes40
Tableau 3.3	Taux de transition du système.....51
Tableau 3.4	Valeurs numériques du système.....53
Tableau 4.1	Description des modes du système65
Tableau 4.2	Données numériques77
Tableau 4.3	Données numériques (système à 3 modes)89
Tableau 5.1	Donnée numérique de simulation103
Tableau 5.2	Variation du seuil critique en fonction du coût de mise en inventaire.....112
Tableau 5.3	Variation du seuil critique en fonction du coût de rupture de stock114
Tableau 5.4	Variation du seuil critique en fonction du coût de cadenassage115

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure du système étudiée9
Figure 1.2	Pourcentage des fractions inhalables, thoracique et alvéolaire.....14
Figure 1.3	Hierarchie des moyens de prévention18
Figure 2.1	Polissage des blocs de granit à l'aide d'une machine26
Figure 2.2	Comptoir de cuisine en granit tiré de Migan (2015).....26
Figure 2.3	Processus de fabrication du comptoir de cuisine en granit29
Figure 2.4	Méthodologie de la recherche32
Figure 3.1	Structure du système de production sujet à.....38
Figure 3.2	Diagramme de transition du système de production.....39
Figure 3.3	Taux de production au mode 1.....54
Figure 3.4	Variation du coût de rupture de stock et du MTTF de la machine56
Figure 3.5	Variation du coût de pénurie et du MTTR de la machine.....57
Figure 3.6	Variation du coût de mise en inventaire et du MTTF de l'unité.....58
Figure 3.7	Variation du coût de mise en inventaire et du MTTR59
Figure 3.8	Disponibilité du système manufacturier en fonction du60
Figure 4.1	Structure en arbre du processus stochastique.....64
Figure 4.2	Effets de la dégradation du système de captation sur68
Figure 4.3	Concentration en nombre des aérosols en fonction du temps.....69
Figure 4.4	Taux de panne en fonction de l'âge de76
Figure 4.5	Concentration des particules de silice en.....77
Figure 4.6a	Taux de production du système78
Figure 4.6b	Seuil critique en fonction de l'âge du système de ventilation.....78

Figure 4.7	Taux d'envoi en maintenance préventive	81
Figure 4.8	Trace du seuil de production et de maintenance	83
Figure 4.9	Variation du coût de pénurie	84
Figure 4.10	Variation du coût de mise en inventaire	85
Figure 4.11	Variation du coût de maintenance préventive.....	86
Figure 4.12	Variation de la limite de concentration de	87
Figure 4.13	Politique de production pour le système à 3 modes.....	90
Figure 4.14	Politique de maintenance préventive pour	90
Figure 4.15	Variation du coût de mise en inventaire	92
Figure 4.16	Variation du coût de pénurie du système à 3 modes.....	93
Figure 5.1	Diagramme de transition du.....	96
Figure 5.2	Taux de production	103
Figure 5.3	Taux d'envoi en maintenance préventive	105
Figure 5.4	Trace du seuil de production et de maintenance	107
Figure 5.5	Schéma d'implantation proposé aux industriels	108
Figure 5.6	Taux de cadenassage avant la maintenance préventive	109
Figure 5.7	Taux de cadenassage avant la réparation	110
Figure 5.8	Variation du coût de mise en inventaire	113
Figure 5.9	Variation du coût de rupture de stock	114
Figure 5.10	Trace du taux de cadenassage avant	116
Figure 5.11	Trace du taux de cadenassage avant réparation	117

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACGIH	American Conference of governmental Industrial Hygienist
AFNOR	Association Française de Normalisation
AGAN	As Good As New
AMS	Adjusted Manufacturing System
ASP	Association Paritaire Pour la Santé et la Sécurité au travail
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CNESST	Commission des Normes, de l'Équité, de la Santé et de la Sécurité au Travail
CSTC	Code de Sécurité pour les Travaux de Construction
DMS	Dedicated Manufacturing System
FMS	Flexible Manufacturing Systems
HJB	Hamilton-Jacobi-Bellman
HPP	Hedging Point Policy
IRNS	Institut Nationale de la Recherche et de la Sécurité
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité au Travail
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OIT	Organisation Internationale du Travail
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PIB	Produit Intérieur Brut
RSST	Règlement sur la Santé et la Sécurité au Travail
VLEP	Valeur Limite d'Exposition Professionnelle

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$\xi(t)$	Processus stochastique définissant la dynamique du système.
$\alpha(t)$	Mode de la machine au temps t .
$q_{\alpha\beta}$	Taux de transition du mode α au mode β .
$\Gamma(\alpha)$	Domaine des commandes admissibles.
$u(t)$	Taux de production au temps t .
u_{max}	Taux de production maximal de la machine.
d	Taux de demande.
$x(t)$	Niveau d'inventaire au temps t .
$\pi(\bullet)$	Probabilité limite.
U_1^{max}	Taux maximal de la machine au mode 1.
$g(\cdot)$	Coût instantané.
c^+	Coût de mise en inventaire.
c^-	Coût de pénurie.
$J(\cdot)$	Coût total actualisé.
ρ	Taux d'actualisation.
$v(\cdot)$	Fonction valeur.
$a(t)$	Âge de l'unité de ventilation au temps t .
$w_p(\cdot)$	Taux d'envoi en maintenance préventive.
w_p^{min}	Taux minimal d'envoi en maintenance préventive.
w_p^{max}	Taux maximal d'envoi en maintenance préventive.
c_r	Coût de la réparation.
c_p	Coût de maintenance préventive.
w_{cr}	Taux de cadenassage avant la maintenance corrective.
w_{cr}^{min}	Taux minimal d'envoi au cadenassage avant la maintenance corrective.
w_{cr}^{max}	Taux maximal d'envoi au cadenassage avant la maintenance corrective.
$w_{cp}(\cdot)$	Taux de cadenassage avant la maintenance préventive.
w_{cp}^{min}	Taux minimal d'envoi au cadenassage avant la maintenance préventive.
w_{cp}^{max}	Taux maximal d'envoi au cadenassage avant la maintenance préventive.

$Q(.)$	Matrice des taux de transitions.
D	Diamètre

INTRODUCTION

Grâce à la mondialisation, une entreprise peut produire et écouler ses produits à des milliers de kilomètres du lieu de production. Cette libre circulation des marchandises est la cause de la forte compétitivité qui sévit actuellement dans notre société. Pour se faire une place sur ce marché compétitif, les entreprises doivent proposer des produits à moindre coût, de bonne qualité, dans un délai réduit pour assurer la satisfaction de la clientèle. À cet effet, il est donc impératif pour les gestionnaires de disposer des équipements de pointe de dernière génération, d'un personnel qualifié, mais par-dessus tout avoir une excellente stratégie de production et de maintenance de ses équipements en vue d'améliorer leurs disponibilités.

Cependant, les industries manufacturières opèrent dans un environnement stochastique où les événements tels que la survenance d'une panne, d'un accident, viennent impacter sur la disponibilité des machines et du personnel. Ces aléas augmentent non seulement les coûts de production, mais perturbent également le flux de production. Afin d'optimiser ces coûts, et accroître la disponibilité des machines, plusieurs auteurs tels que Ouaret et al. (2015), Kouedou et al. (2014) se sont penchés sur le problème afin de proposer une solution. Malgré cela, les entreprises font face à une augmentation de leurs coûts de production imputable aux accidents de travail et aux maladies professionnelles.

D'après les données de l'Organisation Internationale du Travail (OIT, 2019), 2.78 millions de travailleurs perdent leur vie chaque année due aux accidents de travail et de maladies professionnelles. Notons que 2.4 millions de ces décès sont imputables aux maladies professionnelles comme la silicose. Entre autres, 378 millions de personnes sont victimes d'accidents de travail et de maladies professionnelles non mortelles chaque année. Mortels ou pas, ces événements indésirables sont la cause de plusieurs journées de travail perdues; ce qui représenterait en moyenne 4% du PIB mondial (Hämäläinen et al., 2017; Takala et al., 2014). Un rapport publié par l'IRSST en 2015 indique que les coûts générés par les accidents de travail et les maladies professionnelles se chiffrent respectivement à 3 787 350 202 \$ et 833 582 429 \$ au Québec chaque année entre 2005 et 2007. Forts de ce constat, certains secteurs

d'activités notamment le secteur de transformation du granit se sont vu imposer des lois permettant de réduire le nombre de décès.

La transformation du granit est un secteur d'activités au cœur du développement de nos infrastructures. De par la construction de nos maisons et des routes, elle occupe une place incontournable pour le bien-être des populations. Cependant, la transformation de cette roche cause beaucoup de problèmes (émission des particules de silice) de santé (silicose); raison pour laquelle des organismes comme OSHA ont dû réviser leur limite d'exposition en 2016 passant ainsi de $100 \mu g/m^3$ à $50 \mu g/m^3$. Selon OSHA, cette nouvelle norme permettrait aux employeurs de gagner 7,6 milliards de dollars par année compte tenu de la décroissance du taux de mortalité et de morbidité liées à l'exposition à la silice cristalline. Par ailleurs, cette réduction de la limite d'exposition permettrait de sauver 642 vies humaines. L'exposition prolongée à la silice cristalline peut avoir des effets néfastes et irréversibles sur la santé de l'employé. Ce qui pourrait détruire la vie de nombreuses personnes et de nombreuses familles. En 2008, la CNESST a instauré la politique de tolérance zéro pour l'exposition des travailleurs à la silice. Dorénavant, les entreprises dépassant la limite d'exposition en vigueur seront sommées d'arrêter leurs productions jusqu'à ce qu'elles disposent des moyens de réduction de ses particules leur permettant de respecter la limite. Cet arrêt viendra compromettre le flux de production causant ainsi des retards importants de livraison; ce qui pourrait pousser le client à se tourner vers la concurrence.

Toutes ses différentes mesures mises en place par les multiples organismes qui réglementent le secteur de la transformation du granit vont inciter les entreprises à investir encore plus dans les moyens de réduction des particules de silice cristalline. Cet investissement représente un coût qui viendra impacter sur le coût total de production poussant ainsi les entreprises à revoir leur stratégie de production. Cela dit, le problème qui se pose est de savoir quelle est la stratégie de production que les manufacturiers doivent ils disposer pour minimiser le coût total de production tout en tenant compte de la santé et la sécurité de leurs employés.

Le système manufacturier traité dans ce mémoire est constitué d'une machine polisseuse auquel sont associé deux équipements de réduction de poussière de silice cristalline émissent durant le polissage des blocs de granit. Ces derniers sont destinés à la fabrication des comptoirs de cuisine. Le polissage est l'action de polir dans le but de rendre brillant et lisse une surface (granit). Durant ce procédé, les équipements destinés à protéger l'opérateur se dégradent avec le temps. Cette dégradation va réduire l'efficacité et la disponibilité de ces équipements contribuant ainsi à une augmentation de la concentration de la silice cristalline dans l'air de travail. Raison pour laquelle il est important et capital de faire de l'entretien sur ces infrastructures. En vue de réduire le nombre d'accidents engendrer durant les activités de maintenance, la loi sur la santé et la sécurité au travail demande d'effectuer un cadenassage. Selon l'ASP (2017) le cadenassage est une méthode qui consiste à contrôler les énergies qui alimentent un équipement, un système ou un processus afin d'éliminer le risque de tout redémarrage ou de dégagement d'énergie prématuré pour permettre ainsi aux employés qui interviennent sur l'équipement d'effectuer leurs tâches en toute sécurité. Celui-ci a pour but d'isoler les énergies pour prévenir tout démarrage prématuré de l'équipement. Nous allons donc dans ce travail modéliser ce système de production en intégrant la gestion de la production, la maintenance, l'émission des particules de silice cristalline et le cadenassage. Ceci dans le but de proposer une stratégie qui optimise la production tout en tenant compte de la santé et la sécurité du personnel. Les résultats obtenus dans ce travail permettront aux entreprises d'optimiser la production, de respecter la limite d'exposition prévue par la réglementation, d'améliorer la disponibilité et l'efficacité des mesures de réduction de poussière et de réduire le nombre d'accidents dus au cadenassage.

Le prochain chapitre porte sur la revue de la littérature en rapport avec le problème traité dans ce mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Ce chapitre est destiné à détailler les concepts qui permettront de mieux cerner le sujet que nous traitons dans ce mémoire. Cette section se présente en trois grandes parties. Dans la première partie, nous aborderons d'une façon générale la production en milieu manufacturier. Dans la seconde partie, nous allons montrer l'importance de tenir compte de la sécurité du personnel pour assurer le bon fonctionnement d'un système manufacturier. Nous terminerons ce chapitre avec la notion de maintenance des équipements manufacturiers.

1.2 Systèmes manufacturiers

On définit un système comme étant un ensemble d'éléments mis en ensemble et qui interagissent entre eux suivant un certain nombre de principes et de règles. Dans le contexte manufacturier, le système de production est un ensemble de ressources matérielles (actifs de production) et ressources humaines reliées par des flux physiques (produits) et des flux d'informations (qualité, quantité ...) avec pour but de transformer la matière première en un produit fini respectant les exigences des clients (Benedetti, 2002). Selon l'interaction qu'il y'a entre différents éléments, on peut classifier les systèmes manufacturiers suivant 3 catégories.

1.2.1 Systèmes manufacturiers discrets

Un système manufacturier est considéré comme discret lorsqu'on a une opération indépendante réalisée par deux équipements indépendants tels que les machines de production (Gharbi et Kenne, 2003). On dit également qu'un système est discret lorsque les produits obtenus sont distincts (Elhafsi et Bai, 1996). Dans certains cas, le fait d'avoir une rupture du flux sous forme d'en-cours et de stock intermédiaire est caractéristique d'un système manufacturier discret (Bironneau, 2000). Ce type de système est caractérisé par un long délai de production, une

faible efficacité et d'un important stock intermédiaire. C'est également un système qui permet de produire une très grande variété de produits finis.

1.2.2 Systèmes manufacturiers continus

Le système manufacturier continu est défini comme un système dont le flux de matière est ininterrompu entre les postes de travail consécutifs. Dans ce cas, on n'a pas de stock intermédiaire entre les postes de travail c'est le cas des raffineries, de la sidérurgie (Dehayem, 2009). Généralement, les produits issus de ce type de système sont des produits standardisés et la production est très peu flexible (Ouaret, 2012). Contrairement au flux discontinu, le système continu a un faible délai de production et une bonne efficacité. Pour des raisons de compétitivité, certaines entreprises vont combiner les deux systèmes dans un même procédé donnant ainsi naissance à un système manufacturier hybride (Bhattacharya et Coleman, 1994).

1.2.3 Systèmes manufacturiers hybrides

Le système manufacturier hybride est une combinaison des deux précédents systèmes (discret et continu). Ces deux systèmes (continu et discret) pris individuellement ne sont pas toujours capables de satisfaire les exigences d'une entreprise qui se veut compétitive (Emami-Mehrgani, 2012) d'où l'intérêt pour un système mixte. Le système manufacturier hybride transforme la matière première continue à travers des machines qui fonctionnent partiellement en mode discret. Par conséquent, ce type de système n'est ni continu ni discret, mais plutôt une alternance entre le flux continu et le flux discontinu (Lazarrescu et al., 1998). Lorsque ces deux événements (discret et continu) sont soumis à l'itération d'une fonction temps, alors le système manufacturier est dit dynamique (Elhafsi et Bai, 1996).

1.3 Dynamique des systèmes manufacturiers

L'environnement manufacturier est soumis à des changements au cours du temps. En s'appuyant sur la dynamique des systèmes, on a certains procédés qui sont décrits par une dynamique déterministe et d'autres par une dynamique stochastique. Un système a une

dynamique stochastique si au moins un de ses paramètres est aléatoire; dans le cas contraire, il est déterministe (Sader et Sorensen, 2003).

De ce qui précède, nous pouvons constater qu'un système manufacturier est assez complexe puisqu'il dépend de plusieurs paramètres (capacité de production, taux de demande des clients, équipements de production). Suivant ces paramètres, nous avons recensé plusieurs types de systèmes manufacturiers.

1.4 Types de systèmes manufacturiers

Partant de la structure générale d'une chaîne d'approvisionnement (matière première, ressources et produit fini), l'interaction qui existe entre les différents maillons de la chaîne de production fait croître l'incertitude qui peut exister entre l'offre et la demande. Cela dit, les industriels devront donc réévaluer leurs structures afin de s'assurer de leur capacité à fournir un produit de qualité, en quantité, et dans un délai imposé par la clientèle. Pour ce fait, plusieurs types de systèmes manufacturiers ont été mis en place afin de pallier ce problème de réactivité en cas d'un quelconque événement indésirable. D'après Zhang et al. (2006) les trois types de systèmes les plus connus sont :

- ❖ DMS (Dedicated Manufacturing System). Les systèmes manufacturiers dédiés sont des systèmes conçus pour produire des pièces assez spéciales avec une forme et une taille inchangée. Donc il s'agit d'un système qui produit un seul type de pièces avec un taux de production très élevé. Ce type de système est destiné à une production de masse. Son principal avantage est sa rentabilité, tant dit que son inconvénient majeur est le manque de flexibilité à un quelconque changement de produit.
- ❖ AMS (Ajusted Manufacturing System). Les Systèmes manufacturiers ajustables ou réglables sont constitués d'une série d'équipements de production ajustable utilisée pour produire une gamme réduite de produits. Son principal avantage se situe au niveau de ses équipements de production qui sont constitués de composants standard impliquant une facilité de reconfiguration du setup.

- ❖ FMS (Flexible Manufacturing Systems). Les systèmes manufacturiers flexibles sont des systèmes qui ont une très grande capacité à s'adapter à un quelconque changement (crise sanitaire : COVID-19). Au cours de l'évolution dans le temps du système de production, nous pouvons avoir des événements comme des pannes ou encore la variation de la demande des clients. Tous ces événements ont un impact sur l'efficacité du système de production d'où l'importance d'avoir un système capable de s'adapter à tous ses changements.

Le FMS est le type de système que nous allons adopter tout au long de ce travail pour la simple raison qu'il propose une grande flexibilité donc une grande capacité à s'adapter à toutes éventualités aussi bien interne (pannes, matières premières...) qu'externe (compétitivité) dans le but de satisfaire la clientèle. La transformation du granit s'effectue au travers des équipements qui évoluent dans un environnement stochastique. Par conséquent, le système doit être capable de s'adapter à toute éventualité raison pour laquelle le système manufacturier de type FMS est assimilé à la chaîne de transformation modélisée dans ce mémoire.

1.5 Structure du système étudié

Dans cette partie, le système étudié sera décrit d'une manière générale, mais nous invitons le lecteur à consulter le chapitre suivant pour plus de détail. La figure 1.1 montre la structure étudiée qui se présente en quatre blocs. Au début de la chaîne, nous avons le bloc qui correspond aux fournisseurs des matières premières (bloc de granit dans notre cas). Celles-ci seront usinées au bloc 2. Le deuxième bloc pour sa part, correspond à la zone de travail sur laquelle nous allons nous focaliser dans cette étude. Il s'agit d'un système de production qui s'occupe de la transformation des matières premières (bloc de granit) en un produit semi-fini. Cette unité de production est constituée d'une machine et de deux unités associées pour assurer la santé et la sécurité des travailleurs. Le système manufacturier considéré est sujet à des événements aléatoires tels que les pannes. D'où l'importance de disposer d'un service de maintenance pour remettre en marche les équipements défaillants; ceci suivant une politique

de contrôle bien établie. À la fin du processus de transformation, on obtient un produit semi-fini que nous allons disposer dans le troisième bloc. Celui-ci est en fait un centre de distribution où on stocke des produits semi-finis avant de les disposer à des usines qui vont procéder à la mise en forme du produit fini. Tous ses blocs sont reliés par le flux des produits et le flux d'information.

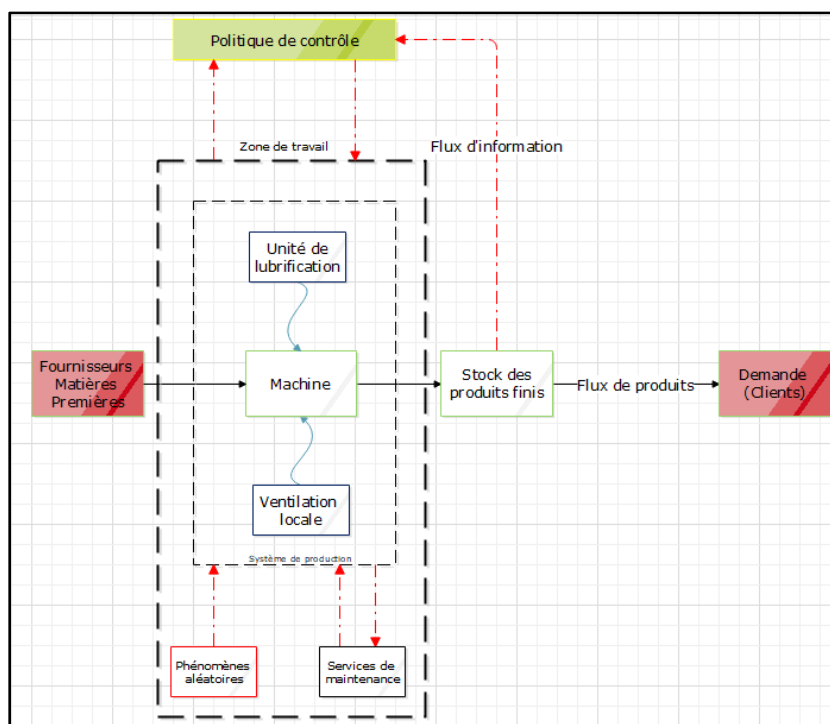


Figure 1.1 Structure du système étudiée

Le fort taux d'industrialisation que nous vivons dans notre société actuelle est la source d'une compétitivité féroce d'où l'importance d'établir une stratégie de production pouvant faire face à toute éventualité afin non seulement d'améliorer ses coûts de production, mais aussi de satisfaire la clientèle avec des produits de qualité, en quantité et dans un délai voulu par ce dernier. Cette amélioration sera à la base d'une optimisation stochastique qui permettra de développer une commande optimale que le gestionnaire devra suivre pour non seulement rester compétitif, mais aussi d'atteindre ses objectifs.

1.6 Commande optimale stochastique et systèmes manufacturiers

Dans le domaine de la production manufacturière, la planification a toujours suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs qui ne se retiennent pas d'ajouter à chaque étude un nouveau paramètre afin de se rapprocher le plus possible de la réalité. Le but principal étant de concevoir un modèle dynamique pour répondre aux besoins de la clientèle (temps, quantité et qualité) malgré la présence des phénomènes imprévus (pannes, COVID-19 ...) que connaît l'environnement manufacturier. D'après Dehayem (2009), plusieurs méthodes ont déjà été utilisées dans la recherche des solutions au problème de commande optimale stochastique. Nous pouvons citer entre autres : l'intelligence artificielle (Basnet et Mize, 1986), l'heuristique (Stecke et Sloborg, 1981), la simulation (Kenne et Gharbi, 2004). Les résultats issus de ces méthodes présentent une limite : elles ne tiennent pas compte des paramètres aléatoires tels que les pannes, la demande des clients, les accidents de travail. En réalité, elles sont mieux adaptées pour les systèmes déterministes; raison pour laquelle la théorie de commande optimale stochastique a été mise sur pied.

La théorie de commande stochastique est une théorie qui a pour but de développer un modèle afin d'élaborer une stratégie de commande qui tient compte des imprévus des systèmes de production. Plusieurs chercheurs ont pu grâce à la théorie de commande stochastique contrôler de façon optimale les systèmes manufacturiers flexibles (FMS). Rishel (1975) a développé les conditions d'optimum (nécessaires et suffisantes) pour obtenir la solution optimale en utilisant la programmation dynamique. Plus tard, Osler et Suri (1980) ont pu modéliser la commande stochastique de planification d'un système manufacturier sujet à des pannes aléatoires suivant un processus Markovien homogène (taux de transition constant). Ils ont eu comme résultats un ensemble d'équations de programmation dynamique de la politique de commande optimale, mais se sont heurtés à sa résolution due à la complexité du problème.

C'est alors que, Kimemia et 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 fait, ils ont pu montrer en se basant sur l'étude faite par Rischel (1975) que la commande optimale permettant de minimiser les coûts épouse une structure bien déterminée appelée politique à seuil critique. 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 et Kumar (1986) ont pu démontrer que pour un système décrit par un processus Markovien avec taux de transition constant (Markov homogène), la politique qui consiste à maintenir un stock de sécurité non négatif pendant les périodes d'excès de capacité pour prévenir les futures insuffisances de capacité est en fait une politique de commande optimale et s'appelle politique à seuil critique ou encore Hedging Point Policy (HPP). Dans la même logique, Bielecki et Kumar (1988) se sont penchés sur le problème de commande stochastique où ils ont pu prouver que la politique à seuil critique reste optimale même sur certaines hypothèses comme le taux de demande constant.

Dans un système de production complexe, Boukas et Kenne (1997) ont pu montrer que la fonction qui représente le coût optimal appelé fonction valeur doit satisfaire un ensemble d'équations différentielles appelées équations d'HJB. Étant donné l'inexistence d'une solution analytique aux équations d'HJB, Boukas et Haurie (1990) ont pu apporter une solution à ce problème de commande stochastique en utilisant une méthode numérique basée sur l'approche de Kushner et 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 (Rischel (1975), Akella et 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.

Boukas et 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 Ouaret et al. (2015) 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 dans un système manufacturier constitué d'une machine fabricant un type de produit, la politique a seuil critique est optimal. La modélisation de ce système manufacturier s'est fait grâce à la chaîne de Markov non homogène (taux de transition non constant).

En nous basant sur la littérature, nous avons vu qu'il y'a plusieurs facteurs qui ont été pris en considération dans de nombreux travaux en vue de se rapprocher le plus possible de la réalité. Nous pouvons citer entre autres le travail de Dehayem (2009) qui intègre la notion de réparation imparfaite dans un environnement manufacturier; Diep-Thanh (2011), dans sa modélisation, intègre la demande comme une variable aléatoire. Nous pouvons ainsi citer plusieurs autres exemples des travaux effectués, mais ce qui nous intéresse c'est le facteur santé et sécurité au travail.

Le bon fonctionnement d'un environnement manufacturier repose en général sur trois composantes : la matière première, les ressources (machines et humains) et les clients. Si l'une de ces composantes venait à manquer, cela aurait de graves répercussions sur la politique de contrôle optimale. D'où l'importance de protéger l'humain contre tout accident de travail ou maladie professionnelle. Emami-Merghani et al. (2013, 2014), Badiane et al. (2016) ont intégré la notion de cadenassage dans la modélisation du système manufacturier en se basant sur la norme canadienne CSA Z460-05 qui recommande d'effectuer un cadenassage avant toute intervention sur la machine. Dans ces études, il est montré que l'activité de cadenassage prend certes un peu de temps, mais sur un horizon infini cela peut avoir un impact sur le contrôle

optimal du flux de production. Samba (2017) a intégré dans la modélisation du système de production la dégradation de la performance d'un technicien qui effectue une quelconque maintenance; ce qui rend plus long le temps de maintenance et perturbe la production. Dans le cadre de notre recherche, nous allons tout comme les autres nous centrer sur l'humain en vue d'offrir un cadre sain et sécuritaire pour effectuer sa tâche. Le système manufacturier sur lequel nous allons accomplir cette recherche est un système spécialisé dans la transformation du granit. Durant cette transformation, les particules de silices sont émises et ingérées par l'opérateur. Ce qui pourrait sur le long terme provoquer la maladie professionnelle appelée silicose. Raison pour laquelle plusieurs organismes à l'instar de OSHA ont émis non seulement des stratégies à mettre sur pied pour réduire l'exposition, mais aussi à imposer une limite de concentration que les manufacturiers doivent respecter pour éviter de payer des pénalités qui viendront accroître le coût total de production. Dans ce travail, nous allons identifier une stratégie à mettre en place pour limiter l'exposition, ensuite modéliser le système de production en intégrant cette stratégie de réduction de poussières dans le but de prévenir la silicose causée par une exposition prolongée aux particules de silices.

1.7 Les poussières de silice

La transformation des granits génère des copeaux, mais aussi et surtout des poussières constituées des particules fines et des particules ultrafines qui contiennent de la silice cristalline dangereuse pour l'humain.

1.7.1 Définition (poussières de silice)

La silice est le nom donné pour désigner un groupe de minéraux composés de silicium et d'oxygène (SiO_2), ou quartz, qui sont les deux éléments les plus abondants de l'écorce terrestre (guide de bonnes pratiques, s.d). Le plus souvent, on la retrouve sous deux formes :

- ❖ À l'état amorphe (lorsqu'elle n'est pas encore usinée) : dans ce cas, elle ne pose pas de problème de santé.

- ❖ Sous la forme cristalline : cet état résulte des différents procédés de fabrication (polissage, débitage ...). C'est sous cette forme que la silice crée le plus de dégâts sur la santé.

La silice cristalline est plus connue sous la forme du quartz (Sabourin, 2013). La cristobalite et la tridymite sont d'autres formes de la silice cristalline. Les poussières de silice ne sont pas toutes identiques en termes de taille. On dénombre différentes tailles de particule qu'on qualifie souvent de fractions de poussière. Selon la norme européenne EN 481, on distingue trois fractions de poussières à savoir : la fraction de poussière inhalable, la fraction thoracique et la fraction alvéolaire. La figure 1.2 illustre la différence entre ces trois fractions de poussières.

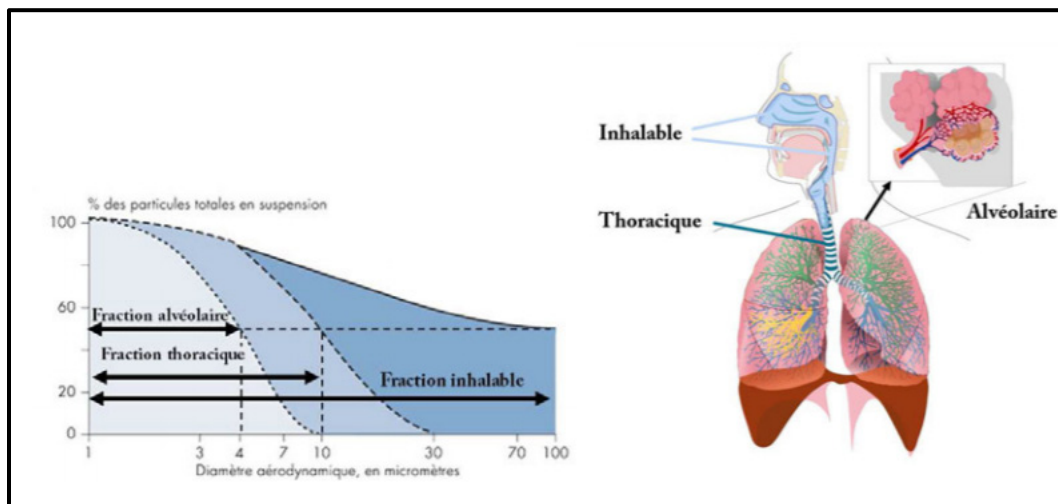


Figure 1.2 Pourcentage des fractions inhalables, thoracique et alvéolaire.

Source : Audard (2016), p.3.

- La fraction inhalable représente l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 100 µm dont la majorité des particules font être retenue par les fosses nasales.
- La fraction thoracique désigne les particules qui ont un diamètre inférieur à 10 µm. Cette fraction de poussière va se loger soit dans la trachée, les bronches ou des bronchioles.

- La fraction alvéolaire correspond aux particules ayant un diamètre inférieur à 4 μm . Ces particules vont se loger dans les alvéoles pulmonaires.

Pour la silice cristalline, c'est la fraction alvéolaire qui est la plus cruciale en raison de ses problèmes posés sur la santé de la personne qui l'ingère (guide de bonnes pratiques, s.d). Comme son nom l'indique, la poussière de silice cristalline alvéolaire va aller se loger profondément dans l'appareil respiratoire (alvéoles) de celui qui l'inhale. L'exposition prolongée à cette poussière conduit à des accumulations qui peuvent à long terme poser des effets néfastes et irréversibles sur la santé.

1.7.2 Silice cristalline alvéolaire et ses effets sur la santé

Depuis une décennie, la silice cristalline occupe le deuxième rang dans le classement des poussières plus nocives tout juste derrière l'amiante (Sabourin, 2013). L'exposition prolongée à cette poussière peut causer de sérieux problèmes sur la santé; raison pour laquelle plusieurs organismes internationaux tels que OSHA, NIOSH, ACGIH pour ne citer que ceux-là, ont établi une valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) à respecter aux entreprises dont les activités génèrent de la silice cristalline.

Tableau 1.1 Quelques valeurs d'exposition limite

Organismes	CNESST	NIOSH	OSHA	ACGIH
VLEP	100	50	50	25
Unités	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Selon une récente étude faite par l'Organisation Mondiale de la Santé (2019), les VLEP fournissent des valeurs de référence auxquels des mesures locales peuvent être comparées. Cependant, cette même étude ajoute que ces VLEP ne constituent pas des niveaux sécuritaires sous lesquels ne survient aucun effet dangereux sur la santé, car résultant d'extrapolation d'études menées sur des animaux durant un temps limité (court terme). C'est la raison pour laquelle il est recommandé de réduire au maximum l'exposition des travailleurs même lorsqu'elle respecte les normes prescrites. Sur le long terme, cette exposition a de nombreuses répercussions sur la santé des travailleurs. Reconnue comme cancérigène par le Centre

International de Recherche sur le Cancer (CIRC), la silice cristalline est également responsable de la maladie professionnelle connue sous le nom de silicose.

La silicose est une maladie pulmonaire imputée à une exposition prolongée aux fines particules de silice. La silicose est une menace reconnue pour la santé et qui a été historiquement associée à l'inhalation des poussières de silice alvéolaire (Fubini, 1998). Elle est l'une des plus anciennes maladies professionnelles connues au monde (Sabourin, 2013). Selon l'auteur, plus de 500000 cas de silicose ont été enregistrés chaque année en Chine entre 1991 et 1995 avec plus de 24000 décès. La CNESST quant à elle a recensé 157 cas de silicose entre 2004 et 2008 ce qui explique la mise en place d'une politique de tolérance zéro à la silice. Cette politique stipule que si des travailleurs sont exposés à une concentration de silice cristalline dépassant celle prévue par la réglementation, il faut arrêter la production immédiatement; ce qui pourrait empêcher l'entreprise d'atteindre ses objectifs de production afin de satisfaire la demande des clients.

La silicose est une maladie irréversible pouvant causer une infirmité ou la mort. La sévérité de la silicose peut varier dépendamment de la durée d'exposition. C'est ainsi que l'Institut National de la Recherche et de la Sécurité (INRS, 1997) dénombre trois types de silicoses à savoir :

- ❖ La silicose aiguë : elle est le résultat d'une grande exposition à une forte concentration de silice cristalline alvéolaire sur une courte période allant de quelques mois à 2 ans. Ses symptômes sont généralement l'essoufflement, la toux ou encore l'insuffisance respiratoire. Le décès survient généralement après quelques mois.
- ❖ La silicose accélérée : se développent après 5 à 10 années d'exposition à de fortes concentrations de silice cristalline. Elle se manifeste par un essoufflement extrême ou une perte de poids.
- ❖ La silicose chronique : c'est le résultat à une longue exposition (10 à 40 ans) à une faible concentration des particules de silice cristalline alvéolaire.

Les études sur l'exposition en milieu de travail indiquent que dans la majorité des cas, la limite d'exposition (VLEP) dépasse celle prévue par la réglementation (OMS, 2019). Lors d'une inspection faite par la CNESST dans le cadre du programme d'intervention régional (PIR) qui avait pour but de réduire l'exposition des travailleurs à la poussière de silice cristalline, plusieurs irrégularités ont été observées. Sur les 130 postes de travail inspectés, 60 dépassaient la norme prévue par la CNESST même après la mise en place des mesures correctives (Sabourin, 2013). Tout ceci devrait ardemment inciter les industriels à adopter des mesures adéquates pour réduire au maximum possible la concentration des particules de silice cristalline alvéolaire en milieu de travail.

Selon Fontaine (2009), les mesures préventives à adopter contre les effets néfastes sur la santé liée à la silice cristalline se résument en quatre grandes catégories.

- ❖ L'organisation du travail : planification des travaux, installation sanitaire, communication du risque. Cette mesure consiste à réduire autant que possible l'accès à la zone contaminée, à limiter le nombre de travailleurs exposés et amoindrir le temps d'exposition.
- ❖ Les moyens techniques : lubrification du procédé, ventilation locale, ventilation générale, ou encore substitution si possible.
- ❖ Les moyens de protection individuelle : protection respiratoire, protection oculaire, combinaison de travail.
- ❖ Les mesures d'hygiène : hygiène personnelle, nettoyage quotidien des locaux pour éviter l'accumulation des poussières de silice.

L'application de ces mesures va permettre à l'employeur de contribuer à réduire l'exposition des employés à la silice cristalline. Toutefois, ces mesures ne demeurent pas sans conséquence sur la capacité de production. Comme conséquences, on peut notamment citer :

- La qualité du produit : en permutant les postes, cela ne garantit pas une uniformité sur la qualité du produit. Donc augmente les risques de rebut ce qui peut conduire à un coût de production plus onéreux.

- Le flux de production : le fait de restreindre le nombre d'employés exposé, ou de vêtir le travailleur d'une combinaison très souvent inconfortable pour un quart de 8 heures, vont causer une diminution de la capacité de production.
- Le coût de total de production : la maintenance des équipements (moyens techniques) dus à leurs délabrements va accroître le coût total de production. Dans ce cas il s'agit ici de la maintenance des éléments que nous avons inclus dans le système de production pour protéger l'employé qui est exposé aux particules de silice cristalline durant sa tâche.

Afin de déterminer la mesure de prévention efficace à implémenter, nous allons nous référer à la hiérarchie des moyens de préventions illustrée à la figure 1.3.

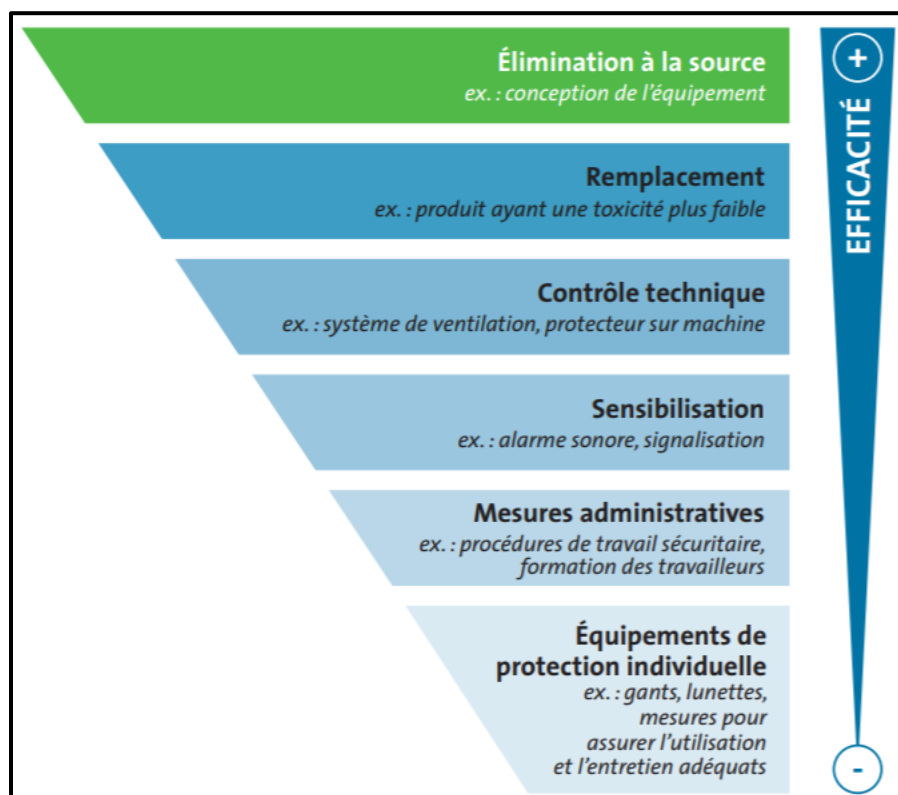


Figure 1.3 Hiérarchie des moyens de prévention
tirée de Bourque. G (2016)

Comme le montre la figure 1.3, la méthode de prévention la plus efficace est l'élimination du risque. Cela consiste à éliminer la source de danger du milieu de travail. Si cette dernière n'est pas possible, on peut envisager dans un premier temps, le remplacement de la matière dangereuse par une autre matière moins dangereuse; et dans un second temps, substituer des équipements qu'on juge dangereux ou le processus de travail jugé à risque. Comme troisième mesure efficace, on a le contrôle technique. Il permet de réduire la probabilité qu'un événement dangereux survienne. Cette mesure s'applique si l'élimination du risque et la substitution de la matière dangereuse s'avèrent impossibles. Ce dernier cas de figure est en lien avec le sujet traité dans ce mémoire. En effet, le produit semi-fini obtenu après transformation est fait à base du granit (demande du client) et ne peut être ni éliminé ni remplacé. Par conséquent, d'après la hiérarchie de prévention présentée à la figure 1.3, la mesure la plus appropriée pour le système manufacturier étudié serait le contrôle technique (moyens techniques). Dans un rapport de la CNESST (2012), il est recommandé d'effectuer la maintenance pour assurer l'efficacité de ses moyens de prévention, mais aussi d'améliorer leurs disponibilités.

1.8 Maintenance et production

La disponibilité des équipements de production et du personnel opérant impacte sur la performance d'un système manufacturier. En effet, la demande des clients ne pourrait être livrée à temps, en quantité et en qualité que si les ressources sont disponibles au bon moment. L'amélioration de la disponibilité des ressources passe par une bonne stratégie de maintenance. Selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR), la maintenance est l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise. Les termes maintenir ou rétablir renvoie à deux types de maintenances : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

La maintenance corrective consiste à intervenir sur un équipement lorsque celui-ci devient défaillant. Quand une entreprise n'applique que ce type de maintenance, elle s'expose à une sérieuse détérioration de ses équipements de production, et à des accidents de travail (Li et al., 2007). Cela montre l'intérêt d'inclure la maintenance préventive dans la stratégie de

production. La maintenance préventive s'effectue avant les pannes; elle a pour but de maintenir des équipements sous certaines conditions grâce à des inspections et à des prévisions systématiques (Wang, 2002). On distingue deux types de maintenance préventive : la maintenance de type bloc et la maintenance de type âge. La différence entre ces deux types de maintenance est que dans la première, les dates de maintenance sont connues d'avance par conséquent ne dépend ni de l'âge ni de l'état du système. Beaucoup de manufacturiers ont tendance à négliger l'impact que peut avoir le coût de maintenance sur le coût total de production. Les travaux de Ling et al. (2007) montrent que les coûts de maintenance des machines sont estimés à 15% du coût total de production pour certaines entreprises et près de 70% pour d'autres. D'où l'importance t'en tenir compte dans la modélisation d'un système manufacturier afin de proposer une politique qui minimise le coût total de production.

La maintenance préventive permet d'augmenter la disponibilité des machines donc réduit la fréquence des pannes ce qui contribue à minimiser le délai de livraison des produits finis chez les clients. Un problème se pose cependant, celui de prévoir un stock pour satisfaire la demande des clients durant l'activité de maintenance. Plusieurs chercheurs ont pu intégrer simultanément la production et la maintenance dans un même modèle pour pouvoir résoudre le problème. Nous pouvons citer entre autres Rivera-Gómez et al. (2018), Ouaret et al. (2015) ou encore Kouedeu et al. (2014). Le contrôle du flux optimal de production combinée à la maintenance préventive de type âge a été résolu dans Ouaret et al. (2015). Il en ressort que pour une machine produisant un type de produit, la politique à seuil critique est optimale (sous des hypothèses restrictives). Ouaret et al. (2015) ont pu modéliser le système grâce à la chaîne de Markov non homogène. Dans ce cas, la probabilité qu'un équipement tombe en panne augmente avec son âge. Donc il est important qu'à un certain âge, il faille disposer d'un stock capable de prévenir les pénuries que peuvent provoquer les activités de maintenance. Malheureusement une enquête faite par la CNESST (2016) montre que plusieurs accidents de travail surviennent pendant la maintenance. Pour remédier à ce problème, l'association canadienne de normalisation a établi la norme CSA Z460-20 qui stipule que pour les travaux de maintenance, de réparation, de déblocage, une procédure de cadenassage doit être appliqué.

1.9 Politique de cadenassage

La norme canadienne CSA Z460-20 définit le cadenassage comme une méthode qui consiste à installer un cadenas ou une étiquette sur un mécanisme d'isolement des sources d'énergie suivant une procédure établie; le mécanisme d'isolement ne peut être actionné si et seulement si le cadenas ou l'étiquette est retiré suivant un processus bien déterminé. Le cadenassage consiste à la mise en arrêt total d'une machine, d'un équipement, ou encore d'un système pour neutraliser toutes sources d'énergie (électrique, pneumatique, mécanique, hydraulique, etc.) qui l'alimente afin d'éviter toute restitution accidentelle. C'est l'une des stratégies mises en place pour protéger les employés.

Une étude de l'IRSST (2008) révèle que près d'un quart d'accident au travail survient lors des activités d'entretiens (maintenance préventive) et de réparations (maintenance correctrice). Ces accidents ont de graves répercussions sur la production, car elles représentent un temps moyen perdu de 24 jours par travailleur accidenté. Ces événements aléatoires et indésirables sont responsables de nombreux retards sur la production; ce qui affaiblit la compétitivité de l'entreprise. Il est donc important d'instaurer un moyen de protection visant à diminuer la fréquence des accidents.

Le cadenassage doit se faire suivant une procédure bien établie pour garantir son efficacité. Selon le CSTC (art. 2.20.6) la procédure à suivre est la suivante :

- L'identification de la machine;
- L'identification de la personne responsable du cadenassage;
- L'identification et la localisation de tout mécanisme de commande et de toute source d'énergie;
- Le type et la quantité d'outils requis pour le cadenassage;
- L'arrêt complet de la machine;
- L'élimination ou le contrôle de toute source d'énergie résiduelle;
- Le cadenassage des points de coupure des sources de l'énergie;
- La vérification du cadenassage;

- Le décadennassage et la remise en marche.

1.10 Synthèse de la revue de littérature

Le tableau 1.2 donne une synthèse des documents consultés pour la revue de littérature. Nous avons regroupé ces articles en cinq catégories suivant le domaine étudié. Ce tableau montre que certaines études à l'exemple de Sabourin (2013), traitent le problème de santé et sécurité au travail sans tenir compte de la production. Par ailleurs, Szymendera (2016) a montré l'importance de réduire la limite d'exposition sans toutefois tenir compte de l'impact que cela peut avoir sur la production. De même, les auteurs qui ont travaillé sur la gestion de la production n'ont pas tenu compte du facteur humain. Wang (2002) a établi des stratégies de maintenance non conjointe à la production et à la santé et sécurité au travail. Cette revue de littérature nous a permis d'évaluer les forces et les faiblesses des méthodes proposées. La contribution de cette recherche sera d'intégrer tous ces aspects afin de proposer une stratégie de planification de la production dans un contexte stochastique.

Tableau 1.2 Synthèse de la revue de littérature

Auteurs	Domaines étudiés					
	Production	Dynamique des machines	Dégradations des machines	Stratégie de maintenance	Santé et sécurité au travail	
					Cadenassage	Émission des particules
Kimemia et Gershwin (1983)	✓	✓				
Akella et Kumar (1986)	✓	✓				
Dehayem (2009)	✓	✓	✓	✓		

Tableau 1.2 (suite)

Domaines étudiés						
Auteurs	Production	Dynamique des machines	Dégradations des machines	Stratégie de maintenance	Santé et sécurité au travail	
					Cadenassage	Émission des particules
Sabourin (2013)						✓
Rivera-Gómez et al. (2018)	✓	✓	✓	✓		
Emami-Merghani et al. (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	
OSHA et NIOSH (2015)						✓
Osler et Suri (1980)	✓	✓		✓		
Fubini (1998)						✓
Kouedeu et al. (2014)	✓	✓	✓	✓		
Szymendera (2016)						✓
Ouaret et al. (2015)	✓	✓	✓	✓		
Notre étude	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parcouru les notions de base qui permettent de comprendre ce que c'est qu'un système manufacturier. Environnement très complexe dont le bon fonctionnement dépend de plusieurs facteurs comme la disponibilité des ressources (machine, humaine...). Afin d'optimiser le coût de production, plusieurs chercheurs se sont lancés dans la modélisation en intégrant plusieurs notions dans le but de se rapprocher de la réalité. Très peu de travaux abordent l'aspect de la sécurité au travail alors que l'employé est un élément incontournable de la chaîne de production. Les coûts générés par les problèmes de santé et sécurité au travail sont trop dispendieux pour être négligés. Partant du fait que les risques de santé et sécurité au travail varient d'un secteur à un autre, il est donc important de spécifier le domaine d'activité du système étudié. Comme nous l'avons évoqué plus haut. Pour ce qui nous concerne, le système sur lequel porte notre recherche est spécialisé dans la transformation du granit. Afin d'apporter plus de clarté sur la chaîne de production considérée, nous allons décrire cette chaîne dans le prochain chapitre pour mieux situer le lecteur. Par la suite, nous allons dégager une problématique et élaborer la méthodologie à suivre tout au long de ce mémoire.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

2.1 Introduction

Le granit est une roche abondante sur le globe terrestre qui possède une durabilité unique, une résistance aux égratignures, à la chaleur et aux abrasives (Saidi, 2018). Ceci explique sa très grande utilisation pour la construction des routes, des pierres tombales, des comptoirs de cuisine, etc... . Selon plusieurs études réalisées sur le granit, la plupart des chercheurs soulèvent le caractère nocif du granit lorsqu'on l'usine. En effet, pendant sa transformation, des particules de silices sont émises dans l'air de travail exposant ainsi le travailleur à la maladie professionnelle connue sous le nom de silicose (Saidi et al., 2019). À cet effet, plusieurs organismes œuvrant dans le domaine de la santé et la sécurité au travail ont établi une limite d'exposition pour protéger l'employé. Dans ce chapitre nous allons tout d'abord décrire la chaîne de production considérée dans cette étude, ensuite nous allons dégager la problématique du sujet et enfin émettre une méthode à suivre pour parvenir à nos fins.

2.2 Transformation du granit

Une fois les blocs de granit extraits des carrières, ils sont tranchés en plaques et transportés en usinage pour transformation. La première station de transformation consiste à faire un polissage de surface sur les blocs de granit provenant du lieu d'extraction (voir figure 2.1). À cette étape, la polisseuse utilisée est une machine à commande numérique dont le diamètre de l'outil est connu. Le type de polissage appliqué est un polissage rotatif régulier. En nous basant sur la thèse de Saidi (2018), nous avons pris pour exemple que l'usinage se fait à l'aide d'un outil de diamètre 152mm, avec une vitesse de rotation de 1000 tr/min, et une vitesse d'avance égale à 25mm/s. De façon généralisée, le processus de polissage standard se fait en 7 passes. Les grandeurs des abrasifs utilisés varient d'une passe à une autre (Saidi, 2018). À la sortie de cette unité de transformation, on dispose d'un bloc de granit poli qu'on va acheminer vers une

autre usine qui va s'occuper de la mise en forme du comptoir de granit. Rendu à cette étape, ce bloc de granit va subir un ensemble de procédés tels que : le perçage, le sciage, polissage des bords et finition manuelle. Chaque activité se fait suivant un équipement bien spécifique. À la fin du procédé, le produit fini obtenu est un comptoir de cuisine (voir figure 2.2). Ce comptoir passe par une minutieuse inspection afin de garantir la qualité du produit. Une fois le produit approuvé, le comptoir de cuisine est prêt à être transbahuté chez le client.

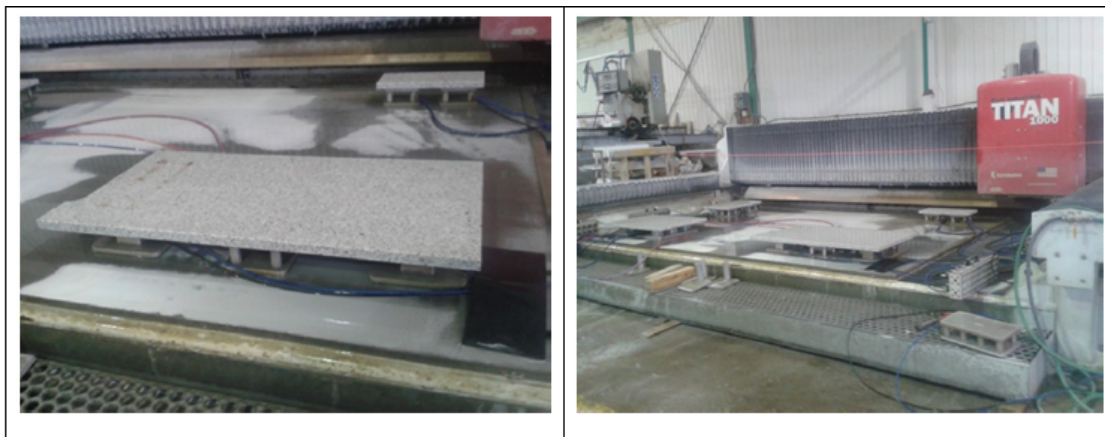


Figure 2.1 Polissage des blocs de granit à l'aide d'une machine à commande numérique Titan 1000 tiré de Migan (2015)



Figure 2.2 Comptoir de cuisine en granit tiré de Migan (2015)

Partant de l'extraction jusqu'à l'installation du produit chez le client, les opérateurs sont durant tout le processus, exposé aux poussières de silice cristalline produite au cours de la transformation du granit et qui sont malheureusement invisibles à l'œil nu. Inhaler, ces particules respirables viendront se loger profondément dans les poumons (alvéoles) causant principalement une maladie appelée silicose (OSHA et NIOSH,2015). Elle est incurable et provoque des troubles respiratoires, de l'essoufflement et peut entraîner la mort (CNESST,2012). La silicose est le risque majeur encouru par les travailleurs du domaine. C'est pour cette raison que plusieurs études sont faites ces dernières années afin de trouver des solutions pour protéger les employés. Selon une étude réalisée par la CNESST (2012), on compte plus de 200 établissements au Québec qui exercent dans la transformation du granit. Selon cette commission, certaines activités sont particulièrement visées pour être des principaux vecteurs de cette maladie. Nous pouvons notamment citer :

- Le polissage;
- La découpe;
- L'entretien de l'atelier.

Saidi et al. (2019) ont pu comparer dans leur étude, le nombre de particules émises durant le polissage d'ébauche et le polissage de finition. La comparaison faite ici repose sur les particules de taille micrométrique. L'expérience dans cette étude s'effectuait sur un granit noir et sur un granit blanc. Les résultats obtenus étaient identiques pour les deux types de granite : le polissage d'ébauche génère plus de particules que le polissage de finition.

L'exposition à la silice cristalline est le principal risque encouru par les opérateurs du secteur de la transformation du granit. Au vu des dégâts causés par ces poussières, l'organisme international OSHA a dû réviser la limite d'exposition professionnelle passant ainsi de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Plusieurs études faites par certains organismes ont jusqu'ici proposé des solutions à mettre en place pour réduire à la source la quantité des particules émises (CNESST,2012). Parmi ces solutions, celle qui est plus efficace et recommandée consiste à combiner une unité de lubrification et une unité de ventilation locale. Le tableau 2.1 est issu d'une étude faite par Jared et al. (2014) sur la fabrication des comptoirs de cuisine avec comme

matière première le granit artificiel. Ce type de granit présente un taux de silice beaucoup plus élevé (supérieure à 93%) que le granit naturel (10-45 % de silice), OSHA et NIOSH (2015). Jared et al. (2014) avaient pour objectif de trouver la meilleure stratégie qui réduirait au maximum la concentration respirable des particules de silice. À partir du tableau 2.1, nous pouvons bien voir que la combinaison d'un système de lubrification et d'un système de ventilation local est bien plus efficace que les autres méthodes. Malheureusement, l'étude se limitait à la découpe du granit. Johnson et al. (2017), ont dans le même sens évalué l'efficacité de combiner les mesures de réduction durant la fabrication des comptoirs de granit. L'étude se faisait sur les activités de polissage et de découpage. Les résultats ont montré que la combinaison d'une unité de lubrification et d'une unité de ventilation locale était plus efficace que lorsqu'elles sont utilisées individuellement. L'unité de lubrification et l'unité de ventilation locale représentent des mesures de prévention (contrôle technique) abordée au chapitre 1 (voir figure 1.3). Au vu de toutes les conclusions tirées des études de Jared et al. (2014), Johnson et al. (2017) nous avons décidé de combiner ces deux unités de protection afin de réduire les particules de silice émises pendant le polissage des blocs de granit.

Tableau 2.1 Concentration des particules respirables en mg/m^3

adapté de Jared et al. (2014), p.124

Nombre d'essais	Concentration (mg/m^3) des particules en présence du système de lubrification	Concentration (mg/m^3) des particules en présence du système de lubrification combiné au rideau d'eau	Concentration (mg/m^3) des particules en présence du système de lubrification combiné au système de ventilation localisé	Concentration (mg/m^3) des particules avec usinage à sec
1	7.511	5.116	0.689	69.60
2	5.025	1.814	0.321	
3	3.654	5.965	0.201	
4	3.546	2.357	1.204	
Moyenne	4.934	3.813	0.604	

Le système manufacturier considéré dans cette étude sera donc constitué des éléments suivants :

- Une machine qui est destinée à faire le polissage (limitation de la zone de travail voir figure 2.3). Notons ici que nous avons deux types de polissage à savoir le polissant plan et le polissage de bord. L'unité de production modélisée dans notre cas effectue un polissage plan. Cette activité de polissage est la tâche majeure dans le processus de fabrication de comptoir de granit;
- Une unité de lubrification qui limite la propagation des particules dans l'air respirable;
- Une unité de captation à la source (ventilation locale) qui viendra capter les particules dispersées par l'outil;
- L'humain qui représente ici l'employé.

La structure générale de la chaîne de transformation du granit en comptoir est présentée à la figure suivante.

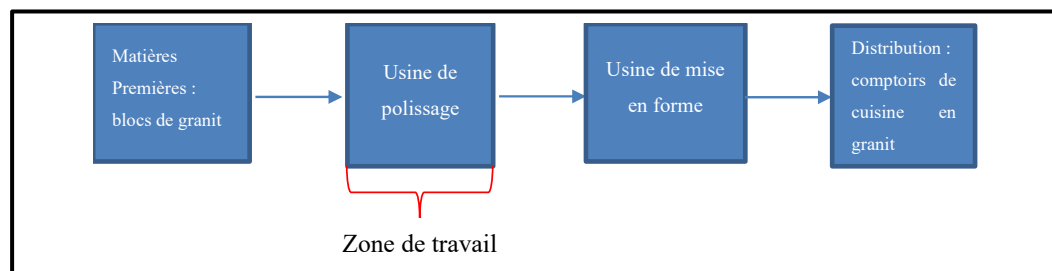


Figure 2.3 Processus de fabrication du comptoir de cuisine en granit

En amont de la zone de travail, on a des blocs de granit à l'état brut et en aval, nous avons un bloc de granit poli prêt à être acheminé vers l'usine de mise en forme du comptoir proprement dit. Dans la suite du travail l'emploi du terme unité de transformation renvoie à la machine qui poli le granit. L'expression produits finis sera utilisée pour faire allusion au bloc de granit poli obtenu après transformation.

2.3 Problématique

De nos jours, un manufacturier peut produire et distribuer ses produits à des clients localisés dans divers sites à travers l'environnement considéré. Cette situation a poussé les entreprises à être plus compétitives et à concevoir des produits de qualité, à moindre coût et dans les temps. C'est dans ce sens que plusieurs manufacturiers ont vu l'importance de planifier la production en prenant en compte la flexibilité de l'environnement manufacturier dans le but d'optimiser leur production afin de faire face à une concurrence féroce. Plusieurs études ont déjà été faites sur la planification de la production, mais très peu d'entre elles intègrent l'aspect santé et sécurité des travailleurs du point de vue exposition aux particules de silice. Lors de la planification, certains manufacturiers priorisent l'aspect gain sur l'aspect santé et sécurité au travail ; ce qui n'est pas une bonne pratique. Le rapport de l'Organisation Internationale du Travail OIT (2019) montre que 1000 personnes décèdent chaque jour par suite des accidents de travail tandis que 6000 personnes meurent chaque jour des maladies professionnelles telles que la silicose.

La silicose est une maladie conséquente à l'exposition aux poussières de silice cristalline qui résultent de la transformation du granit. De 2004 à 2008, la CNESST a recensé 157 cas de silicozes ce qui a poussé le gouvernement à mettre en place une réglementation limitant l'exposition aux particules de silice cristalline à $0,1\text{mg}/\text{m}^3$ pour une période de 8 heures par jour en fonction d'une semaine de travail de 40 heures. En 2016, l'organisme OSHA, dans une étude s'est vu réviser cette limite à $0,05\text{mg}/\text{m}^3$ (voir tableau 1.1 pour d'autres valeurs limites) permettant ainsi de sauver 642 vies humaines chaque année et générer un bénéfice annuel de 7 milliards de dollars (Szymendera, 2016). Cette mesure demande aux producteurs d'investir plus de moyens dans la réduction du risque d'exposition aux poussières de silice. La limite d'exposition est un paramètre mis en place pour protéger le travailleur. Cette limite représente donc une contrainte que les gestionnaires de production doivent prendre en compte lorsqu'ils planifient leurs productions sans oublier le fait que les équipements de productions sont sujets à des pannes et des réparations. Plusieurs modèles de planification intégrant la production et les activités de maintenance ont déjà été publiés par d'autres chercheurs, mais aucun de ces

modèles n'intègre l'aspect sécurité des travailleurs du point de vue valeur limite d'exposition aux particules. Il est donc important de développer une stratégie optimale conjointe de production prenant en compte la contrainte d'exposition des employés aux particules de silices. Notre recherche viendra donc apporter solution en proposant un modèle dynamique de planification de la production intégrant les activités de maintenance et la contrainte de limite d'exposition aux particules de silice.

2.4 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette étude est de déterminer une stratégie conjointe de production et de maintenance qui tient compte des aspects santé et sécurité au travail. L'environnement manufacturier sur lequel nous travaillons opère dans le secteur de la transformation du granit. L'optimisation d'un tel système passe par l'amélioration de la disponibilité des équipements (maintenance) et de l'humain (sécurité au travail). Cette amélioration permettra de minimiser le coût total de production qui dépend des paramètres tels que : le coût de stockage, le coût de rupture de stock et le coût de maintenance.

Pour parvenir au but principal de ce travail, nous avons considéré les sous-objectifs suivants :

- En se basant sur la littérature, mettre en place des méthodes de réduction des particules pour limiter l'exposition des travailleurs.
- Proposer une stratégie de production qui vise à optimiser le système manufacturier sujet à des pannes et réparations aléatoires.
- Intégrer la dégradation des équipements de production et la limite de concentration des particules de silice prévue par la réglementation dans la modélisation du système manufacturier.
- Considérer la norme canadienne CSA Z460-20 en matière de maintenance sur une machine, pour ainsi intégrer dans la modélisation le concept de cadenassage.

2.5 Méthodologie de la recherche

Elle s'échelonne sur 3 étapes :

1. Formulation des modèles mathématiques qui minimisent le coût total de production du système manufacturier qui tient compte de la dégradation, de la limite d'exposition aux particules de silice et du cadencement des équipements. Ces modèles permettent de développer les conditions d'optimums à l'aide des équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman.
2. Résolution des équations d'HJB à partir de l'approche de Kushner et Dupuis (1992) afin de déterminer la loi de commande optimale qui minimise le coût total encouru.
3. Simulation et analyse des résultats obtenus. Il s'agit d'implémenter les algorithmes développés à l'étape précédente dans le logiciel Matlab. Afin de vérifier la ténacité des modèles développés, une analyse de sensibilité sera faite pour approuver la politique optimale obtenue.

La synthèse de cette méthodologie s'illustre à la figure 2.4.

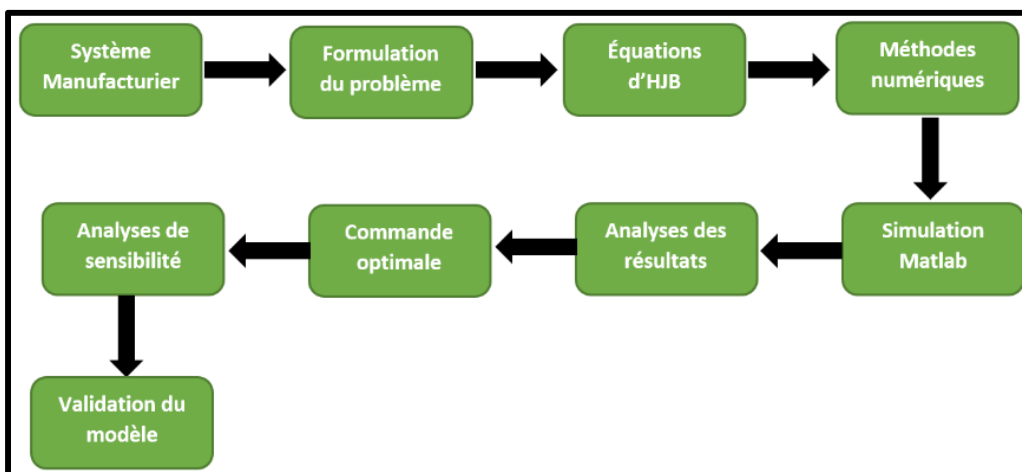


Figure 2.4 Méthodologie de la recherche

2.6 Contribution et structure du mémoire

Une partie du travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet d'une publication d'article de conférence dont l'extrait est présenté à l'annexe IV. Les résultats obtenus dans ce mémoire présentent une stratégie conjointe de production et de maintenance qui tient compte de l'aspect santé et sécurité des employés exerçants dans une usine de transformation du granit. Cette stratégie optimise le coût total de production.

Ce mémoire est constitué de 5 chapitres où les deux premiers chapitres sont consacrés à la revue de la littérature, problématique et méthodologie. Les trois derniers constituent ici le cœur du travail.

Le chapitre 3 présente un modèle d'optimisation d'un système manufacturier soumis à des pannes de réparations aléatoires. Le système est constitué d'une unité de production et de deux unités de protection produisant un seul type de pièce. La modélisation du système a été faite par la chaîne de Markov homogène. Le taux de production est la seule variable de décision dans cette partie du travail. Pour nous rapprocher de la réalité industrielle, nous avons dans la suite du travail intégré le facteur dégradation des équipements de production.

Le chapitre 4 a pour objectif d'intégrer dans le modèle développé précédemment la limite d'exposition aux particules de silice et la maintenance préventive. Le système de production dans cette section est identique à celui du chapitre précédent. Le taux de panne du système dépend de l'âge de l'unité de production qui est fonction du nombre de pièces produit. La modélisation dans ce chapitre s'est faite en utilisant la chaîne de Markov non homogène. Les variables de décision sont le taux de production et le taux de maintenance préventive. Une partie des résultats de ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence sous la référence :

Kevin Gildas Dongmo Tambah, Jean Pierre Kenne and Victor Songmene. 2020.

Optimization of production strategies integrating occupational health and safety aspects:

case of granite processing. 66. Spring Congress of the Society for Work Science 16.03. - 18.03.2020 at the TU Berlin.

Dans le dernier chapitre, nous avons intégré le cadenassage pour assurer la sécurité du personnel de la maintenance. Ce cadenassage a été considéré comme une activité non conjointe à la maintenance. Le taux de panne est fonction du nombre de pièces produit. Les variables de décision sont le taux de production, le taux d'envoi de l'unité de ventilation à la maintenance préventive et le taux de cadenassage.

2.7 Hypothèses de modélisation

Pour mener à bien cette recherche, nous allons considérer les hypothèses énumérées ci-dessous. Les hypothèses faites sur la transformation du granit sont basées sur des études réalisées par Migan (2015), Bhaloul et al (2019), Saidi et al (2020) et Songmene et al (2018). Ces études portaient sur des pratiques industrielles. Pour ce qui est de la modélisation du système manufacturier, les hypothèses prises en considération dans ce travail sont basées sur la thèse de Kouedeu (2014). Dans cette étude, la modélisation faite par l'auteur s'appliquait à un cas réel.

- Le taux de demande des clients est connu et constant ;
- Les coûts de stockage, de pénurie et de maintenance des machines sont constants et connus ;
- Le taux maximal de production de l'unité de production est connu ;
- Le temps moyen de bon fonctionnement et le temps moyen de réparation sont connus et constants (unité de production, unité de ventilation locale et l'unité de lubrification) ;
- Le système de production est sujet à des pannes et réparations aléatoires ;
- Le système manufacturier est dans un espace clos ;
- Les particules de silice émises sont de taille micrométrique ;
- Les paramètres de coupe limitant la quantité des particules émises sont fixes et connus ;
- La détérioration de l'âge du système de production est fonction du nombre de pièces produites ;

- La concentration des particules de silice dans l'air de travail est fonction de l'âge des équipements de protection ;
- La présence d'une unité de ventilation locale et d'une unité de lubrification permet d'avoir des concentrations en dessous de celle prévue par la réglementation ;
- Le granit usiné est un granit naturel constitué de 45% de quartz ;
- La machine polisseuse est constitué d'un seul outil où on viendra apposer l'abrasif ;
- La machine de production n'a pas d'enceinte protectrice.

2.8 Conclusion

Comme tout travail de recherche, énoncer le problème, mettre en place une méthodologie à suivre et déterminer les limites du travail sont ici des axes importants pour mener à bien l'étude. C'est ainsi qu'après avoir décrit le système manufacturier sur lequel nous allons travailler, nous avons soulevé une problématique et structurer une méthode pour résoudre le problème. Afin de se rapprocher de la réalité industrielle, certains d'entre eux ont intégré des aspects tels que : l'erreur humaine, la maintenance, ou encore les rebuts de production. Malheureusement, il n'y a presque pas de travaux intégrant dans un modèle la planification de la production et le contrôle de particules émit durant la production. C'est d'ailleurs la principale contribution de ce travail.

Pour atteindre nos objectifs, nous allons pour un début, développer dans le chapitre suivant un modèle dynamique d'une unité de transformation du granit sujet à des pannes et réparations aléatoires.

CHAPITRE 3

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE UNITÉ DE TRANSFORMATION DU GRANIT SUJETTE À DES PANNES ET RÉPARATIONS ALÉATOIRES

3.1 Introduction

Ce chapitre présente un problème de commande optimale d'un système de production manufacturière constitué d'une machine produisant un seul type de pièces. Dans l'optique de protéger les employés à l'exposition aux poussières de silice cristalline, nous avons joint deux unités de protection qui devraient fonctionner simultanément avec la machine de production. Le système de production est soumis à des pannes et réparations aléatoires. Le niveau de stock des produits finis ainsi que les états du système constituent ici les variables d'états tandis que le taux de production de la machine est une variable de décision qu'on devra contrôler pour minimiser le coût de production. Le but de ce chapitre est de proposer une politique de commande optimale en tenant compte des deux unités de protection (captation et lubrification). Pour cela, nous allons commencer par modéliser notre système en considérant la dynamique de chaque constituant du système en utilisant la chaîne de Markov homogène à états discrets. Par la suite, nous allons écrire les équations d'HJB puis passer à leur résolution grâce à une approche numérique. Pour finir, nous allons faire une analyse de sensibilité pour confirmer la robustesse du modèle développé.

3.2 Formulation du problème

Le système manufacturier étudié dans cette partie est constitué d'une machine notée M et de deux unités de protection ayant pour rôle de limiter la concentration des particules de silice. Il s'agit d'une unité de lubrification L et une unité de captation à la source C. Ce système est soumis à des pannes et réparations aléatoires (voir figure 3.1).

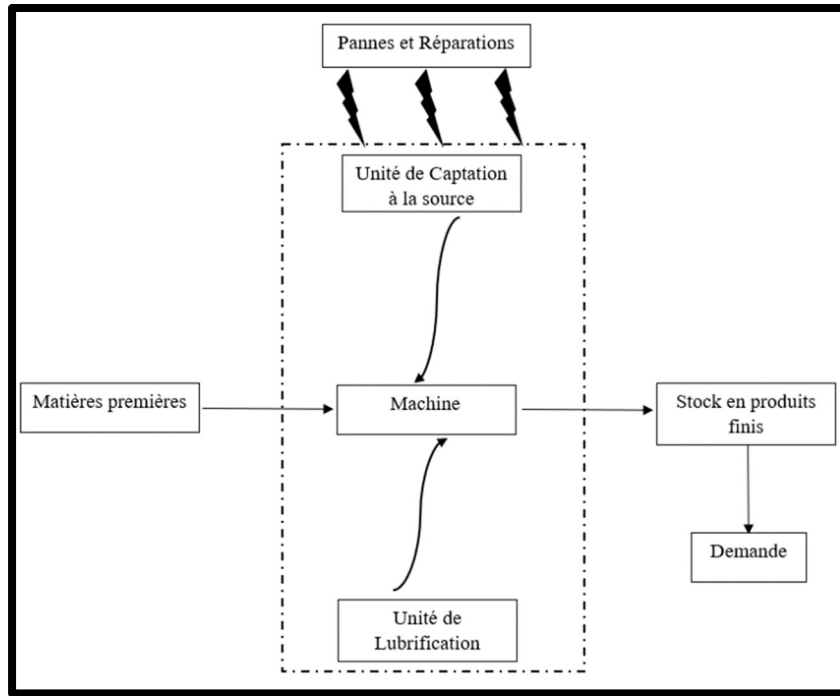


Figure 3.1 Structure du système de production sujet à des pannes et réparations aléatoires

Le mode de fonctionnement du système se décrit de la manière suivante :

- Soit $\varepsilon_M(t)$ la dynamique de la machine M définie par $\varepsilon_M(t) \in \{0,1\}$ avec $\varepsilon_M(t) = 0$ si la machine est en panne et $\varepsilon_M(t) = 1$ si la machine est opérationnelle.
- Soit $\varepsilon_L(t)$ la dynamique de l'unité de lubrification L définie par $\varepsilon_L(t) \in \{0,1\}$ avec $\varepsilon_L(t) = 0$ si elle est en réparation et $\varepsilon_L(t) = 1$ si elle est en opération.
- Soit $\varepsilon_C(t)$ la dynamique de l'unité de captation de poussière à la source décrite par $\varepsilon_C(t) \in \{0,1\}$ avec $\varepsilon_C(t) = 0$ si l'unité de captation est en panne et $\varepsilon_C(t) = 1$ si elle est en opération.

La dynamique du système est décrite par un processus stochastique $(\xi(t), t \geq 0)$ tel que $\xi(t) = (\varepsilon_M(t), \varepsilon_L(t), \varepsilon_C(t))$.

Tableau 3.1 Dynamique du système

$\varepsilon_M(t)$	1	1	1	1	0	0	0	0
$\varepsilon_L(t)$	1	0	0	1	1	0	1	0
$\varepsilon_C(t)$	1	1	0	0	1	1	0	0
$\varepsilon(t)$	1	2	3	4	5	6	7	8

À partir de ce tableau, on remarque que le système étudié est constitué de 8 modes donc $\xi(t) \in B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$.

Ces différents modes du système sont représentés dans le diagramme de transition suivant :

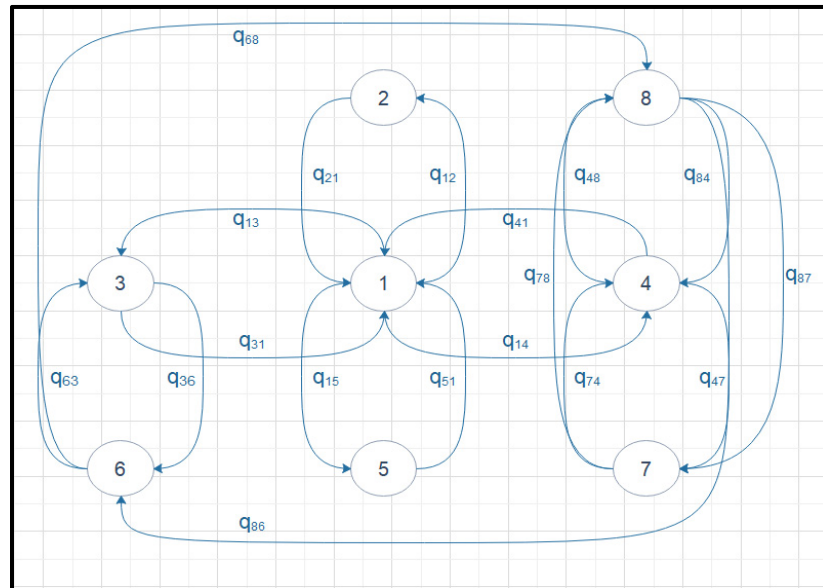


Figure 3.2 Diagramme de transition du système de production
sujet à des pannes et réparations aléatoires

Le tableau suivant décrit chaque mode du système.

Tableau 3.2 Description des modes des systèmes

Modes	État de la machine	Description
1	(1,1,1)	Le système est en production c'est-à-dire que la machine et les deux unités de protection (lubrification et captation) sont opérationnelles.
2	(1,0,1)	La machine M et l'unité de captation sont opérationnelles tandis que l'unité de lubrification est en réparation.
3	(1,0,0)	Seule la machine M dans ce mode est opérationnelle.
4	(1,1,0)	L'unité de lubrification et la machine sont fonctionnelles alors que l'unité de captation est en panne.
5	(0,1,1)	La machine M est en réparation et les deux autres unités sont opérationnelles.
6	(0,0,1)	Machine et la lubrification sont non fonctionnelles tandis que la captation est opérationnelle.
7	(0,1,0)	Machine M et captation sont en pannes.
8	(0,0,0)	Tous les éléments du système de production sont non fonctionnels.

Le mode 1 est le seul mode de production du système manufacturier. Rappelons que les recommandations faites par la CNESST et OSHA étaient de combiner deux unités de protection (ventilation locale et lubrification). Ces derniers doivent fonctionner simultanément avec la machine de production pour réduire au plus bas possible la concentration de silice cristalline. Ceci justifie pourquoi le seul mode de production du système est le mode 1.

3.3 Modélisation

Pour modéliser le système, on se doit de suivre une méthodologie bien déterminée. Cette démarche consiste à déterminer dans un premier temps la matrice du taux de transition. Dans un second temps, nous allons définir le domaine d'admissibilité et la condition de faisabilité. Nous allons terminer cette partie avec la dynamique de l'inventaire et les différents coûts de ce problème d'optimisation.

3.3.1 Matrice des taux de transition

En se basant sur le diagramme de transition défini plus haut (figure 3.2), soit Q la matrice des taux de transitions du processus représentant la dynamique du système de production.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & 0 & 0 & 0 \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & 0 & 0 & q_{26} & 0 & 0 \\ 0 & q_{32} & q_{33} & q_{34} & 0 & 0 & 0 & q_{38} \\ q_{41} & 0 & q_{43} & q_{44} & 0 & 0 & q_{47} & 0 \\ q_{51} & 0 & 0 & 0 & q_{55} & q_{56} & q_{57} & 0 \\ 0 & q_{62} & 0 & 0 & q_{65} & q_{66} & 0 & q_{68} \\ 0 & 0 & 0 & q_{74} & q_{75} & 0 & q_{77} & q_{78} \\ 0 & 0 & q_{83} & 0 & 0 & q_{86} & q_{87} & q_{88} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Étant donné que tous les états du système sont visités, la matrice de transition est irréductible et par conséquent, elle est dite ergodique (Ross, 2003). Les valeurs q_{ij} de la matrice sont déterminées à partir du tableau 3.3.

L'état du système est modélisé par une chaîne de Markov à temps continu et à état discret défini par la matrice des taux de transition Q décrite par l'équation (3.1). La probabilité de transition d'un état α à un état β est donnée par :

$$P[\xi(t + \delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec :

$$q_{\alpha\beta} \geq 0, \quad q_{\alpha\alpha} = - \sum q_{\alpha\beta}; \quad \alpha, \beta \in B = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}; \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0$$

3.3.2 Domaine des commandes admissibles

Soit $u(\alpha, x, t)$ le taux de production du système au mode α avec un stock x à un instant t .

L'ensemble des commandes admissibles $\Gamma(\alpha)$ est défini par l'expression suivante :

$$\Gamma(\alpha) = \{u(x, \alpha, t) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq u(.) \leq u_{max}\} \text{ avec } \alpha = (1,2,3,4,5,6,7,8) \quad (3.3)$$

3.3.3 Dynamique de l'inventaire

Soit $u(x, \alpha, t) \in \mathbb{R}$ le taux de production, $x(t)$ le stock des produits finis et d le taux de demande des clients. La dynamique du stock d'inventaires est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dx}{dt} = u(x, \alpha, t) - d \text{ avec } x(t = 0) = x_0 \text{ avec } x_0 \in \mathbb{R} \quad (3.4)$$

x_0 désigne le stock initial de l'inventaire.

L'équation (3.4) traduit l'évolution du stock dans le temps en fonction de $u(x, \alpha, t)$ et du taux de demande d . Cette équation permet d'évaluer le niveau d'inventaire en fonction du temps afin d'ajuster les paramètres du système pour éviter une pénurie de produits.

3.3.4 Conditions de faisabilité du système et probabilités limites

Soit π_i la probabilité limite du système de se trouver à l'état i avec $i \in B = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$.

La corrélation entre la matrice du taux de transition et la matrice des probabilités limites est donnée par:

$$\begin{cases} \pi * Q = 0 \\ \sum_{i=1}^8 \pi_i = 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$\pi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$ représente le vecteur de probabilités limites.

L'équation (3.5) devient :

$$\begin{cases} [\pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \pi_5 & \pi_6 & \pi_7 & \pi_8] \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & q_{14} & q_{15} & 0 & 0 & 0 \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & 0 & 0 & q_{26} & 0 & 0 \\ 0 & q_{32} & q_{33} & q_{34} & 0 & 0 & 0 & q_{38} \\ q_{41} & 0 & q_{43} & q_{44} & 0 & 0 & q_{47} & 0 \\ q_{51} & 0 & 0 & 0 & q_{55} & q_{56} & q_{57} & 0 \\ 0 & q_{62} & 0 & 0 & q_{65} & q_{66} & 0 & q_{68} \\ 0 & 0 & 0 & q_{74} & q_{75} & 0 & q_{77} & q_{78} \\ 0 & 0 & q_{83} & 0 & 0 & q_{86} & q_{87} & q_{88} \end{bmatrix} = [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_7 + \pi_8 = 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

π_i désigne la probabilité limite que le système soit au mode i .

La résolution de ce système d'équations au vu la dimension de la matrice et le nombre d'inconnus, a été faite grâce au programme Matlab. Ceci nous a permis de déterminer la probabilité limite de chaque mode du système. Une fois ces probabilités déterminées, nous avons évalué la faisabilité du système étudié. Pour cela, les données utilisées figurent à la section 3.6 de ce chapitre.

La condition de faisabilité a pour rôle d'assurer que la production du système peut toujours combler la demande en produits finis sur un horizon infini. Cette condition de faisabilité est définie par la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^8 (\pi_i * U_i^{max}) \geq d \quad (3.7)$$

Avec π_i la probabilité que le système soit mode i ; d le taux de demande des produits finis et U_i^{max} le taux de production maximal au mode i . Dans notre cas, le système ne produit qu'au mode 1 donc l'équation (3.7) s'écrit de la manière suivante :

$$\pi_1 * U_1^{max} \geq d \quad (3.8)$$

La relation (3.8) n'est vraie que dans le cas où l'approvisionnement en matière première est infini. Par conséquent, la matière première est toujours disponible pour le système manufacturier.

3.3.5 Coût instantané et coût total

La fonction coût est d'une importance capitale pour un problème d'optimisation. Elle permet d'évaluer les coûts associés à la production des produits finis; ce qui permettra de minimiser les dépenses afin d'accroître les bénéfices de l'entreprise.

3.3.5.1 Coût instantané

Dans cette partie, en tenant compte des paramètres de l'étude, le coût instantané est une fonction qui dépend du coût de mise en stock de l'excédent de production et du coût de pénurie entraîné par le manque de produits finis. Soit $g(x, u, \alpha)$ la fonction qui définit le coût instantané. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$g(x, u, \alpha) = c^+x^+ + c^-x^- \quad (3.9)$$

avec :

c^+ le coût de mise en inventaire par unité de pièce et par unité de temps.

c^- le coût attribué à la rupture de stock par unité de pièce manquante et par unité de temps.

$$x^+ = \max\{0, x(t)\}$$

$$x^- = \max\{-x(t), 0\}$$

3.3.5.2 Coût total

Pour minimiser le coût de total de production, il suffira de contrôler le taux production afin de réduire l'effet du coût de mise en inventaire des produits et le coût de rupture de stock sur le coût de production. Ce coût est donné par l'équation (3.10).

$$J(x, u, \alpha) = E \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\rho t} g(x, u, \alpha) dt \mid x(0) = x, \xi(0) = \alpha \right\} \quad \forall u(\bullet) \in \Gamma(\alpha) \quad (3.10)$$

Où :

$E[B|A]$ est l'espérance mathématique de B sachant A;

ρ est le taux d'actualisation qui tient compte de la valeur de l'argent dans le temps

3.4 Conditions d'optimum

La résolution du problème consiste à trouver la commande optimale qui va minimiser le coût total actualisé. Ce dernier est défini par une fonction coût (équation 3.10) et dépend d'une variable de contrôle appelé taux de production $u(x, \alpha, t)$ dont les valeurs admissibles sont définies par l'équation (3.3). Soit $v(x, \alpha)$ la fonction qui minimise le coût total, on a :

$$v(x, \alpha) = \inf_{u(\cdot) \in \Gamma(\alpha)} J(x, u, \alpha) \quad \forall \alpha \in B \quad (3.11)$$

La fonction valeur définie à l'équation (3.11) est solution de l'équation aux dérivées partielles de premier ordre donnée par l'équation (3.12) appelée équation d'Hamilton Jacobi-Bellman (HJB) (Yotat, 2017). Les détails concernant l'équation d'HJB sont mentionnés dans Gershwin (1994). Cette équation d'HJB décrit la programmation dynamique à temps continu établi par Richard Bellman en 1957 et se formule de la façon suivante :

$$\rho v(x, \alpha) = \min_{u(\cdot) \in \Gamma(\alpha)} \left\{ g(x, u, \alpha) + (u - d) \frac{\partial v}{\partial x} + \sum_{\alpha \in B} q_{\alpha\beta} v(x, \beta) \right\} \quad \forall \alpha, \beta \in B \quad (3.12)$$

Sous certaines conditions, il est démontré dans Ouaret et al (2015) que la fonction valeur est une fonction strictement convexe, continue et différentiable donc satisfaite aux équations d'HJB. La solution cherchée est la commande optimale $u^*(.)$ qui minimise le terme droit de l'équation (3.12) à travers l'ensemble des commandes admissibles $\Gamma(\alpha)$.

Cependant, il est impossible de résoudre analytiquement l'équation d'HJB (Emami-Merghani et al., 2014). Les travaux de Boukas et Haurie (1990) ont pu démontrer qu'il est possible grâce aux méthodes numériques d'apporter une solution à l'équation (3.12). Nous allons donc par la suite de ce travail nous baser sur cette approche pour résoudre l'équation (3.12) et déterminer ainsi la politique de commande recherchée.

3.5 Méthodes numériques

Dans cette partie du travail, nous allons développer les méthodes numériques pour trouver la politique de commande optimale du système manufacturier en utilisant l'approche de Kushner et Dupuis (1992). Cette approche a été utilisée dans plusieurs travaux tels que Ouaret et al. (2015), Emami-Merghani et al. (2013), Yotat (2017) pour ne citer que ceux-là. Cette approche numérique consiste à faire une approximation de la fonction valeur $v(x, \alpha)$ par la fonction valeur $v^h(x, \alpha)$. Soit h le pas de discrétisation, l'approximation de la fonction valeur est donnée par $v^h(x, \alpha)$ et sa dérivée partielle s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{\partial v^h(x, \alpha)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{1}{h} [v^h(x + h, \alpha) - v^h(x, \alpha)] & \text{si } u - d \geq 0 \\ \frac{1}{h} [v^h(x, \alpha) - v^h(x - h, \alpha)] & \text{si } u - d < 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

En multipliant par $u - d$ l'équation (3.13) on obtient :

$$(u - d) \frac{\partial v^h(x, \alpha)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{(u - d)}{h} [v^h(x + h, \alpha) - v^h(x, \alpha)] & \text{si } u - d \geq 0 \\ \frac{(u - d)}{h} [v^h(x, \alpha) - v^h(x - h, \alpha)] & \text{si } u - d < 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

En remplaçant l'équation (3.14) dans l'équation (3.12) on a :

$$\rho v^h(x, \alpha) = \min_{u(\cdot) \in \Gamma(\alpha)} \left[g(\cdot) + \left(\frac{(u - d)}{h} \left\{ v^h(x + h, \alpha) \text{Ind}((u - d) \geq 0) + v^h(x - h, \alpha) \text{Ind}((u - d) < 0) \right\} - \frac{|u - d|}{h} v^h(x, \alpha) + \sum_{\beta \in B} q_{\alpha\beta} v^h(x, \beta) \right) \right] \quad (3.15)$$

$$Ind\{P(.)\} = \begin{cases} 1 & \text{si } P(.) \text{ est vrai} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Après simplification de l'équation (3.15), on obtient :

$$v^h(x, \alpha) = \min_{u(.) \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{\left(g(.) + \frac{(u-d)}{h} \left\{ v^h(x+h, \alpha) Ind((u-d) \geq 0) + v^h(x-h, \alpha) Ind((u-d) < 0) \right\} + \sum_{\beta \neq \alpha} q_{\alpha\beta} v^h(x, \beta) \right)}{\left(\rho + \frac{|u-d|}{h} + |q_{\alpha\alpha}| \right)} \right] \quad (3.16)$$

Posons :

$$\Omega_h^\alpha = \frac{|u-d|}{h} + |q_{\alpha\alpha}|$$

$$P_x^+(\alpha) = \begin{cases} \frac{u-d}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u-d \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$P_x^-(\alpha) = \begin{cases} \frac{d-u}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u-d < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$P^\beta(\alpha) = \frac{q_{\alpha\beta}}{\Omega_h^\alpha}$$

Notons que : $P_x^+(\alpha) + P_x^-(\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) = 1$

L'équation (3.16) devient donc :

$$v^h(x, \alpha) = \min_{u(.) \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^\alpha \left(1 + \frac{\rho}{\Omega_h^\alpha} \right)} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^\alpha}} \left(\begin{aligned} &P_x^+(\alpha) v^h(x+h, \alpha) \\ &+ P_x^-(\alpha) v^h(x-h, \alpha) \\ &+ \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) v^h(x, \beta) \end{aligned} \right) \right] \quad (3.17)$$

Avec $\Gamma(\alpha)$ l'ensemble des commandes admissibles.

P_x^+ , P_x^- , $P^\beta(\alpha)$ sont tous positif pour $\alpha \neq \beta$. Ces expressions sont représentées sur la grille de résolution numérique des équations d'HJB comme étant les probabilités de passer d'un point x à un point $x+h$ ou alors d'un point x à $x-h$ sur la grille numérique (Nkeungoué, 2005).

La solution à l'équation (3.17) sera obtenue grâce à un algorithme d'approximation consécutive basé sur l'amélioration de la politique (Kushner et Dupuis, 1992); (Boukas et Haurie, 1990).

Cette méthode d'approximation successive nécessite de définir une grille finie, ensuite de la segmenter à l'aide d'un pas de discrétisation et de définir par la suite les conditions aux limites de la grille. Pour calculer la fonction valeur à un point de la grille, on aura besoin d'une valeur en amont et d'une autre en aval de la fonction valeur. Au point limite de la grille, une de ces deux valeurs sera hors de la grille donc non définie et devra être approximée pour trouver la solution de la fonction valeur. Cette approximation n'influe pas sur le résultat du moment où la fonction valeur est continue; ceci se justifie grâce aux hypothèses énoncées dans Yan et Zhang (1997).

Dans l'ouvrage de Boukas et Haurie (1990) pour un pas de discrétisation donné, l'algorithme d'approximation successive se présente de la façon suivante :

Étape 1 : Initialisation

Choisir $\delta \in R^+$; fixer $n=1$, et $(v^\alpha(x))^n = 0, \forall \alpha \in B, \forall x \in G$

Étape 2 : Calculer

$$(v^\alpha(x))^{n-1} := (v^\alpha(x))^n, \forall \alpha \in B, \forall x \in G$$

Étape 3 : Calculer la fonction coût correspondante pour obtenir la politique optimale

Étape 4 : Test de convergence

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \min_{x \in G} [(v^\alpha(x))^n - (v^\alpha(x))^{n-1}] & \underline{c} &= \max_{x \in G} [(v^\alpha(x))^n - (v^\alpha(x))^{n-1}] \\ c_{min} &:= \frac{\rho}{1-\rho} \bar{c} & c_{max} &:= \frac{\rho}{1-\rho} \underline{c} \end{aligned}$$

Si $|c_{max} - c_{min}| \leq \delta$ alors on arrête; sinon $n=n+1$ et retour à l'étape 2.

Cet algorithme sera utilisé dans ce chapitre et dans les prochains chapitres. L'algorithme a été programmé grâce au logiciel Matlab. Les données de simulation et l'analyse des résultats sont présentées dans la partie suivante.

3.6 Exemple numérique

Afin de résoudre l'équation (3.17), nous allons présenter un exemple numérique du procédé manufacturier décrit précédemment. Cette résolution a pour but de déterminer la politique de commande optimale qui minimise le coût de production.

Pour les 8 modes définis précédemment, l'équation (3.17) se traduit en 8 équations (3.18) - (3.25) présentées ci-après :

- Au mode 1

$$v^h(x, 1) = \min_{u(\cdot) \in \Gamma(1)} \left\{ \frac{c^+x^+ + c^-x^-}{\Omega_h^1(1 + \frac{\rho}{\Omega_h^1})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^1}} \left(\begin{array}{l} P_x^+(1)v^h(x+h, 1) + \\ P_x^-(1)v^h(x-h, 1) \\ + P^2(1)v^h(x, 2) \\ + P^4(1)v^h(x, 4) \\ + P^5(1)v^h(x, 5) \end{array} \right) \right\} \quad (3.18)$$

- Au mode 2

$$v^h(x, 2) = \min \left\{ \frac{c^+x^+ + c^-x^-}{\Omega_h^2(1 + \frac{\rho}{\Omega_h^2})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^2}} \left(\begin{array}{l} P_x^-(2)v^h(x-h, 2) \\ + P^1(2)v^h(x, 1) \\ + P^3(2)v^h(x, 3) \\ + P^6(2)v^h(x, 6) \end{array} \right) \right\} \quad (3.19)$$

- Au mode 3

$$v^h(x, 3) = \min \left\{ \frac{c^+x^+ + c^-x^-}{\Omega_h^3(1 + \frac{\rho}{\Omega_h^3})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^3}} \left(\begin{array}{l} P_x^-(3)v^h(x-h, 3) \\ + P^2(3)v^h(x, 2) \\ + P^4(3)v^h(x, 4) \\ + P^8(3)v^h(x, 8) \end{array} \right) \right\} \quad (3.20)$$

- Au mode 4

$$v^h(x, 4) = \min \left\{ \frac{c^+x^+ + c^-x^-}{\Omega_h^4(1 + \frac{\rho}{\Omega_h^4})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^4}} \left(\begin{array}{l} P_x^-(4)v^h(x-h, 4) \\ + P^3(4)v^h(x, 3) \\ + P^1(4)v^h(x, 1) \\ + P^7(4)v^h(x, 7) \end{array} \right) \right\} \quad (3.21)$$

- Au mode 5

$$v^h(x, 5) = \min \left\{ \frac{c^+ x^+ + c^- x^-}{\Omega_h^5 (1 + \frac{\rho}{\Omega_h^5})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^5}} \begin{pmatrix} P_x^-(5) v^h(x - h, 5) \\ + P^1(5) v^h(x, 1) \\ + P^6(5) v^h(x, 6) \\ + P^7(5) v^h(x, 7) \end{pmatrix} \right\} \quad (3.22)$$

- Au mode 6

$$v^h(x, 6) = \min \left\{ \frac{c^+ x^+ + c^- x^-}{\Omega_h^6 (1 + \frac{\rho}{\Omega_h^6})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^6}} \begin{pmatrix} P_x^-(6) v^h(x - h, 6) \\ + P^2(6) v^h(x, 2) \\ + P^5(6) v^h(x, 5) \\ + P^8(6) v^h(x, 8) \end{pmatrix} \right\} \quad (3.23)$$

- Au mode 7

$$v^h(x, 7) = \min \left\{ \frac{c^+ x^+ + c^- x^-}{\Omega_h^7 (1 + \frac{\rho}{\Omega_h^7})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^7}} \begin{pmatrix} P_x^-(7) v^h(x - h, 7) \\ + P^4(7) v^h(x, 4) \\ + P^5(7) v^h(x, 5) \\ + P^8(7) v^h(x, 8) \end{pmatrix} \right\} \quad (3.24)$$

- Au mode 8

$$v^h(x, 8) = \min \left\{ \frac{c^+ x^+ + c^- x^-}{\Omega_h^8 (1 + \frac{\rho}{\Omega_h^8})} + \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\Omega_h^8}} \begin{pmatrix} P_x^-(8) v^h(x - h, 8) \\ + P^3(8) v^h(x, 3) \\ + P^6(8) v^h(x, 6) \\ + P^7(8) v^h(x, 7) \end{pmatrix} \right\} \quad (3.25)$$

Dans cet exemple numérique, nous définissons un domaine D , qui représente la variation du stock, comme suit :

$$D = \{-5 \leq x \leq 20\}$$

Le tableau suivant présente les taux de transition et leur signification. Ces taux seront utilisés pour déterminer la politique optimale du système manufacturier. Notons que la variable de contrôle est le taux de production $u(.)$.

Tableau 3.3 Taux de transition du système

Taux de transition	Signification
$q_{15} = q_{47} = q_{38} = q_{26} = 1/MTTF(M)$	Taux de pannes (Machine)
$q_{23} = q_{14} = q_{57} = q_{68} = 1/MTTF(C)$	Taux de pannes (Captation)
$q_{43} = q_{12} = q_{56} = q_{78} = 1/MTTF(L)$	Taux de pannes (Lubrification)
$q_{51} = q_{74} = q_{83} = q_{62} = 1/MTTR(M)$	Taux de réparations (Machine)
$q_{32} = q_{41} = q_{75} = q_{86} = 1/MTTR(C)$	Taux de réparations (Captation)
$q_{34} = q_{21} = q_{65} = q_{87} = 1/MTTR(L)$	Taux de réparations (Lubrification)

Pour avoir les résultats du problème d'optimisation, nous allons utiliser le logiciel Matlab. Les valeurs suivantes permettent de définir les taux de transitions :

$MTTF(M) = 100$ unités de temps; $MTTR(M) = 5$ unités de temps;
 $MTTF(C) = 1000$ unités de temps; $MTTR(C) = 10$ unités de temps;
 $MTTF(L) = 1000$ unités de temps; $MTTR(L) = 10$ unités de temps;
 $MTTF$: Mean Time To Failure $MTTR$: Mean Time To Repair

Certaines de ces valeurs ont été tirées de la revue de littérature à l'exemple de Rivera-Gómez et al. (2018, 2020) et Sakou (2019) pour ne citer que ceux-là. Ils ont dans leurs modélisations, considéré un temps moyen de bon fonctionnement de 100 unités de temps pour la machine. Cependant, en ce qui concerne l'unité de captation et l'unité de lubrification, les temps de bon fonctionnement ont été choisis selon une logique. Celle-ci reposait sur deux grands critères:

- L'usinage : lors de la transformation du granit (polissage), l'élément qui effectue l'usinage de la pièce est la machine de production. Par conséquent, elle est en contact direct avec le matériau usiné ce qui augmente sa probabilité de tomber en panne par rapport aux unités de protection.
- Le nombre de composantes mécaniques de la machine: en effet, l'unité qui polit le granit est constituée de plusieurs éléments mécaniques comparés aux unités de protection (captation et lubrification). Ceci nous a permis de déduire que la probabilité que l'unité de production tombe en panne est plus grande que la probabilité d'avoir les unités de protection défailantes.

Ces deux critères justifient le choix du temps moyen de bon fonctionnement des unités de protection supérieure celle de l'unité de production. N'ayant pas les valeurs précises du temps moyen de bon fonctionnement et temps moyen de réparation, nous allons effectuer une analyse de sensibilité sur ces données afin de vérifier qu'en faisant varier ces paramètres, le modèle nous donne des résultats qui sont rationnels. Cette analyse de sensibilité a pour but de confirmer la robustesse du modèle développé. Cela dit, si l'on parvient à avoir des données réelles d'une entreprise du secteur de la transformation du granit, les résultats obtenus grâce à cette modélisation seront réalistes à condition que la faisabilité du système énoncé à l'équation (3.8) soit respectée.

Partant des paramètres d'usinage mentionné à la section 2.3 du chapitre précédent, nous avons pu estimer le temps qu'il faut pour polir un bloc de granit. Ces données sont tirées de la thèse de Saidi (2018).

- Vitesse de rotation de l'outil : 1000tr/min;
- Diamètre de l'outil : 152 mm;
- Vitesse d'avance : 25mm/s;
- Nombre de passes : 7.

Le bloc de granit usiné fait 2500 mm de longueur et 1500 mm de largeur. Après calcul, en tenant compte du temps passé à changer l'outil (abrasifs), nous avons besoin de 2 heures pour polir un bloc de cette taille. Cela nous a donc permis de déduire le taux de production maximale de la machine qui est égal à 0.5 produit/unité de temps. Pour ce qui est de la demande, nous nous sommes appuyés sur l'article de Ouaret et al (2015) où une valeur est attribuée à la demande en tenant compte de la condition de faisabilité du système de production donnée à l'équation (3.8). Le tableau 3.4 présente les valeurs numériques utilisées pour obtenir la politique de commande optimale.

Tableau 3.4 Valeurs numérique du système

Variables	c^+	c^-	d	U_{max}	ρ	h
Valeurs	5	80	0,45	0,5	0,01	0.1
Unités	\$/Produit/UT	\$/Produit/UT	Produit/UT	Produit/UT		

Après simulation, la politique de production obtenue est représentée à la figure 3.3.

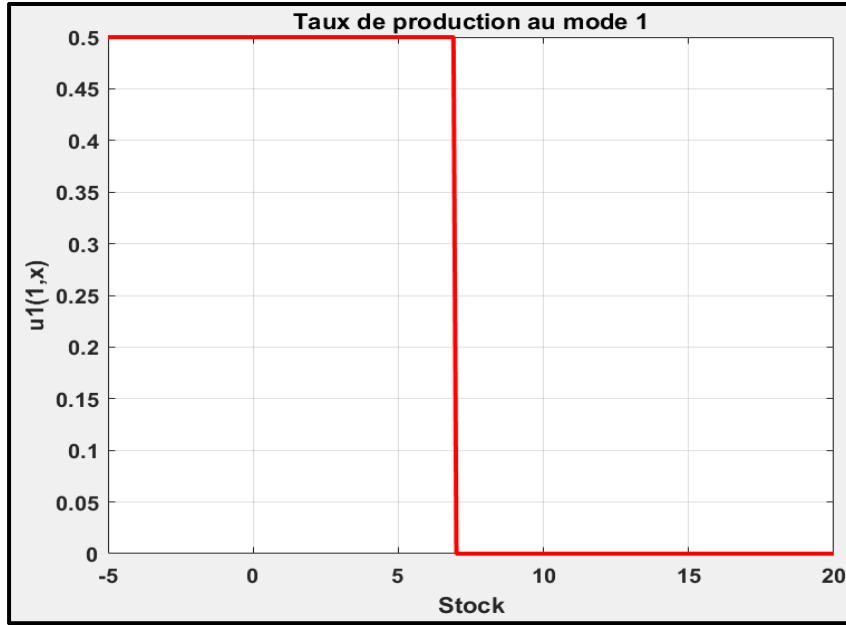


Figure 3.3 Taux de production au mode 1

La politique de production obtenue est fonction d'un seuil critique noté $Z^*(\alpha = 1)$. La figure 3.3 s'interprète de la manière suivante :

- Produire au taux maximal si l'inventaire $x(t)$ est inférieure au seuil critique $Z^*(1)$.
- Produire au taux de la demande d si l'inventaire $x(t)$ est égal au seuil critique $Z^*(1)$.
- Arrêter la production si l'inventaire $x(t)$ est supérieure au seuil critique $Z^*(1)$.

Cette politique est une politique à seuil critique encore appelé Hedging Point Policy (HPP) et se résume par l'équation suivante :

$$u(x, 1) = \begin{cases} U_{max} & \text{si } x(t) < Z^*(1) \\ d & \text{si } x(t) = Z^*(1) \\ 0 & \text{si } x(t) > Z^*(1) \end{cases}$$

$Z^*(1)$ est le seuil critique de la politique de commande optimale du système au mode 1. Pour les autres modes (2,3,4,5,6,7,8), $Z^* = 0$. U_{max} représente le taux de production maximale lorsque la machine est en production, d défini le taux de demande des clients en produits finis et $x(t)$ le stock de produits finis au temps t . La valeur du seuil critique $Z^*(1)$ est 7. Dans l'optique de vérifier la ténacité du modèle conçu, nous allons faire une analyse de sensibilité dans la section suivante.

3.7 Analyse de sensibilité

Afin de confirmer la modélisation du système de production, nous nous devons de faire une analyse de sensibilité en nous basant sur l'exemple numérique faite précédemment. Cette analyse, consiste à faire varier certains paramètres du système et d'observer l'effet de cette variation sur les résultats donnés par le modèle développé. Les paramètres à faire varier sont: les coûts de stockage, les coûts de pénuries des produits finis, les taux de réparation et les taux de panne du système de production (la machine, l'unité de lubrification et l'unité de captation à la source). L'observation sera portée sur le seuil critique du système de production.

3.7.1 Variation du coût de rupture de stock et du temps moyen de bon fonctionnement de la machine (MTTF)

La figure 3.4 illustre la variation du coût de pénurie et la disponibilité de la machine de production notée M .

L'augmentation du coût de stock c^- fait croître la valeur du seuil critique. Dans ce cas, l'entreprise se doit d'éviter toute pénurie en produits finis pour minimiser leur coût de production. Par conséquent, il est important que le gestionnaire de production planifie ses activités de telle sorte que le manque de produits finis ne puisse pas avoir lieu.

En ce qui concerne le temps moyen de bon fonctionnement de l'unité de production, la figure 3.4 montre que lorsqu'on diminue la disponibilité de la machine, le seuil critique augmente. Cette observation se justifie par le fait que l'unité de production passe de moins en moins de temps en production c'est-à-dire qu'elle tombe de plus en plus en panne. Par conséquent, pour pallier ce problème de disponibilité, on se doit d'augmenter le seuil critique pour couvrir la demande en produits finis lorsque la machine est en maintenance.

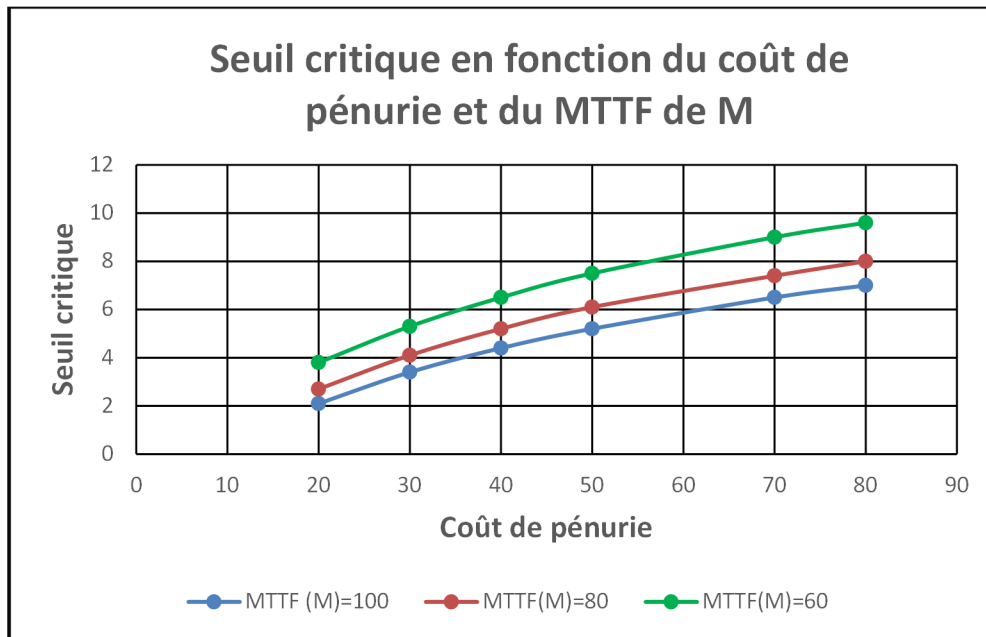


Figure 3.4 Variation du coût de rupture de stock et du MTTF de la machine

3.7.2 Variation du coût de rupture de stock et du temps moyen de réparation de la machine (MTTR)

La figure 3.5 résume la variation du coût de pénurie et du temps moyen de réparation de la machine de production notée M.

L'analyse faite à la figure 3.4 par rapport à la variation du coût de pénurie reste valide pour ce cas.

La réduction du temps de réparation de la machine cause une diminution du seuil critique. En effet, lorsqu'on réduit le temps moyen qu'on passe à rétablir la machine, cela signifie que le personnel de la maintenance passe moins de temps pour remettre la machine en production. Par conséquent, il n'est pas recommandé d'augmenter le stock de produits finis lorsque le temps de maintenance décroît. Le gestionnaire de production doit donc dans ce cas prévoir un stock nécessaire pour couvrir la demande lorsque la machine est en réparation.

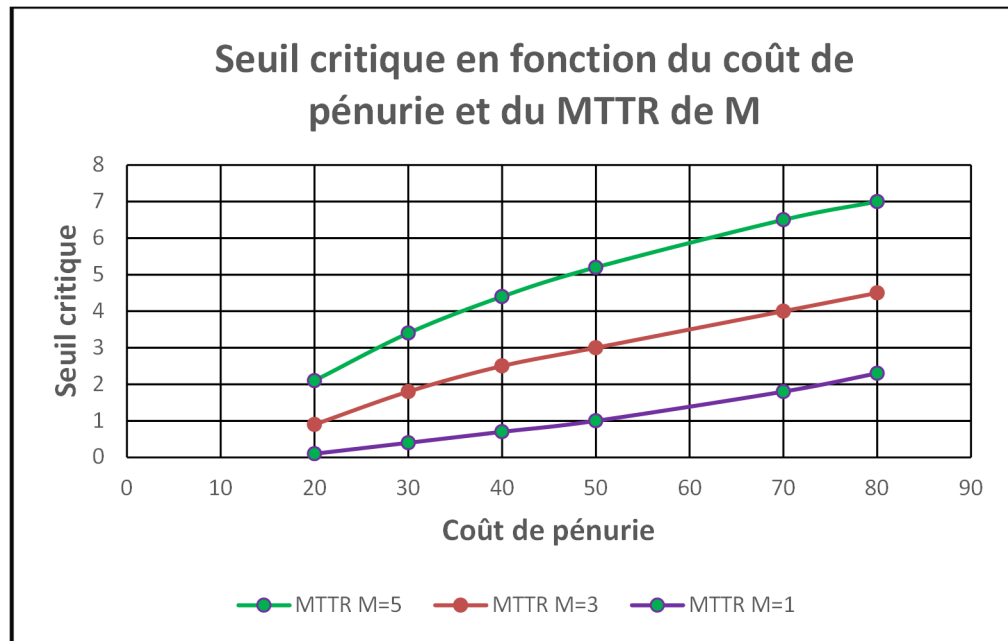


Figure 3.5 Variation du coût de pénurie et du MTTR de la machine

3.7.3 Variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de bon fonctionnement de l'unité de ventilation locale (MTTF)

La figure 3.6 montre la variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de bon fonctionnement (MTTF) de l'unité de ventilation locale notée C.

Lorsqu'on augmente le coût de mise en inventaire, la valeur du seuil critique diminue. En effet, plus l'entreprise stocke ses produits, plus le coût de production augmente. Dans ce cas, le manufacturier se doit de moins stocker pour minimiser le coût de production.

Cependant, si on réduit le temps de bon fonctionnement de l'unité de captation locale, le seuil critique augmente. Ceci s'explique par le fait que l'unité de captation locale tombe de plus en plus en panne et la contrainte faite par les organismes tels que OSHA est qu'il faut produire lorsque tous les équipements fonctionnent simultanément pour avoir un faible niveau de concentration de silice cristalline. Par conséquent, on doit avoir un stock de produits pour pouvoir répondre à la demande lorsque l'unité C n'est pas disponible.

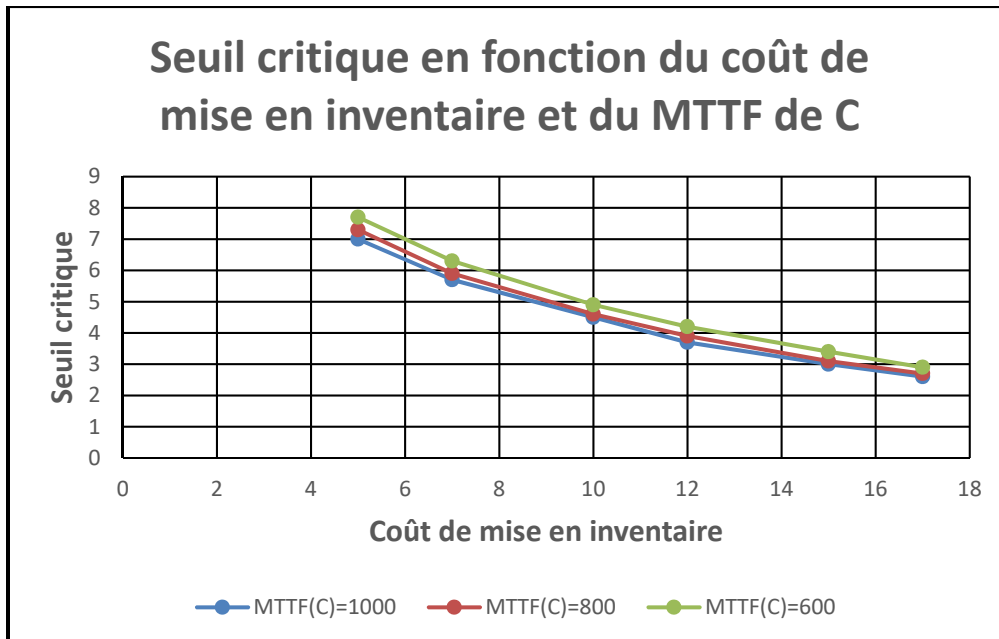


Figure 3.6 Variation du coût de mise en inventaire et du MTTF de l'unité de ventilation locale

3.7.4 Variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de réparation de l'unité de ventilation locale (MTTR)

La variation du coût de mise en inventaire et du temps moyen de réparation de l'unité de ventilation locale notée C sont représentés à la figure 3.7.

L'analyse de la variation du coût de mise fait précédemment à la figure 3.6 reste valable dans ce cas.

Pour ce qui est du temps moyen de réparation de l'unité de captation, si on l'augmente, le seuil critique augmente également. Vu qu'on passe plus de temps à remettre sur pied l'unité de ventilation, et qu'il faut à tout prix cette unité pour reprendre la production, on se doit de prévoir un stock pour répondre à la demande pendant que la maintenance se fait sur cet équipement.

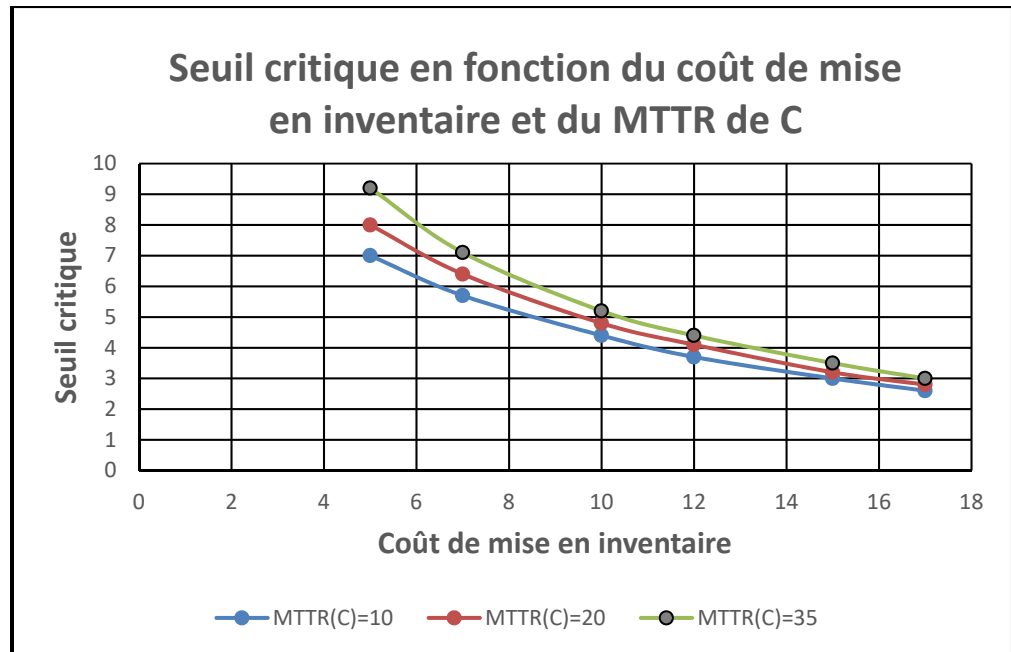


Figure 3.7 Variation du coût de mise en inventaire et du MTTR de l'unité de ventilation locale

Dans le chapitre 1, on a vu à la section 1.8 qu'il était important à un moment donné d'effectuer une maintenance préventive pour améliorer la disponibilité de l'équipement de production. En effet, si l'on produit en effectuant uniquement la maintenance corrective, il sera possible à un moment donné qu'on se débarrasse de l'équipement. Ceci s'explique par le fait que la maintenance corrective ne remet pas l'équipement à l'état initial. Par conséquent il se peut que l'équipement ne soit plus disponible pour effectuer la tâche qui lui est destinée. De plus, la concentration des particules de silices ne va cesser d'augmenter. En faisant varier le temps de bon fonctionnement de l'unité C, nous avons pu obtenir la figure 3.8 qui illustre la disponibilité ($\pi_1 * u_1^{max} - d$) du système. Cette figure montre que, si aucune maintenance préventive n'est faite, alors la disponibilité du système manufacturier va descendre en dessous de zéro ne respectant plus la condition de faisabilité énoncé à l'équation 3.8. Il est à noter que la maintenance préventive faite dans ce cas remet à neuf l'équipement. Toute cette analyse permet de comprendre qu'il est important de faire à un certain moment la maintenance préventive pour remettre à neuf l'équipement de production. Cette maintenance préventive fera donc l'objet du chapitre suivant.

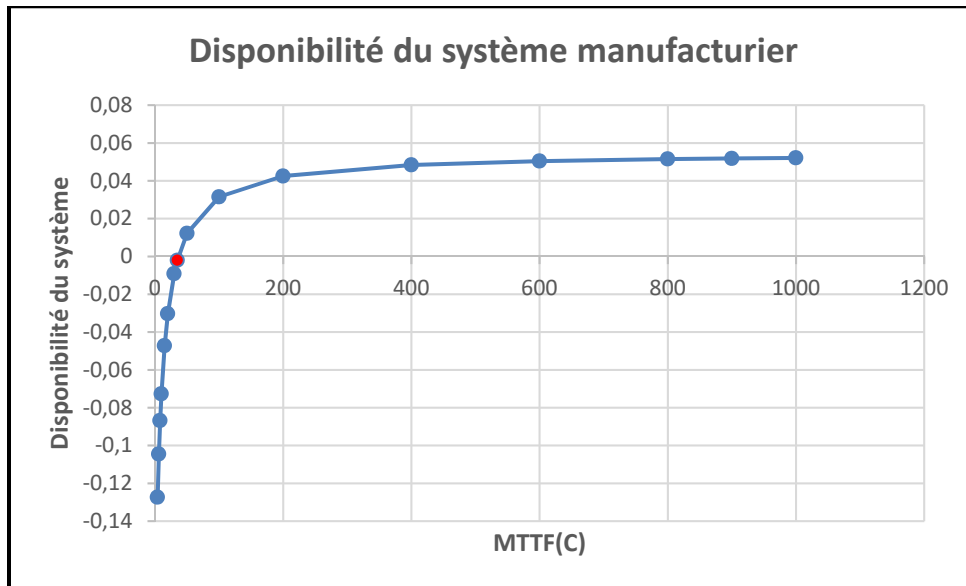


Figure 3.8 Disponibilité du système manufacturier en fonction du MTTF de l'unité de ventilation locale

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de planifier la production d'une unité de transformation du granit sujette à des pannes et réparations aléatoires. L'unité de production considérée était constituée d'une machine de production et de deux systèmes de protection greffés à la machine pour assurer la protection des employés du point de vue exposition aux poussières de silice cristallines émises durant la production. L'ensemble constitue un système manufacturier décrit par un processus stochastique à 8 modes. Au moyen de la chaîne de Markov homogène, nous avons développé un modèle d'optimisation stochastique basé sur une seule variable de décision appelée taux de production. Le contrôle de cette variable de décision nous a permis d'optimiser et d'établir une politique de commande optimale qui minimise le coût de production. Cette politique se définit comme étant une politique à seuil critique (HPP). Dans l'optique de vérifier la ténacité du modèle développé, nous avons effectué une analyse de sensibilité qui s'est soldée par des résultats assez logiques. En industrie, plus le nombre de pièces produites augmente, plus l'âge du système manufacturier augmente également. Si aucune maintenance préventive

n'est faite, la disponibilité de l'unité de production va décroître jusqu'au point où il sera impossible d'opérer avec l'équipement. Raison pour laquelle dans le chapitre suivant, nous avons intégré la notion de maintenance préventive dans la modélisation du système manufacturier.

CHAPITRE 4

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION INTÉGRANT LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET LA LIMITE D'EXPOSITION AUX PARTICULES DE SILICE : APPLICATION À LA TRANSFORMATION DU GRANIT

4.1 Introduction

Comme mentionné au début de ce travail, la santé et la sécurité des employés est l'un des aspects que l'entreprise doit prendre en compte lors de ses activités si elle veut demeurer compétitive. Chaque secteur d'activité a ses risques associés et ses réglementations à respecter. Pour ce qui nous concerne, le secteur d'activité sur lequel nous travaillons est la transformation du granit. Le système manufacturier considéré dans ce chapitre est identique à celui du chapitre précédent. Cependant, dans cette partie du travail, nous allons inclure la maintenance préventive et la limite d'exposition aux particules de silice. En effet, comme nous l'avons dit précédemment, le système manufacturier considéré dans cette étude produit des particules de silice cristalline. Ce paramètre sera donc pris en compte dans ce chapitre afin d'établir une stratégie de production optimale permettant de respecter la limite d'exposition aux particules de silices prévues par la réglementation. Pour ce fait, nous allons tout d'abord décrire les différents paramètres du système de production. Ensuite, grâce aux équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman, nous allons décrire les conditions d'optimum qui seront résolues numériquement afin d'obtenir une commande optimale. Afin de confirmer la robustesse du modèle développé, nous allons conclure ce chapitre par une analyse de sensibilité.

4.2 Formulation du problème

Le système manufacturier considéré précédemment (chapitre 3) était sujet à des pannes et des réparations aléatoires. Dans ce chapitre, ces réparations ne restaurent pas l'état initial de l'équipement; par conséquent, réduisent son temps de disponibilité. Ces réparations imparfaites conduisent à une indisponibilité de l'équipement d'où l'importance de faire une maintenance préventive à un moment donné. Cette maintenance va restaurer l'état initial de l'équipement

de production (Maintenance de type As Good As New ou AGAN) et empêcher la concentration des particules de silices de dépasser la limite prévue par la réglementation. Le système manufacturier étudié est constitué d'une machine de production auquel sont associées deux unités à savoir une source de ventilation locale et un système de lubrification. Ces deux unités visent à réduire les particules de silice émises à la source lors des activités de transformation du granit. La machine, la ventilation locale et le système de lubrification suivent chacun une dynamique dont la description s'énonce comme suit :

- La machine M peut être soit opérationnel et défini par 1, tandis que 0 définit l'état de la machine lorsqu'elle est en panne.
- L'unité de lubrification désignée par L suit une dynamique telle que 1 est attribué à la disponibilité et 0 si l'unité est indisponible.
- La ventilation locale notée C a une dynamique constituée de trois états tels que : 1 définit l'état opérationnel, 0 signifie que l'unité est indisponible et 2 qui désigne l'activité de maintenance préventive.

La structure qui permet de déterminer les modes du processus global du système manufacturier est illustrée à la figure suivante :

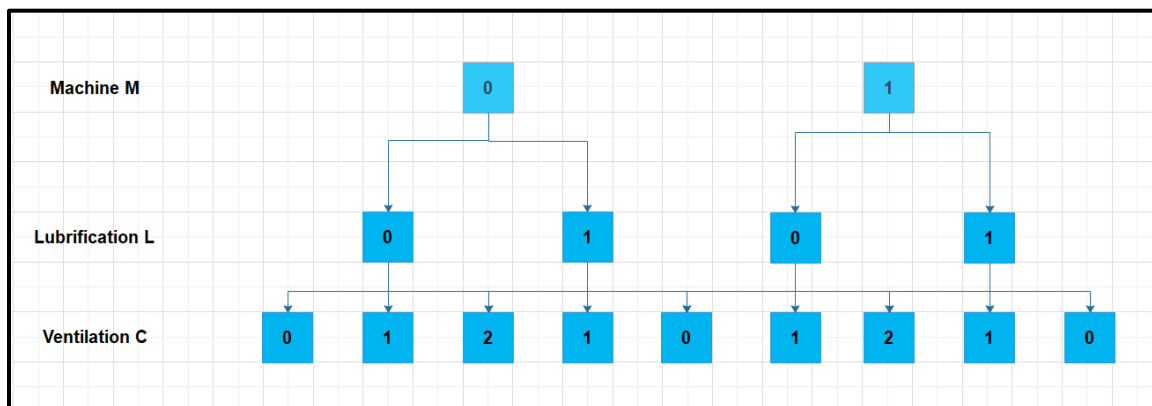


Figure 4.1 Structure en arbre du processus stochastique

Le système manufacturier est défini par un processus stochastique $(\gamma(t), t > 0)$ décrit par une chaîne de Markov non homogène à 12 modes. Le tableau suivant donne une description des modes du système.

Tableau 4.1 Description des modes du système

Modes	États du système	Descriptions
1	(1,1,1)	Le système est en production
2	(1,0,1)	L'unité de lubrification tombe en panne
3	(1,0,0)	C et L sont indisponibles tandis que M est opérationnelle
4	(1,1,0)	M et L sont opérationnelles et C est en panne
5	(1,1,2)	La machine M et l'unité L sont disponibles et l'unité de ventilation C est en maintenance préventive
6	(1,0,2)	Seul M est disponible
7	(0,1,2)	M est indisponible, L est opérationnelle et C est en maintenance préventive
8	(0,0,2)	M et L sont indisponibles et C est en maintenance
9	(0,1,1)	M est en panne alors que C et L sont disponibles
10	(0,0,0)	Aucune unité n'est disponible
11	(0,1,0)	Seul l'unité L est disponible
12	(0,0,1)	Seul l'unité C est disponible

La production a lieu uniquement si les trois équipements du système manufacturier sont simultanément disponibles. Dès qu'un équipement de protection n'est plus opérationnel, il faut arrêter la production de peur que la concentration des particules de silice cristalline dépasse celle prévue par la loi.

Le processus stochastique $\gamma(t)$ est défini par la matrice des taux transition suivante :

$$Q(.) = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & q_{14} & q_{15} & 0 & 0 & 0 & q_{19} & 0 & 0 & 0 \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{2.12} \\ 0 & q_{32} & q_{33} & q_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{3.10} & 0 & 0 \\ q_{41} & 0 & q_{43} & q_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{4.11} & 0 \\ q_{51} & 0 & 0 & 0 & q_{55} & q_{56} & q_{57} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{65} & q_{66} & 0 & q_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{75} & 0 & q_{77} & q_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{86} & q_{87} & q_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_{91} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{99} & 0 & q_{9.11} & q_{9.12} \\ 0 & 0 & q_{10.3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{10.10} & q_{10.11} & q_{10.12} \\ 0 & 0 & 0 & q_{11.4} & 0 & 0 & 0 & q_{11.9} & q_{11.10} & q_{11.11} & q_{11.12} \\ 0 & q_{12.2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{12.9} & q_{12.10} & 0 & q_{12.12} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La matrice des taux transition $Q(.)$ dépend de :

w_p : Le taux d'envoi en maintenance préventive de l'unité de ventilation locale notée C;

Où : $w_p = q_{15}$.

$q_{23}(a(t))$, $q_{14}(a(t))$, $q_{9.11}(a(t))$, $q_{12.10}(a(t))$, définissent les taux de pannes de l'unité de ventilation en fonction de l'âge.

La probabilité de transition d'un mode α à β est donnée par la relation suivante :

$$P[\gamma(t + \delta t) = \beta / \gamma(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad \alpha, \beta \in H = \{1, 2, \dots, 12\} \quad (4.2)$$

$$\text{Avec } q_{\alpha\beta} > 0 \quad \forall \alpha \neq \beta \quad q_{\alpha\alpha} = -\sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} \quad \text{et} \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0$$

4.3 Dynamique du système

Plusieurs variables du système sont fonction du temps. On retrouve certaines variables qui sont décrites par une dynamique continue (stock); ou par une dynamique discrète (modes du système de production). Dans cette section, nous allons nous focaliser sur les variables suivantes:

- Le stock : traduit la quantité de nos produits finis à un instant t donné;
- L'âge : donne une idée sur l'état de nos équipements de production.

Soit $x(t)$ le stock, $u(t)$ le taux de production du système manufacturier et d le taux de demande en produits finis. La dynamique continue du stock et celle de l'âge de l'unité de captation sont définies par les équations suivantes :

$$\frac{dx}{dt} = u(t) - d \quad \text{avec} \quad x(0) = x \quad (4.3)$$

$$\frac{da}{dt} = f(u(t)) \quad \text{avec} \quad a(T) = 0 \quad (4.4)$$

Où T est le dernier temps de redémarrage de l'unité C après une maintenance préventive. En se référant à Kenné et Boukas (2003), l'âge est défini par une fonction linéaire représenté par $\dot{a}(\cdot) = ku(\cdot)$ avec k une constante qui permet de définir l'âge de l'équipement ainsi que sa cadence de croissance; et $u(\cdot)$ définit le taux de production de l'équipement en produit par unité de temps. La dynamique de l'âge est une fonction du nombre de pièces produites ou alors du temps passé en production (Dehayem et al., 2011).

Dans la matrice (4.1), le taux de panne de l'unité de ventilation est fonction de l'âge. Ainsi, la transition d'un mode α à un mode β sera décrit par la chaîne de Markov non homogène. Ce taux de panne est défini par l'équation (4.5) voir Kenne et Nkeungoué (2008). Cette équation traduit la relation qu'il y'a entre taux de défaillance de l'équipement et l'âge. La probabilité de défaillance de l'unité de ventilation augmente avec l'âge. L'une des pannes le plus souvent rencontrées sur un système d'aspiration est la défaillance du moteur d'aspiration.

$$q_{14}(a(t)) = A_0 + A_t(1 - \exp(K * a^3(t))) \quad (4.5)$$

Où A_0 , A_t et K des constantes.

$$q_{14}(a(t)) = q_{23}(a(t)) = q_{9.11}(a(t)) = q_{12.10}(a(t))$$

Durant l'usinage, les mesures barrières mise en place tel que la ventilation locale se dégrade au cours du temps. Cette dégradation laisse place à une augmentation de la concentration des particules émises. Par conséquent, le risque d'exposition aux particules de silice cristalline va

croître. Il est alors impératif que la concentration de silice qui augmente en fonction de l'usure de l'équipement de protection ne puisse pas atteindre la limite d'exposition prévue par la réglementation. L'une des causes de l'évolution de la concentration des particules de silice est la diminution du débit d'aspiration. Celle-ci est fonction de l'état de la pompe d'aspiration, l'état des conduites d'aspirations ou encore l'état des filtres d'aspirations. Ainsi, l'usure de la pompe, l'accumulation des particules de silice dans la conduite d'aspiration ou encore la saturation des filtres vont contribuer à la diminution du débit d'aspiration et conduire alors à une augmentation de la concentration des particules non captées. La figure 4.2 en donne une illustration.

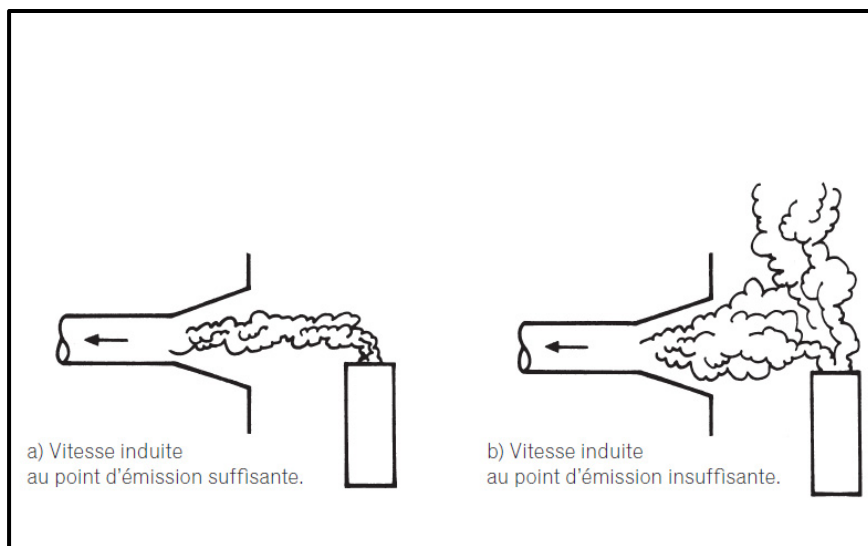


Figure 4.2 Effets de la dégradation du système de captation sur la concentration des particules tirée de INRS (2015)

Lorsque l'unité est neuve, la concentration des particules dans l'air de travail se trouve à son minimum : le système est encore en bon état (voir figure 4.2 a). Au fur et à mesure qu'on usine les blocs de granit, le système d'aspiration va s'user et se dégrader, conduisant ainsi à une augmentation de la concentration des particules dans l'air de travail (voir figure 4.2 b). L'évolution de la concentration des particules non captée est de telle sorte qu'au début (bon état) la concentration des particules non captées est à son minimum. Avec le temps, cette concentration va évoluer jusqu'à atteindre un certain niveau où elle aura tendance à se stabiliser.

Dans ce cas, l'unité de captation ne peut donc plus remplir sa fonction de base. Dans une étude de Haghighat et al. (2013), les aérosols sont injectés dans une enceinte où un dispositif muni d'un filtre (N95) est relié à une pompe d'aspiration. Ils ont pu évaluer en fonction du temps, la concentration en nombre des particules se trouvant en amont du système de protection. Ensuite, ils ont modélisé l'évolution de cette concentration en fonction du temps et du débit d'aspiration (voir figure 4.3). Au début du processus, on constate que la concentration en nombre des particules est au minimum. Avec le temps, cette concentration évolue jusqu'à se stabiliser à un certain niveau.

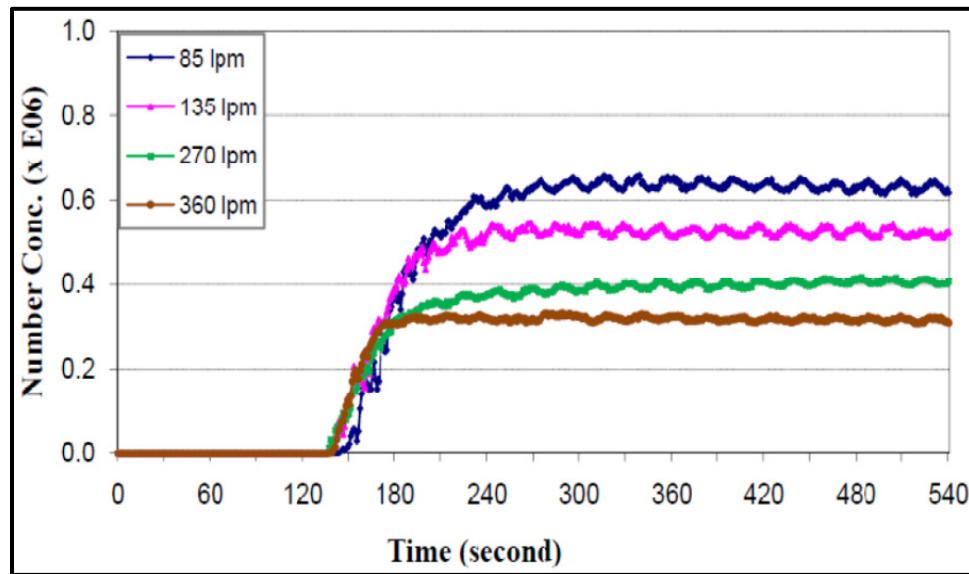


Figure 4.3 Concentration en nombre des aérosols en fonction du temps

source : Haghighat et al. (2013)

À partir de cette analyse, nous avons établi l'équation (4.6) traduisant l'évolution de la concentration des particules de silice cristalline en fonction du nombre de pièces produites.

$$e(a(t)) = e_0 + e_l(1 - \exp(E * a^5(t))) \quad (4.6)$$

Avec e_0 , e_l , E des constantes et $a(t)$ l'âge de l'unité de ventilation donc la dynamique est décrite par l'équation (4.4). e_0 , e_l , E sont des constantes qui peuvent être obtenues grâce à l'historique

des données de production. En se basant sur la limite d'exposition établie par OSHA, nous allons tout comme dans Rivera-Gómez et al. (2020) générer des valeurs qui vont correspondre à la limite de concentration à respecter.

4.4 Domaine de commande admissible

Les variables de décision du problème d'optimisation sont le taux de production $u(.)$, le taux d'envoi en maintenance préventive $w_p(.)$. Soit $\Gamma(\alpha)$ l'ensemble des commandes admissible on a :

$$\Gamma(\alpha) = \left\{ \left(u(.), w_p(.) \right) \in R^2 / 0 \leq u(.) \leq u_{max}, w_p^{min} \leq w_p(.) \leq w_p^{max} \right\} \quad (4.7)$$

4.5 Faisabilité du système

Pour un système stochastique décrit par le processus Markovien, la probabilité que le système puisse être dans un mode est définie par la probabilité limite. Soit $\pi(.)$ le vecteur des probabilités limites et $Q(.)$ la matrice des taux de transition donnée par l'équation (4.1). La relation permettant de déterminer chaque probabilité limite est donnée par :

$$\begin{cases} \pi_i(.) * Q(.) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \text{ où } n = 3 \end{cases} \quad (4.8)$$

Le système manufacturier n'est faisable que si et seulement si on est capable de satisfaire la demande des clients en tout temps. Soit π_1 la probabilité que le système soit au mode 1 (mode de production) et u_1^{max} le taux de production maximal au mode 1 et d le taux de demande en produits finis. Le système est faisable si :

$$\pi_1 \times u_1^{max} \geq d \quad (4.9)$$

Ceci est possible dans le cas où on considère que la matière première est infinie.

4.6 Coût instantané et coût total actualisé

Soit $g(x, \alpha, u, a)$ la fonction désignant le coût instantané du système de production. Ce coût dépend du coût de mise en inventaire des produits finis, du coût de pénurie et du coût de maintenance. Cette fonction est définie de la manière suivante :

$$g(x, \alpha, u, a) = c^+ x^+ + c^- x^- + c^\alpha \quad \forall \alpha \in H \quad (4.10)$$

Avec :

c^α : coût engagé pour remettre en marche le système manufacturier.

$$c^\alpha = c_r \text{ind}\{\gamma(t) = 2, 3, 4, 6, \dots, 12\} + c_p \text{Ind}\{\gamma(t) = 5\} \quad (4.11)$$

Les activités de maintenance corrective et de maintenance préventive sont respectivement pénalisées par c_r et c_p .

L'objectif principal est de trouver une loi de commande optimale qui minimise le coût de production donné par la fonction coût total actualisée définie à l'équation (4.12).

$$J(x, a, u, \alpha) = E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, \alpha, u, a) dt / x(0) = x, \gamma(0) = \alpha \right\} \quad (4.12)$$

Où :

$E[B|A]$ est l'espérance mathématique de B sachant A.

ρ est le taux d'actualisation qui tient compte du flux monétaire (Garceau, 1996).

4.7 Conditions d'optimum et méthodes numériques

Soit $v(x, \alpha, a)$ la fonction valeur qui minimise le coût total actualisé. On a :

$$v(\alpha, x, a) = \inf_{u \in \Gamma(\alpha)} J(x, a, u, \alpha) \quad \forall \alpha \in H \quad (4.13)$$

La fonction valeur $v(\alpha, x, a)$ satisfait l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) donné par la relation (4.14). La solution est obtenue en résolvant l'équation différentielle (HJB) suivante :

$$\rho v(\alpha, x, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(\alpha)} \left[g(.) + ku \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial a} + (u - d) \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial x} + \sum_{\beta \in H} q_{\alpha\beta} v(\beta, x, \varphi(\gamma, a)) \right] \quad (4.14)$$

Où $\varphi(\gamma, a)$ représente la fonction permettant de réinitialiser l'âge de l'unité de ventilation locale.

$$\varphi(\gamma, a) = \begin{cases} 0 & \text{si } \gamma(\sigma^+) = 1 \text{ et } \gamma(\sigma^-) = 5 \\ a(\sigma^-) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.15)$$

Avec σ le premier temps de saut du processus $\gamma(t)$ (Rivera-Gómez et al., 2018). Cette équation permet de modéliser la maintenance préventive de type AGAN.

La résolution analytique de l'équation d'HJB n'étant pas existante, nous allons utiliser une approche numérique pour déterminer la commande optimale.

4.7.1 Approche numérique

Développée par Kushner et Dupuis (1992), cette approche a pour but de faire une approximation. La fonction valeur $v(\alpha, x, a)$ est approximée par la fonction $v^h(x, a, \alpha)$. Cette approximation se fait suivant les pas de discrétisation h_x et h_a .

$$\frac{\partial v(x, a, \alpha)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{v^h(x+h_x, a, \alpha) - v^h(x, a, \alpha)}{h_x} & \text{si } u - d \geq 0 \\ \frac{v^h(x, a, \alpha) - v^h(x-h_x, a, \alpha)}{h_x} & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.16)$$

Cette équation définit l'approximation de la fonction valeur faite suivant x .

Suivant l'âge, l'approximation de la fonction valeur s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial v(x, a, \alpha)}{\partial a} = \frac{v^h(x, a+h_a, \alpha) - v^h(x, a, \alpha)}{h_a} \quad (4.17)$$

En remplaçant ces deux approximations dans l'équation (4.14) et après simplification, on obtient :

$$v^h(x, \alpha, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^\alpha (1 + \rho/\Omega_h^\alpha)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^\alpha)} \left(\begin{aligned} &P_x^+(\alpha) v^h(x + h_x, \alpha, a) \\ &+ P_x^-(\alpha) v^h(x - h_x, \alpha, a) \\ &+ P_a(\alpha) v^h(x, \alpha, a + h_a) \\ &+ \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) v^h(x, \beta, a) \end{aligned} \right) \right] \quad (4.18)$$

Avec :

$$\Omega_h^\alpha = \frac{|u-d|}{h_x} + |q_{\alpha\alpha}| + \frac{ku}{h_a} \quad P_x^+(\alpha) = \begin{cases} \frac{u-d}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u - d \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$P_x^-(\alpha) = \begin{cases} \frac{d-u}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u - d < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad P^\beta(\alpha) = \frac{q_{\alpha\beta}}{\Omega_h^\alpha}$$

$$P_a(\alpha) = \frac{q_{\alpha\beta}}{\Omega_h^\alpha}$$

Notons que : $P_x^+(\alpha) + P_x^-(\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) + P_a(\alpha) = 1$

Au mode 1 on a :

$$v^h(x, 1, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(1)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^1(1+\rho/\Omega_h^1)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^1)} \begin{pmatrix} P_x^+(1)v^h(x+h_x, 1, a) \\ +P_x^-(1)v^h(x-h_x, 1, a) \\ +P_a(1)v^h(x, 1, a+h_a) \\ +P^2(1)v^h(x, 2, a) \\ +P^4(1)v^h(x, 4, a) \\ +P^5(1)v^h(x, 5, 0) \\ +P^9(1)v^h(x, 9, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.19)$$

Au mode 2 on a :

$$v^h(x, 2, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(2)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^2(1+\rho/\Omega_h^2)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^2)} \begin{pmatrix} P_x^-(2)v^h(x-h_x, 2, a) \\ +P^1(2)v^h(x, 1, a) \\ +P^3(2)v^h(x, 3, a) \\ +P^{12}(2)v^h(x, 12, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.20)$$

Au mode 3 on a :

$$v^h(x, 3, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(2)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^3(1+\rho/\Omega_h^3)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^3)} \begin{pmatrix} P_x^-(3)v^h(x-h_x, 3, a) \\ +P^2(3)v^h(x, 2, a) \\ +P^4(3)v^h(x, 4, a) \\ +P^{10}(3)v^h(x, 10, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.21)$$

Au mode 4 on a :

$$v^h(x, 4, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(4)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^4(1+\rho/\Omega_h^4)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^4)} \begin{pmatrix} P_x^-(4)v^h(x - h_x, 4, a) \\ +P^1(4)v^h(x, 1, a) \\ +P^3(4)v^h(x, 3, a) \\ +P^{11}(4)v^h(x, 11, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.22)$$

Au mode 5 on a :

$$v^h(x, 5, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(5)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^5(1+\rho/\Omega_h^5)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^5)} \begin{pmatrix} P_x^-(5)v^h(x - h_x, 5, a) \\ +P^1(5)v^h(x, 1, a) \\ +P^6(5)v^h(x, 6, a) \\ +P^7(5)v^h(x, 7, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.23)$$

Au mode 6 on a :

$$v^h(x, 6, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(6)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^6(1+\rho/\Omega_h^6)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^6)} \begin{pmatrix} P_x^-(6)v^h(x - h_x, 6, a) \\ +P^5(6)v^h(x, 5, a) \\ +P^8(6)v^h(x, 8, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.24)$$

Au mode 7 on a :

$$v^h(x, 7, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(7)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^7(1+\rho/\Omega_h^7)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^7)} \begin{pmatrix} P_x^-(7)v^h(x - h_x, 7, a) \\ +P^5(7)v^h(x, 5, a) \\ +P^8(7)v^h(x, 8, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.25)$$

Au mode 8 on a :

$$v^h(x, 8, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(8)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^8(1+\rho/\Omega_h^8)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^8)} \begin{pmatrix} P_x^-(8)v^h(x - h_x, 8, a) \\ +P^6(8)v^h(x, 6, a) \\ +P^7(8)v^h(x, 7, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.26)$$

Au mode 9 on a :

$$v^h(x, 9, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(9)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^9(1+\rho/\Omega_h^9)} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^9)} \begin{pmatrix} P_x^-(9)v^h(x - h_x, 9, a) \\ +P^1(9)v^h(x, 1, a) \\ +P^{11}(9)v^h(x, 11, a) \\ +P^{12}(9)v^h(x, 12, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.27)$$

Au mode 10 on a :

$$v^h(x, 10, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(10)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^{10}(1+\rho/\Omega_h^{10})} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^{10})} \begin{pmatrix} P_x^-(10)v^h(x - h_x, 10, a) \\ +P^3(10)v^h(x, 3, a) \\ +P^{11}(10)v^h(x, 11, a) \\ +P^{12}(10)v^h(x, 12, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.28)$$

Au mode 11 on a :

$$v^h(x, 11, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(11)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^{11}(1+\rho/\Omega_h^{11})} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^{11})} \begin{pmatrix} P_x^-(11)v^h(x - h_x, 11, a) \\ +P^4(11)v^h(x, 4, a) \\ +P^9(11)v^h(x, 9, a) \\ +P^{10}(11)v^h(x, 10, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.29)$$

Au mode 12 on a :

$$v^h(x, 12, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(12)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^{12}(1+\rho/\Omega_h^{12})} + \frac{1}{(1+\rho/\Omega_h^{12})} \begin{pmatrix} P_x^-(12)v^h(x - h_x, 12, a) \\ +P^2(12)v^h(x, 2, a) \\ +P^9(12)v^h(x, 9, a) \\ +P^{10}(12)v^h(x, 10, a) \end{pmatrix} \right] \quad (4.30)$$

Ces équations ont été programmées à partir de Matlab. Les données numériques de simulation sont présentées à la section suivante.

4.7.2 Exemple numérique

Cette section est consacrée à la résolution numérique des équations d'HJB afin de déterminer la loi de commande optimale recherchée. L'approche utilisée est la même que celle développée au chapitre 3.

Soit D , le domaine définit par:

$$D = \{(x, a): -15 \leq x \leq 45; 0 \leq a \leq 160\}$$

La figure 4.4 représente le taux de panne défini à l'équation (4.5). Avec : $A_0 = 10^{-4}$, $A_t = 0.01$, $K = 5 \times 10^{-6}$. Ces données proviennent de Ouaret et al (2015).

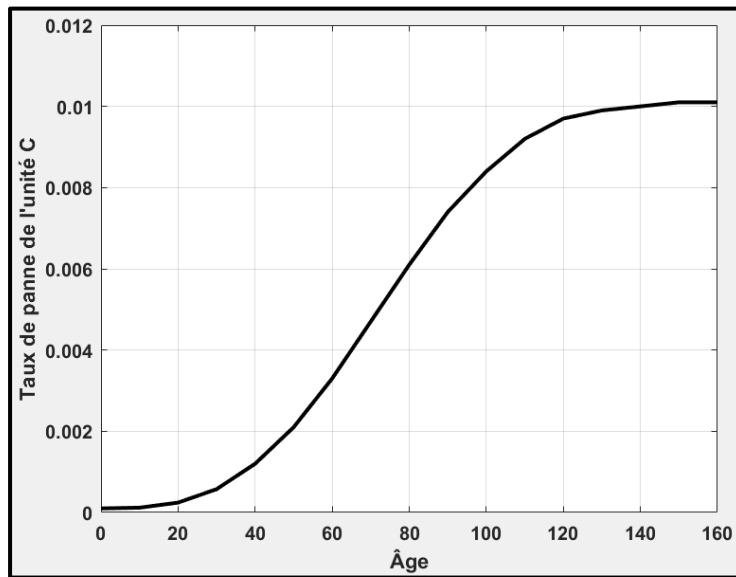


Figure 4.4 Taux de panne en fonction de l'âge de l'unité de ventilation

La figure 4.5 illustre l'évolution de la concentration des particules de silices émises à la source définie à l'équation 4.6. Avec : $e_0 = 0.01$, $e_l = 0.05$, $E = 10^{-10}$. Ces valeurs ont été générées en fonction de la valeur limite d'exposition proposée par OSHA. Nous nous sommes inspirés de Rivera-Gómez et al. (2020).

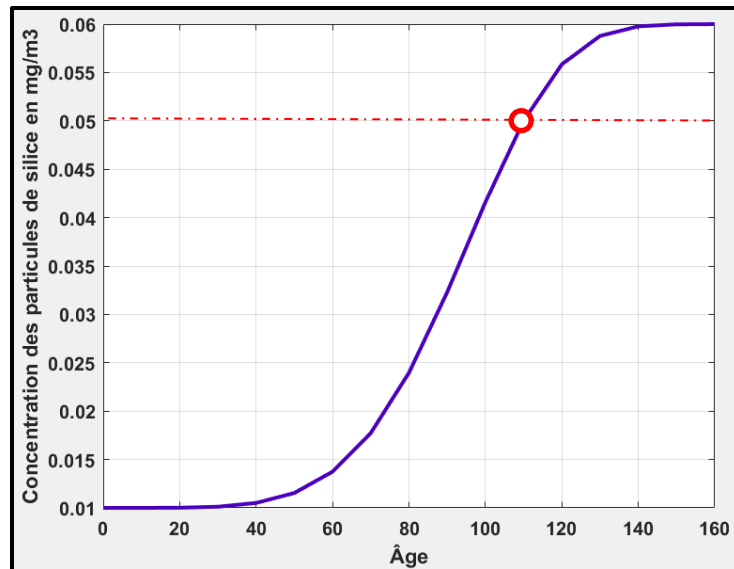


Figure 4.5 Concentration des particules de silice en fonction de l'âge de l'unité de ventilation

La valeur en rouge 0.05 mg/m^3 désigne la limite de concentration à ne pas dépasser (limite établie par OSHA).

Les données du problème sont portées au tableau suivant :

Tableau 4.2 Données numériques

Variables	c^+	c^-	c_p	c_r	u_{max}	d
Valeur	5	80	350	5000	0.5	0.45
Unités	\$/produit/ut	\$/produit/ut	\$/ut	\$/ut	Produit/ut	Produit/ut
Variables	q_{15}^{min}	q_{15}^{max}	q_{51}	ρ	e_{lim}	W
Valeur	10^{-6}	1	0.1	0.01	0.05	10
Unités	/ut	/ut	/ut	-	mg/m^3	-

Après programmation et simulation, nous avons obtenu des résultats qui seront présentés à la section suivante.

4.8 Analyse des résultats

- **Taux de production**

La figure 4.6 représente la politique de contrôle de production du système manufacturier.

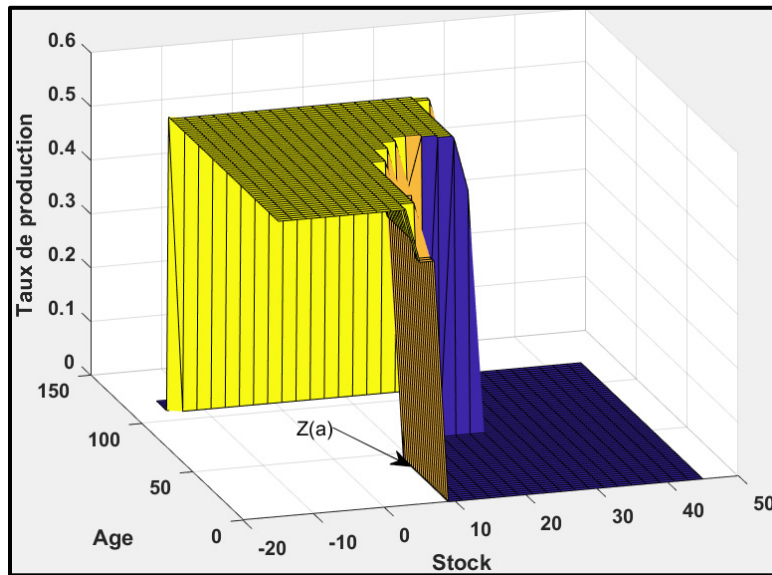


Figure 4.6a Taux de production du système

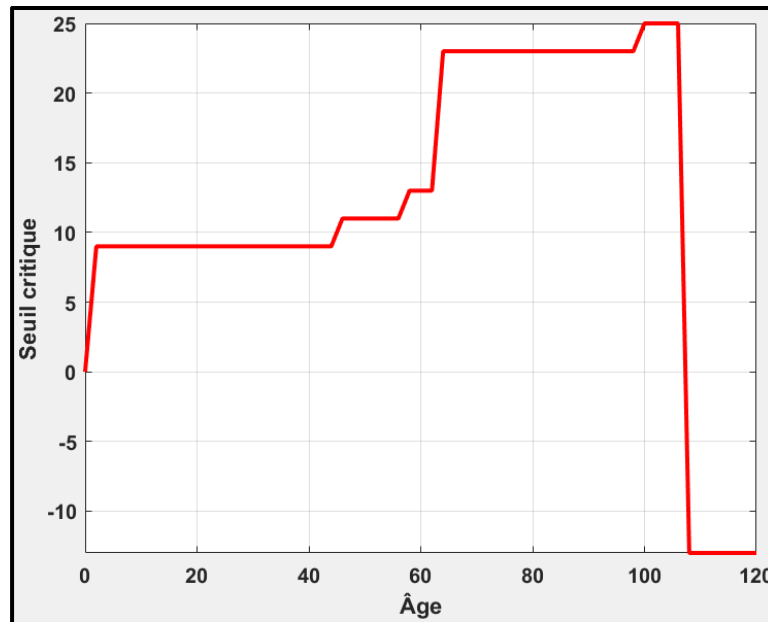


Figure 4.6b Seuil critique en fonction de l'âge
du système de ventilation

Cette politique (figure 4.6a) montre qu'il n'est pas nécessaire de produire lorsqu'on a un niveau de stock confortable de produits finis. Dans ce cas, le taux de production est mis à zéro, ce qui signifie que le système de production est en arrêt. Au fur et à mesure que la machine produit, elle prend de l'âge. Ceci augmente sa probabilité de tomber en panne et réduit le temps de disponibilité du système de production. Cette situation peut être à l'origine d'une pénurie de produits finis. Pour remédier à ce problème, le modèle suggère d'augmenter le seuil critique en fonction de l'âge de la machine pour permettre d'avoir un stock de sécurité au cas où on a une défaillance d'un équipement. Le seuil critique étant fonction de l'âge ($Z(a)$) : voir figure 4.6b), la politique proposée est de produire au taux maximal lorsqu'on est en dessous du seuil critique; d'arrêter la production lorsqu'on est au-dessus de ce seuil et de produire à la demande si le stock est égal au seuil critique. Cette politique qui s'assimile à la politique à seuil critique (hedging point policy) est une extension de celle développée dans Akella et Kumar (1986). Ainsi, le contrôle de la production est donné par :

$$u(x, a, 1) = \begin{cases} u_{max} & \text{si } x(t) < Z(a) \\ d & \text{si } x(t) = Z(a) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.31)$$

Où $Z(a)$ est une fonction qui dépend de l'âge et donne la valeur optimale du seuil critique par rapport à chaque valeur de l'âge de l'unité de ventilation.

L'équation (4.31) représente la politique optimale de production à adopter et s'interprète de la manière suivante :

- ❖ La machine produit au maximum lorsque le niveau de stock est inférieur au seuil critique qui est une fonction de l'âge.
- ❖ La machine produit au taux de la demande lorsque le niveau de stock est égal au seuil critique qui est fonction de l'âge.
- ❖ La machine ne produit pas quand le niveau de stock est supérieur au seuil critique.

La trace $Z(a)$ présentée à la figure 4.6b a une structure en escalier dû au fait que la probabilité de tomber en panne augmente avec l'âge de l'équipement; par conséquent plus l'unité prend de l'âge plus il est probable qu'une panne survienne. Pour remédier à ce problème, l'une des solutions est d'effectuer une maintenance préventive de type AGAN (As Good As New).

- **Maintenance préventive**

La politique de maintenance préventive à adopter est représentée à la figure 4.7. Elle est subdivisée en trois zones: la zone A, la zone B et la zone C.

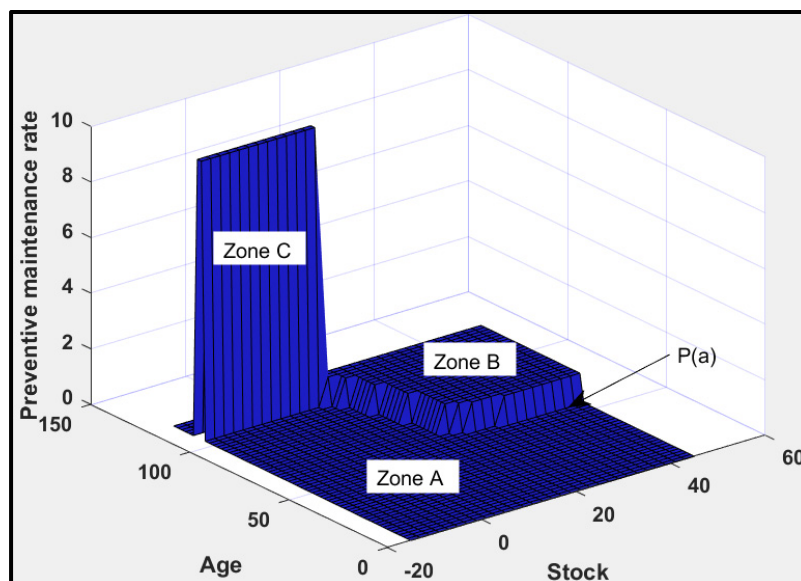


Figure 4.7 Taux d'envoi en maintenance préventive

La zone A correspond à la période où il n'est pas nécessaire d'envoyer l'équipement en maintenance préventive. En effet, dans cette zone, nous avons une région où l'unité de ventilation se trouve à l'état neuf. Par conséquent, elle est capable de satisfaire la demande avec une probabilité de panne très faible. Une autre région de cette même zone montre qu'il ne faut pas envoyer la machine en maintenance quand le stock des produits finis est négatif (sauf exception : zone C) malgré le fait que l'âge de la machine est quand même avancé. Étant donné que le stock dans cette partie est négatif, le temps moyen que les techniciens vont prendre à faire la maintenance causera des pertes.

Dans la zone B, on constate que l'âge de la machine augmente et le modèle s'assure d'avoir un inventaire confortable avant d'envoyer le système en maintenance préventive. En fait, l'unité de ventilation a besoin d'être remise à neuf pour pouvoir augmenter sa durée de vie pour continuer à satisfaire la demande des clients et la limite d'exposition imposée par l'organisme OSHA.

La zone C quant à elle représente la contrainte liée à la limite de concentration des particules de silices prévues par la réglementation. Lorsque le système est en production, il émet des

particules de silice qui vont être captées en partie par le système de protection mise en place. Les particules non captées sont celles qui sont nocives pour la santé des travailleurs si elles sont ingérées. Lorsque le système de production prend de l'âge, la concentration des particules dans l'air de travail augmente également (voir figure 4.5) à cause de la dégradation des équipements du système. Quand la concentration atteint la limite prévue par la loi ($0,05\text{mg/m}^3$: limite établie par l'organisme OSHA), on doit arrêter la production immédiatement et faire rapidement la maintenance pour remettre à neuf l'unité de captation. Dans le cas étudié, lorsqu'on atteint la concentration limite et qu'on a un stock négatif, il est impératif d'envoyer rapidement le système en maintenance préventive raison pour laquelle la décision se fait avec un taux maximal de 10 c'est-à-dire 0.1 unité de temps. Cette valeur vient du fait qu'il faut intégrer un paramètre au modèle qui permet de transiter rapidement du mode production vers le mode maintenance préventive lorsque la limite d'exposition est atteinte. Notons que cette valeur de 10 est plus grande que le taux maximal d'envois en maintenance préventive (voir tableau 4.2); ceci à cause de l'urgence d'arrêter la production pour assurer la santé des employés et respecter la réglementation afin d'éviter une quelconque pénalité pouvant même conduire dans certains cas à la fermeture de l'entreprise.

La figure 4.8 permet de bien illustrer cette politique de maintenance préventive. Elle met dans un même graphe la trace $Z(a)$ obtenue grâce à la figure 4.6 et la trace $P(a)$ obtenue à partir de la figure 4.7. La rencontre entre la trace du seuil critique de production $Z(a)$ et celle de la maintenance préventive $P(a)$ définit ce qu'on appelle ici la zone réalisable notée zone D. Elle est en réalité la zone où a lieu la maintenance préventive de l'équipement. Le point h qui est le point de rencontre entre $Z(a)$ et $P(a)$ désigne ici l'âge et le stock recommandé pour effectuer la maintenance préventive.

La politique de maintenance peut donc s'écrire comme suit :

$$w_p = \begin{cases} w_{max} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone D} \\ w_{max} + W \text{Ind}\{e(.) \geq e_{lim}\} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone C} \\ w_{min} & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.32)$$

Où $e(.)$ représente la concentration des particules dans l'air exprimée par l'équation (4.6) et e_{lim} la valeur limite prévue par la loi (OSHA).

$$Ind\{P(.)\} = \begin{cases} 1 & \text{si } P \text{ est vraie} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.33)$$

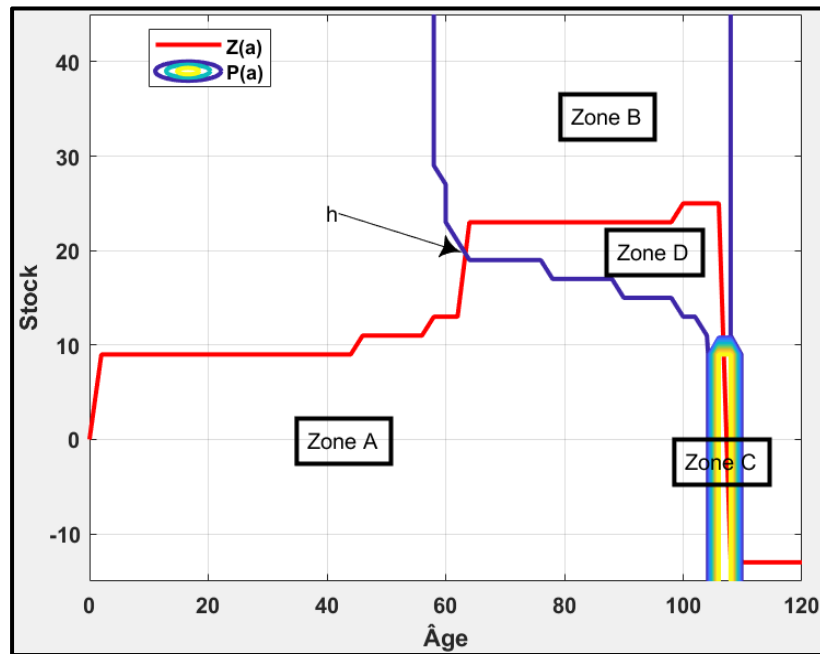


Figure 4.8 Trace du seuil de production et de maintenance préventive

Afin de confirmer la solidité du modèle développé, il est important de faire une analyse de sensibilité.

4.9 Analyse de sensibilité

Cette analyse de sensibilité consiste à faire varier quelques paramètres du modèle afin d'évaluer leurs impacts. La confirmation du modèle devra donc découler des résultats obtenus suite à la variation des données considérées. Le coût de mise en inventaire, le coût de rupture de stock et le coût de maintenance préventive sont quelques paramètres sur lesquels on va s'appuyer pour faire l'analyse de sensibilité.

4.9.1 Variation du coût de rupture de stock

Les résultats de la variation du coût de pénurie sont présentés à la figure 4.9. Les différentes valeurs prises par c^- sont 20, 70 et 250. Cette figure permet de voir que l'augmentation du coût de pénurie conduit à une augmentation du seuil critique. Ceci s'explique par le fait que la rupture de stock va pénaliser le coût de production; il faut par conséquent augmenter le niveau d'inventaire pour éviter toute rupture de stock. Dans ce cas, pour rentabiliser les dépenses de l'entreprise, le gestionnaire de production doit prévoir un stock qui tient compte du coût de pénurie. En ce qui concerne la maintenance préventive, l'observation faite à ce niveau est que l'augmentation du coût de pénurie pousse le système à plus produire (au taux maximal) pour avoir un stock confortable; ce qui conduit à un vieillissement accru du système de production. Par conséquent, plus le coût de pénurie est élevé, plus vite le système va s'user. Ainsi, la maintenance préventive se fera plutôt ($a(h_3) < a(h_2) < a(h_1)$).

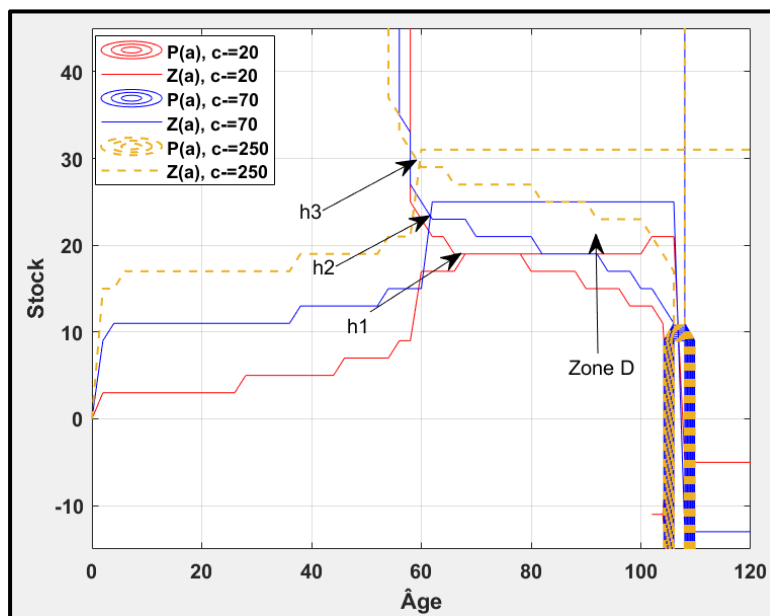


Figure 4.9 Variation du coût de pénurie

4.9.2 Variation du coût de mise en inventaire

La figure 4.10 présente la variation du coût de mise en inventaire c^+ . Les valeurs attribuées à c^+ pour cette analyse sont 5, 10 et 15. On peut s'en doute voir sur ce graphe que lorsqu'on augmente le coût de mise en inventaire, le système stock moins de produits finis. En effet, si l'entreprise veut minimiser son coût de production, le gestionnaire se doit de moins stocker lorsque le coût de mise en inventaire est élevé. Par ailleurs, lorsque c^+ augmente, on remarque que la maintenance préventive se fait plutôt. La raison à ça vient du fait que si on a un coût de mise en inventaire dispendieux, alors il n'est pas intéressant d'avoir beaucoup de produits en inventaire; car cela augmenterait les dépenses de l'entreprise. Dans ce cas, le système passe moins de temps en production. Ainsi, la planification de la maintenance préventive se fera plutôt afin d'assurer que la mise en fonctionnement de l'équipement au moment voulu ne pose pas de problème à la production.

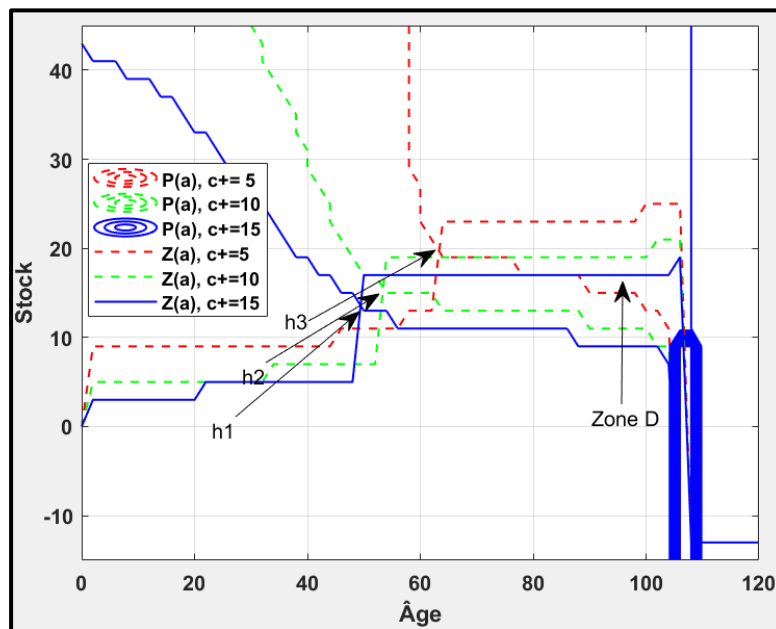


Figure 4.10 Variation du coût de mise en inventaire

par l'organisme responsable. Cela dit, nous avons trouvé judicieux de faire une variation de ce paramètre pour souligner la capacité du modèle à s'accommoder à n'importe quelle réglementation. Les différentes limites utilisées pour cette analyse sont celles inscrites au tableau 1.1 de la revue de littérature (0.025 mg/m^3 , 0.05 mg/m^3 , 0.1 mg/m^3). On remarque que la zone couverte par la maintenance préventive se réduit au fur et à mesure qu'on réduit la limite d'exposition. Par conséquent, plus la limite d'exposition est stricte, plus il faut faire régulièrement de la maintenance préventive pour assurer l'efficacité de l'équipement responsable de la réduction de poussières. Lorsque le manufacturier est soumis à une réglementation sévère, il doit fréquemment faire l'entretien préventif de ses équipements pour respecter la limite d'exposition prévue par la loi en vigueur. Cependant, si l'entreprise opère avec une limite d'exposition souple, elle dispose d'un peu plus de temps avant d'effectuer la maintenance préventive.

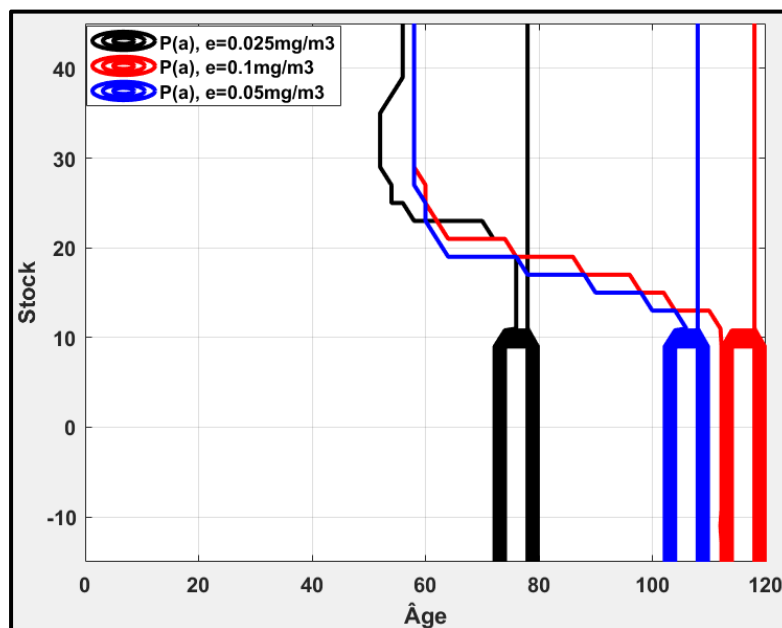


Figure 4.12 Variation de la limite de concentration de silice cristalline

L'analyse de sensibilité que nous venons d'effectuer nous a permis de voir comment le système se comporte lorsque certains paramètres comme le coût de mise en inventaire, de rupture de stock et de maintenance préventive venaient à varier. Il en ressort clairement que le modèle propose de moins stocker les produits finis lorsque le coût de mise en inventaire augmente. En revanche, ce modèle propose des seuils critiques plus grands lorsque le coût de rupture de stock venait à croître. Pour ce qui est de la maintenance préventive, lorsque le coût de maintenance préventive venait à être dispendieux, le modèle recommandait de moins en moins l'entretien préventif. Tous ces résultats obtenus montrent bien que le modèle développé est réaliste.

Le système manufacturier que nous venons d'étudier est défini par un processus stochastique $(\gamma(t), t > 0)$ dont la modélisation a été faite par une chaîne de Markov non homogène à 12 modes. En fait, ces 12 modes peuvent se résumer à trois modes à savoir :

- Le mode où le système est en production;
- Le mode où le système est en maintenance préventive;
- Le mode où le système est en réparation.

Ce système peut être également modélisé par une chaîne de Markov non homogène à 3 modes. C'est ce que nous allons faire dans la suite de ce travail et nous allons terminer par une comparaison avec le modèle qu'on vient de développer (12 modes).

4.10 Modélisation du système à 3 modes d'une unité de transformation du granit soumis à la contrainte de limitation d'exposition aux particules de silice.

Dans cette section, nous n'allons pas effectuer les étapes de modélisation comme dans le cas précédent, mais nous invitons le lecteur à consulter l'annexe II pour plus de détails. Cela dit, nous allons passer directement à l'exemple numérique.

4.10.1 Exemple numérique

Les valeurs numériques utilisées sont présentées au tableau suivant.

Tableau 4.3 Données numériques (système à 3 modes)

Variables	c^+	c^-	c_p	c_r	u_{max}	d
Valeur	5	80	50	5000	0.5	0.45
Unités	\$/produit/ut	\$/produit/ut	\$/ut	\$/ut	Produit/ut	Produit/ut
Variables	q_{13}^{max}	q_{13}^{min}	q_{31}	ρ	e_{lim}	W
Valeur	10^{-6}	1	0.1	0.01	0.05	10
Unités	/ut	/ut	/ut	-	mg/m^3	-

4.10.2 Analyse des résultats

- Taux de production

La figure 4.13 illustre la politique de production à adopter pour le système à 3 modes. Du fait de la dégradation du système de production, on remarque que le seuil critique de la politique de production est fonction de l'âge. Ce seuil augmente lorsque l'âge du système manufacturier augmente également. En effet, les activités de production conduisent à la dégradation des équipements; ce qui accroît la probabilité d'avoir une défaillance. Pour pallier ce problème, l'entreprise se doit donc d'augmenter le stock de produits finis lorsque le système de production prend de l'âge; ceci dans le but de pouvoir satisfaire la demande des clients en cas de panne. Ceci est également valable pour le système à 12 modes.

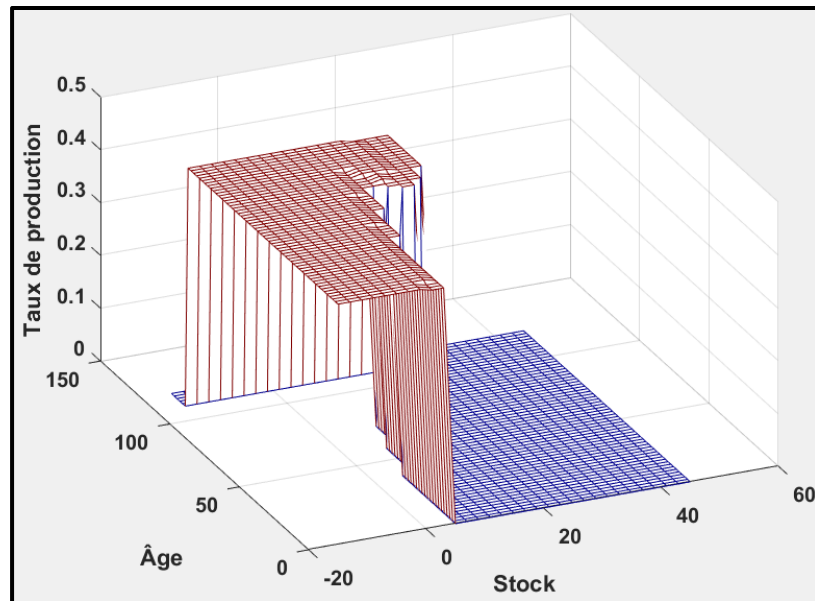


Figure 4.13 Politique de production pour le système à 3 modes

- **Taux d'envoi en maintenance préventive**

Elle se subdivise en trois zones comme le montre la figure 4.14.

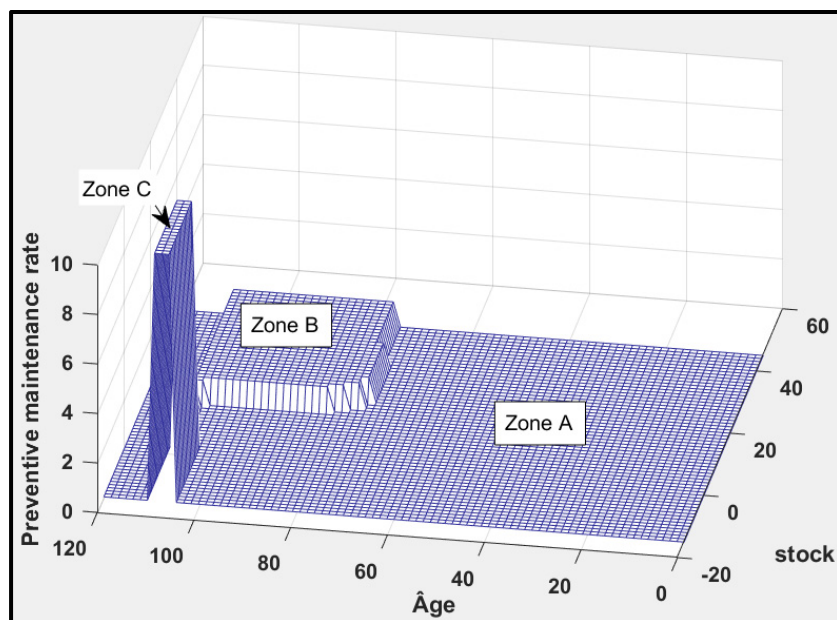


Figure 4.14 Politique de maintenance préventive pour le système à 3 modes

Dans la zone A, le système produit avec une faible probabilité de défaillance raison pour laquelle on n'a pas besoin de faire de la maintenance dans cette région. Cela est dû au fait que le système de production est encore neuf. À la zone B, on se rassure d'avoir un stock confortable de produits finis avant de procéder à l'entretien préventif du système. La zone C est le résultat de la limite de concentration des particules de silice cristalline prévue par la loi. Cette politique de maintenance préventive reste valide dans le cas d'un système à 12 modes.

Pour vérifier la robustesse du modèle développé, nous allons faire une analyse à la section suivante.

4.10.3 Analyse de sensibilité

Dans cette partie, on a fait varier les paramètres tels que : le coût de mise en inventaire c^+ et le coût de pénurie c^- .

- Variation du coût de mise en inventaire

L'impact dû à la variation du coût de mise en inventaire est illustré à la figure 4.15. Ce graphe montre qu'il faut augmenter le stock quand le coût de mise en inventaire est moins élevé. Afin de rentabiliser ses investissements, le gestionnaire de production doit augmenter son stock de produits finis lorsque le coût de mise en inventaire diminue.

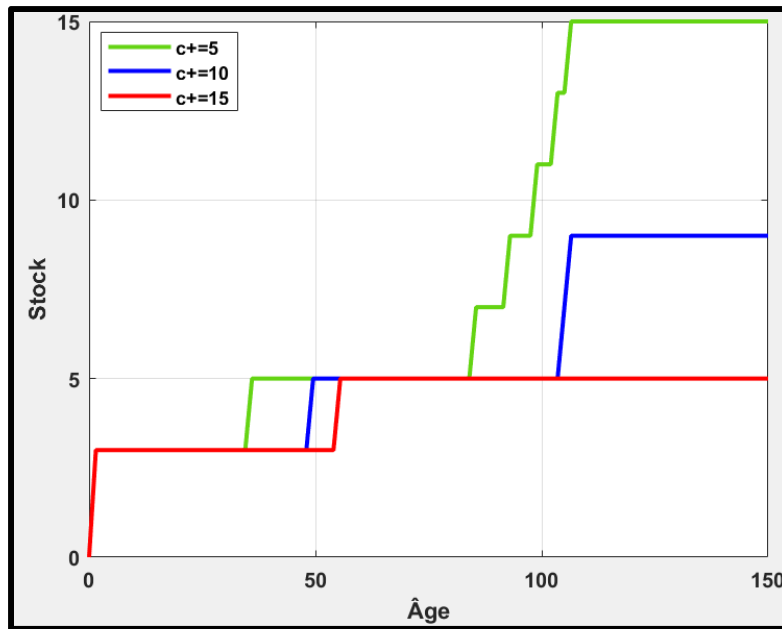


Figure 4.15 Variation du coût de mise en inventaire
du système à 3 modes

- Variation du coût de pénurie

La figure 4.16 représente la variation du coût de pénurie et son effet sur la politique de production. Sur cette figure on peut voir que l'augmentation du coût de pénurie entraîne une croissance du seuil critique. L'explication apportée à cela est que le manque de produits finis pénalise fortement l'entreprise. Elle se doit donc d'augmenter le stock de produits finis afin d'éviter toute rupture.

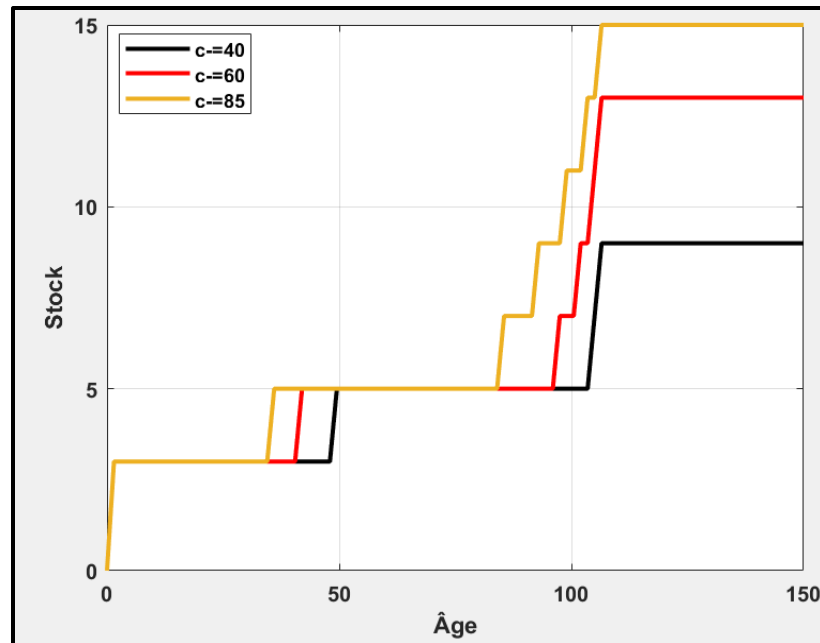


Figure 4.16 Variation du coût de pénurie du système à 3 modes

4.11 Conclusion

La transformation du granit nécessite de prendre plusieurs dispositions pour limiter le contact entre l'opérateur et les particules émises. Pour cela, nous avons implémenté dans la chaîne de production, les recommandations faites par plusieurs organismes en occurrence la CNESST. C'est ainsi que nous avons intégré dans le système de production une unité de lubrification et une unité de ventilation locale. L'ensemble constitue le système manufacturier défini par un processus stochastique dont la modélisation s'est faite par la chaîne de Markov non homogène. Après avoir décrit tous les paramètres du système, nous l'avons modélisé afin d'établir la commande optimale qui minimise le coût de production. Pour y arriver, nous avons dû contrôler le taux de production et le taux d'envois en maintenance préventive. La politique obtenue était une politique à seuil critique (HPP). Par une analyse de sensibilité faite, nous avons vu l'impact de différents paramètres sur la politique obtenue ce qui nous a permis de confirmer les résultats issus de la modélisation. À la fin de ce chapitre, nous avons simplifié le système considéré en début de chapitre en un système à 3 modes. En s'appuyant sur les résultats obtenus, il en ressortait que la stratégie de production et de maintenance établie pour

un système à 12 modes était similaire à celui de 3 modes. C'est d'ailleurs ce système à 3 modes que nous allons adopter pour la suite du travail.

En industrie, pour faire une quelconque maintenance sur un équipement de production, il faut appliquer la norme canadienne CSA Z460-20. Cette dernière recommande de procéder à un cadenassage lors d'une intervention dans le but maîtriser toutes énergies dangereuses. L'intégration de ce concept (cadenassage) dans la modélisation du système de production fera donc l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 5

MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE UNITÉ DE TRANSFORMATION DE GRANIT AVEC CADENASSAGE

5.1 Introduction

Le présent chapitre traite le cas de la commande optimale d'une usine de transformation de granit en tenant compte conjointement de la production, de la maintenance et du cadenassage. Comme mentionné dans le chapitre précédent, nous allons considérer le système décrit par un processus stochastique dont la dynamique est définie par 3 modes. La planification de la production doit tenir compte des activités telles que la maintenance, la production ou encore la santé et la sécurité au travail. Dans un rapport publié par la CNESST en 2016, on dénombre en moyenne au Québec, 1000 accidents de travail dont 4 décès. Ces accidents sont imputables aux activités comme les travaux d'entretien, de réparation ou d'installation. Pour résoudre ce problème, l'association canadienne de normalisation a institué la norme CSA Z460-20. Cette mesure vise à cadenasser l'équipement sur lequel on fait l'entretien afin d'isoler toutes énergies capables de provoquer des dommages. Tout ceci a donc suscité l'intérêt d'intégrer cette activité dans la planification de la production des blocs de granit. Pour ce fait, nous allons subdiviser le travail en trois étapes :

- Modéliser l'unité de production basée sur la théorie des commandes stochastique en utilisant la chaîne de Markov non homogène.
- Résoudre numériquement les équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman afin de déterminer la loi de commande optimale qui minimise le coût de production.
- Une analyse de sensibilité sera ensuite faite pour valider les résultats obtenus.

5.2 Formulation du problème

Le système initialement considéré est constitué de trois composantes comme nous l'avons vu précédemment qui suit chacune une dynamique. À ce système, sera intégré le cadenassage qui viendra ajouter deux autres modes à la dynamique de la chaîne de production. Ainsi, le système

manufacturier peut se trouver soit dans un état de production, soit en processus de cadenassage pour réparation soit ou pour maintenance préventive, soit dans un état de réparation ou de maintenance préventive. La dynamique du système est décrite par un processus stochastique $(\xi(t), t > 0)$, $\xi(t) \in A = (1, 2, 3, 4, 5)$.

Avec :

$\xi(t) = 1$ si le système est en production;

$\xi(t) = 2$ si le système est en cadenassage avant réparation;

$\xi(t) = 3$ si le système est en réparation;

$\xi(t) = 4$ si le système est en cadenassage avant la maintenance préventive;

$\xi(t) = 5$ si le système est en maintenance préventive.

Les différents états du système que nous venons de mentionner sont représentés par le diagramme de transition ci-dessous.

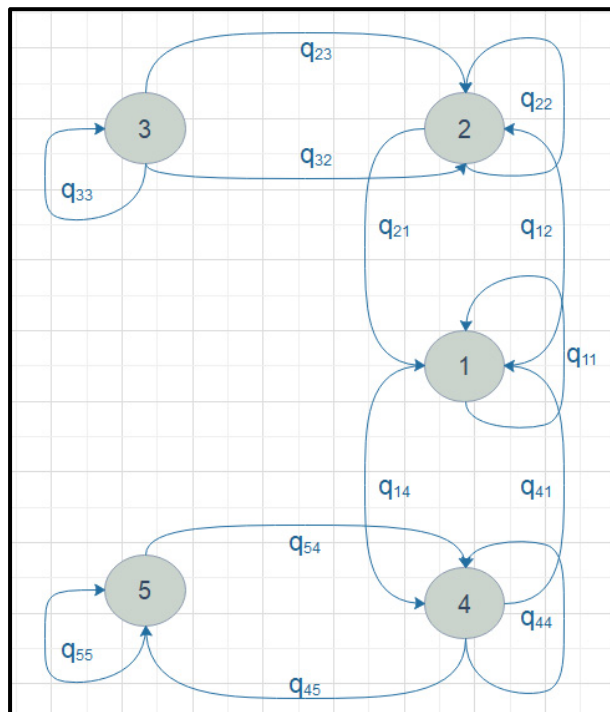


Figure 5.1 Diagramme de transition du système avec cadenassage

5.2.1 Matrice de taux de transition

La probabilité de transition d'un état α à un état β se définit de la manière suivante :

$$P[\xi(t + \delta t) = \beta / \xi(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}\delta t + o(\delta t) & \text{si } \alpha = \beta \end{cases} \quad \alpha, \beta \in A = (1,2,3,4,5) \quad (5.1)$$

$$\text{Avec } q_{\alpha\beta} > 0 \quad \forall \alpha \neq \beta \quad q_{\alpha\alpha} = -\sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} \quad \text{et} \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{o(\delta t)}{\delta t} = 0$$

La modélisation du processus stochastique de ce système manufacturier est faite par la chaîne de Markov non homogène définie par une matrice de transition de dimension 5×5 qui s'exprime de la manière suivante :

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & q_{12}(a(t)) & w_p(t) & 0 \\ 0 & q_{22} & w_{cr}(t) & 0 & 0 \\ q_{31} & 0 & q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & w_{cp}(t) \\ q_{51} & 0 & 0 & 0 & q_{55} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Où

$w_p(t)$ représente le taux d'envoi en maintenance préventive;

$w_{cr}(t)$ exprime le taux de cadenassage avant la réparation;

$w_{cp}(t)$ définit le taux de cadenassage avant la maintenance préventive.

$q_{12}(a(t))$ est le taux de défaillance en fonction de l'âge.

Ce taux se définit par l'équation (5.3). Elle met en relation le taux de panne et l'âge de l'équipement de protection (ventilation). La probabilité d'avoir une panne augmente avec l'âge.

$$q_{12}(a(t)) = A_0 + A_t(1 - \exp(K * a^3(t))) \quad (5.3)$$

Avec A_0 , A_t et K des constantes.

5.2.2 Domaine de commande admissible

Les variables de décisions du problème d'optimisation sont : le taux de production $u(t)$, le taux d'envois en maintenance préventive notée $w_p(t)$, le taux de cadenassage avant la

réparation $w_{cr}(t)$ et le taux de cadénassage avant la maintenance préventive $w_{cp}(t)$. Soit $\Gamma(\alpha)$ l'ensemble des commandes admissibles, les valeurs possibles que peuvent prendre nos différentes variables de décision sont définis de la manière suivante:

$$\Gamma(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} (u(.), w_p(.), w_{cp}(.), w_{cr}(.)) \in R^4 / 0 \leq u(.) \leq u_{max}, \\ w_p^{min} \leq w_p(.) \leq w_p^{max}, w_{cr}^{min} \leq w_{cr}(.) \leq w_{cr}^{max}, w_{cp}^{min} \leq w_{cp}(.) \leq w_{cp}^{max} \end{array} \right\} \quad (5.4)$$

5.2.3 Condition de faisabilité

Soit $\pi_i = (\pi_1, \dots, \pi_5)$ le vecteur de probabilité limite et $Q(.)$ la matrice du taux de transition du processus stochastique décrit par la chaîne de Markov. Les probabilités π_i sont obtenu en résolvant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \pi_i(.) * Q(.) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \text{ où } n = 5 \end{cases} \quad (5.5)$$

La faisabilité du système de production sur un horizon infini stipule que la demande des clients doit être satisfaite. Sachant que le seul mode où le système est en production est le mode 1, la condition de faisabilité du problème se formule donc de la manière suivante :

$$\pi_1 \times u_1^{max} \geq d \quad (5.6)$$

Cette relation n'est vraie si et seulement si la matière première est infinie.

5.2.4 Dynamique continue

Au cours de la production, l'état du stock s'évalue par l'équation traduisant la dynamique du stock. Cette dynamique dépend du taux de production et du taux de demande. Soit $x(t)$ le stock, $a(t)$ l'âge de l'unité de ventilation, d le taux de la demande et $u(t)$ le taux de production. La dynamique continue du stock et de l'âge est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u(t) - d & x(0) &= x \\ \frac{da}{dt} &= f(u(t)) & a(T) &= 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.2.5 Coût instantané et coût total actualisé

Soit $g(x, \alpha, u, a)$ la fonction coût instantanée, on a :

$$g(x, \alpha, u, a) = c^+ x^+ + c^- x^- + c^\alpha \quad \forall \alpha \in A \quad (5.8)$$

Le coût c^α est encouru lorsque le système n'est pas en opération et s'exprime de la façon suivante :

$$c^\alpha = c_p \text{ind}\{\xi(t) = 5\} + c_r \text{Ind}\{\xi(t) = 3\} + c_{cad} \text{Ind}\{\xi(t) = 4, 2\} \quad (5.9)$$

$$\text{Ind}\{P(.)\} = \begin{cases} 1 & \text{si } P(.) \text{ est vraie} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec c_p le coût de la maintenance préventive, c_r le coût de la réparation et c_{cad} le coût du cadénassage.

L'objectif du travail est de contrôler le taux de production $u(.)$, le taux de maintenance préventive, le taux de cadénassage avant réparation et le taux de cadénassage avant la maintenance préventive pour ainsi minimiser le coût total actualisé noté $J(x, a, u, \alpha)$ et défini comme suit :

$$J(x, a, u, \alpha) = E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, \alpha, u, a) dt / x(0) = x, \xi(0) = \alpha \right\} \quad (5.10)$$

Où :

$E[B|A]$ est l'espérance mathématique de B sachant A.

ρ est le taux d'actualisation qui tient compte du flux monétaire.

5.2.6 Condition d'optimum

La détermination d'une loi de commande optimale passe par la fonction valeur qui est solution des équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) lorsque les conditions optimales sont appliquées. Dans la plupart des travaux, notamment celui de Rivera-Gómez et al. (2018), la méthode numérique basée sur l'approche de Kushner et Dupuis (1992) a été utilisée pour résoudre ce problème d'optimisation. La fonction valeur $v(\alpha, x, a)$ du problème d'optimisation est définie par :

$$v(\alpha, x, a) = \inf_{u \in \Gamma(\alpha)} J(x, a, u, \alpha) \quad \text{avec } \alpha \in A = (1, 2, 3, 4, 5) \quad (5.11)$$

La fonction valeur définie à l'équation (5.11) satisfait l'équation d'HJB à l'optimum. Ainsi, pour obtenir la loi de commande optimale, il nous suffit de résoudre l'équation d'HJB.

$$\rho v(\alpha, x, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(\alpha)} \left[g(.) + ku \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial a} + (u - d) \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial x} + \sum_{\beta \in A} q_{\alpha\beta} v(\beta, x, a) \right] \quad (5.12)$$

Comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, la fonction valeur qui est solution optimale des équations d'HJB doit être continue, différentiable et convexe (Ouaret et al., 2015).

5.3 Approche numérique

Pour résoudre le problème d'optimisation abordé dans ce chapitre, nous allons utiliser une approche numérique pour trouver la commande optimale qui minimise le coût de production. Cette approche numérique consiste à faire une approximation de la fonction valeur $v(\alpha, x, a)$ par $v^h(\alpha, x, a)$. Soit h_x et h_a les pas de discrétisation suivants le stock et l'âge de l'unité de protection (ventilation). L'approximation de la fonction valeur suivant le stock et l'âge est donnée respectivement par les équations (5.13) et (5.14).

$$\frac{\partial v(x, a, \alpha)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{v^h(x + h_x, a, \alpha) - v^h(x, a, \alpha)}{h_x} & \text{si } u - d \geq 0 \\ \frac{v^h(x, a, \alpha) - v^h(x - h_x, a, \alpha)}{h_x} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial v(x, a, \alpha)}{\partial a} = \frac{v^h(x, a + h_a, \alpha) - v^h(x, a, \alpha)}{h_a} \quad (5.14)$$

En remplaçant les équations (5.13) et (5.14) dans l'équation (5.12) on obtient :

$$v^h(x, \alpha, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^\alpha (1 + \rho/\Omega_h^\alpha)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^\alpha)} \left(\begin{array}{l} P_x^+(\alpha) v^h(x + h_x, \alpha, a) \\ + P_x^-(\alpha) v^h(x - h_x, \alpha, a) \\ + P_a(\alpha) v^h(x, \alpha, a + h_a) \\ + \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) v^h(x, \beta, a) \end{array} \right) \right] \quad (5.15)$$

Avec :

$$\Omega_h^\alpha = \frac{|u-d|}{h_x} + |q_{\alpha\alpha}| + \frac{ku}{h_a} \quad P_x^+(\alpha) = \begin{cases} \frac{u-d}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u - d \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$P_x^-(\alpha) = \begin{cases} \frac{d-u}{h\Omega_h^\alpha} & \text{si } u - d < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad P^\beta(\alpha) = \frac{q_{\alpha\beta}}{\Omega_h^\alpha}$$

$$P_a(\alpha) = \frac{q_{\alpha\beta}}{\Omega_h^\alpha} \quad \text{Notons que : } P_x^+(\alpha) + P_x^-(\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} P^\beta(\alpha) + P_a(\alpha) = 1$$

L'équation (5.15) est un ensemble d'équations qui dépend du mode du système de production.

Au mode 1 on a :

$$v^h(x, 1, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(1)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^1 (1 + \rho/\Omega_h^1)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^1)} \left(\begin{array}{l} P_x^+(1) v^h(x + h_x, 1, a) \\ + P_x^-(1) v^h(x - h_x, 1, a) \\ + P_a(1) v^h(x, 1, a + h_a) \\ + P^2(1) v^h(x, 2, a) \\ + P^4(1) v^h(x, 4, 0) \end{array} \right) \right] \quad (5.16)$$

Au mode 2 :

$$v^h(x, 2, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(2)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^2 (1 + \rho/\Omega_h^2)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^2)} \left(\begin{array}{l} P_x^-(2) v^h(x - h_x, 2, a) \\ P^3(2) v^h(x, 3, a) \end{array} \right) \right] \quad (5.17)$$

Au mode 3 :

$$v^h(x, 3, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(3)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^3 (1 + \rho/\Omega_h^3)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^3)} \left(\begin{array}{l} P_x^-(3) v^h(x - h_x, 3, a) \\ P^1(3) v^h(x, 1, a) \end{array} \right) \right] \quad (5.18)$$

Au mode 4 :

$$v^h(x, 4, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(4)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^4(1 + \rho/\Omega_h^4)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^4)} \begin{pmatrix} P_x^-(4)v^h(x - h_x, 4, a) \\ P^5(4)v^h(x, 5, a) \end{pmatrix} \right] \quad (5.19)$$

Au mode 5 :

$$v^h(x, 5, a) = \min_{u, w_p, w_{cp}, w_{cr} \in \Gamma(5)} \left[\frac{g(.)}{\Omega_h^5(1 + \rho/\Omega_h^5)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^5)} \begin{pmatrix} P_x^-(5)v^h(x - h_x, 5, a) \\ P^1(5)v^h(x, 1, a) \end{pmatrix} \right] \quad (5.20)$$

Toutes ces équations seront programmées dans le logiciel Matlab. Les données de simulation et l'analyse des résultats obtenus sont présentées à la section suivante.

5.4 Exemple numérique

Dans l'optique d'apporter une solution au problème, on se doit de résoudre les équations d'HJB développés précédemment; ceci afin de déterminer la politique de commande optimale. Pour ce fait, nous allons attribuer des valeurs à certains paramètres définis dans les précédentes équations. Nous utiliserons dans ce chapitre le domaine $D(x, a)$ défini dans le chapitre précédent.

Le taux de panne dépend de l'âge du système de production et s'exprime par l'équation (5.3) et se visualise sur la figure 4.4.

La concentration des particules de silice dans l'aire de travail se définit également de la même façon que dans le chapitre 4 et s'exprime par l'équation (4.6). La représentation de cette concentration en fonction de l'âge du système manufacturier est faite à la figure 4.5.

Les valeurs des paramètres de simulation sont résumées dans le tableau 5.1

Tableau 5.1 Donnée numérique de simulation

Variabes	c^+	c^-	c_p	c_r	u_{max}	d	Cad	q_{45}^{max}	q_{45}^{min}
Valeur	1	10	350	5000	0.5	0.45	450	0.75	0.2
Unités	\$/produit/ut	\$/produit/ut	\$/ut	\$/ut	Produit/ut	Produit/ut	\$/ut	/ut	/ut
Variabes	q_{14}^{min}	q_{14}^{max}	q_{51}	ρ	e_{lim}	W	q_{23}^{max}	q_{23}^{min}	q_{31}
Valeur	10^{-7}	1	0.1	0.01	0.05	10	0.45	0.15	0.13
Unités	/ut	/ut	/ut	-	mg/m^3	-	/ut	/ut	/ut

5.4.1 Analyse des résultats

▪ Le taux de production

La politique de production optimale du système manufacturier obtenue après simulation est portée à la figure 5.2.

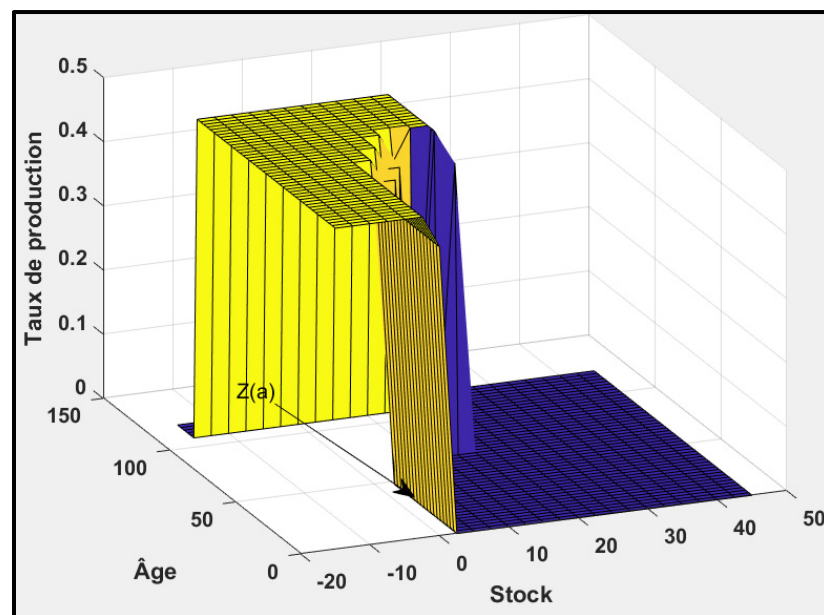


Figure 5.2 Taux de production

La production du système manufacturier étudié dans cette partie du travail est faite au mode 1 lorsque toutes les unités du système sont disponibles. La figure 5.2 présente une stratégie de production assez similaire à celle du chapitre précédent où l'on avait 12 modes. La différence entre ces deux cas se trouve au niveau du cadenassage. Dans le sens physique, cette mesure de prévention (cadenassage) est en fait un ajout de temps sur la durée prévue pour les activités de réparation et d'entretien. Ce surplus de temps peut-être la cause d'une rupture de stock si le gestionnaire ne prend pas en compte le cadenassage lorsqu'il planifie la production. Cela dit, la politique de production présentée à la figure 5.2 recommande d'augmenter le stock en fonction de l'âge de l'unité de ventilation pour couvrir la demande faite par les clients pendant que le système n'est pas disponible. Plus le système produit, plus la probabilité de tomber en panne augmente; d'où la nécessité de prévoir un inventaire adéquat en cas de défaillance. La politique de production de la figure 5.2 est une politique à seuil critique qui stipule de produire au taux maximum si le stock est inférieur au seuil critique; de produire à la demande si le stock est égal au seuil critique; et arrêter la production dans le cas où le stock est supérieur au seuil critique.

$$u(x, a, 1) = \begin{cases} u_{max} & \text{si } x(t) < Z(a) \\ d & \text{si } x(t) = Z(a) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.21)$$

Où $Z(a)$ est une fonction dépendant de l'âge de l'unité de captation et qui donne la valeur du seuil critique pour chaque valeur de l'âge.

▪ Le taux d'envois en maintenance préventive

Afin d'assurer l'efficacité de l'équipement de réduction de poussières ainsi que sa disponibilité, il est conseillé de faire un entretien préventif. Cette maintenance doit se faire selon une politique bien établie pour optimiser le coût de production. Cette politique est présentée à la figure 5.3.

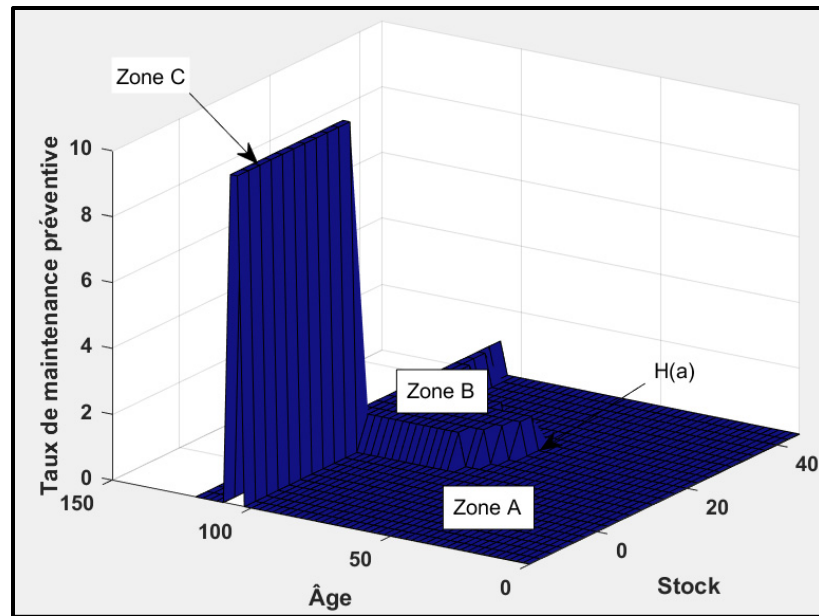


Figure 5.3 Taux d'envoi en maintenance préventive

La figure 5.3 présente une politique qui montre qu'il est important de faire la maintenance préventive lorsqu'on a un stock confortable et lorsque l'âge du système de production est avancé. Tout comme au chapitre 4, cette maintenance est subdivisée en trois grandes zones. Soit le système reste en production due à l'état neuf de l'équipement (zone A), soit on l'envoie en maintenance lorsque l'unité prend de l'âge (zone B); soit on arrête immédiatement la production parce qu'on a atteint la limite d'exposition aux particules de silice prévue par la loi (zone C). Par conséquent, la politique à adopter dans le cas de la maintenance préventive dépend de la zone où le système de production se trouve.

Soit $Z(a)$ la trace du seuil de production (figure 5.2), et $H(a)$ la trace de la politique de maintenance préventive (figure 5.3). L'intersection entre la trace de la politique de production et celle de la politique de maintenance préventive donne lieu à une zone appelée zone réalisable (zone D). Le point h qui est le point de rencontre entre les deux traces définit l'âge où il est recommandé de faire la maintenance préventive. La zone D de la figure 5.4 représente le niveau optimal (x^*, a^*) pour effectuer la maintenance. Cette maintenance n'est pas recommandée dans les trois cas suivants :

- Lorsqu'on est dans la zone A plus précisément au-dessus du seuil de production, l'équipement est neuf donc il n'est pas nécessaire de faire une maintenance.
- Si l'on se trouve dans la zone B au-dessus du seuil de la trace $Z(a)$, l'équipement de ventilation est vieux et le système dispose d'un bon stock, mais malheureusement, la dynamique du système se trouve dans la zone D.
- Dans la zone A en dessous du seuil de production, bien que le système prenne de l'âge, il n'est pas recommandé de faire la maintenance préventive. En effet, le stock étant négatif, il est conseillé de faire une réparation plutôt que la maintenance préventive. À ce stade, la maintenance préventive est plus coûteuse que la réparation.

Les zones D et C restent les seules zones admissibles à une maintenance préventive. La zone C est le résultat d'une maintenance due à la contrainte de limite d'exposition. Cette politique de maintenance se définit comme suit :

$$w_p = \begin{cases} w_{max} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone } D \\ w_{max} + W \text{Ind}\{e(.) \geq e_{lim}\} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone } C \\ w_{min} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.22)$$

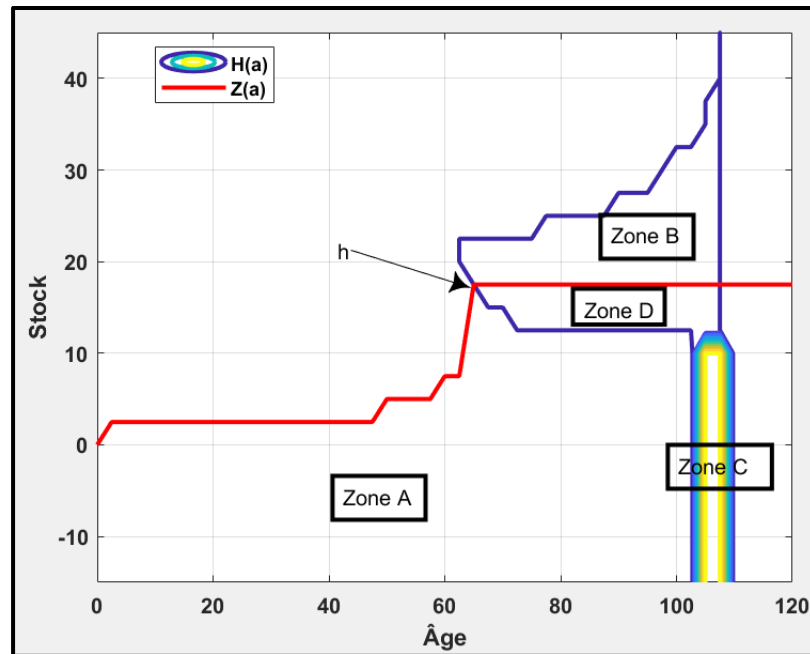


Figure 5.4 Trace du seuil de production et de maintenance préventive

Afin de faciliter la tâche au gestionnaire de production, nous avons dressé la figure 5.5. Pour ce fait, nous nous sommes basés sur la figure 5.4 qui combine les deux traces des différentes politiques obtenues. La figure 5.5 est un schéma d'implantation qui a pour but d'aider le manufacturier à prendre des décisions lorsque le système est soit en production, soit en maintenance préventive ou en réparation. Cette décision sera prise suivant le niveau de stock des produits finis et suivant l'âge de l'unité de ventilation permettant ainsi de déterminer le moment idéal pour effectuer la maintenance préventive. Étant donné que le stock et l'âge évoluent dans le temps, il est donc conseillé de mettre à jour continuellement l'information afin d'assurer l'efficacité des décisions prises.

Pour exploiter convenablement cet organigramme, le gestionnaire doit dans un premier temps déterminer si oui ou non l'âge de l'unité de ventilation est supérieur à 65 (âge du point de rencontre h défini à la figure 5.4). Si cet âge est bel et bien supérieur à 65, il doit dans un second déterminer si le stock de produits finis qu'il dispose est supérieur ou non au seuil

critique $Z(a)$. Dans le cas où la réponse est oui, la politique suggère d'arrêter la production ($u=0$) et de ne pas faire de maintenance préventive sur l'équipement. Dans le cas contraire, il faut vérifier si le stock qu'on dispose appartient oui ou non à la zone D. Si c'est le cas, on peut avoir soit une activité de maintenance soit une activité de production. En cas de production, le gestionnaire doit évaluer si le stock de produits finis est oui ou non égal au seuil critique avant de prendre la décision de produire au taux maximal ($u=u_{\max}$) ou à la demande ($u=d$). Si le stock de produits finis n'appartient pas à la zone D, il faut déterminer à quelle zone il appartient et ensuite adopter la politique qui convient. L'exercice consiste à évaluer chaque fois le cas où l'on se trouve et de déterminer la politique à mettre en place en suivant juste les lignes qui servent de connexion entre les différents blocs.

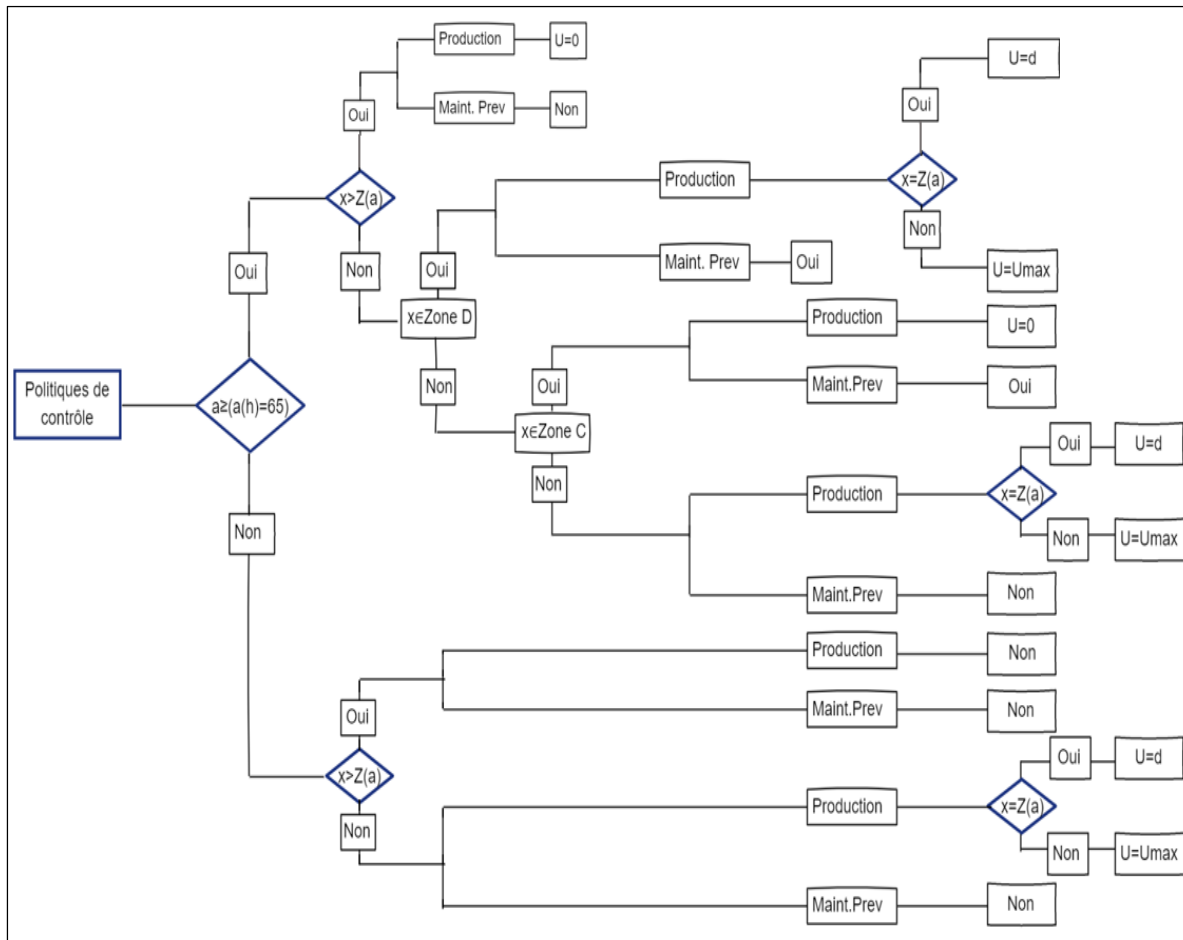


Figure 5.5 Schéma d'implantation proposé aux industriels

▪ **Taux de cadenassage avant la maintenance préventive**

La figure 5.6 représente la politique à suivre pour effectuer un cadenassage avant la maintenance préventive.

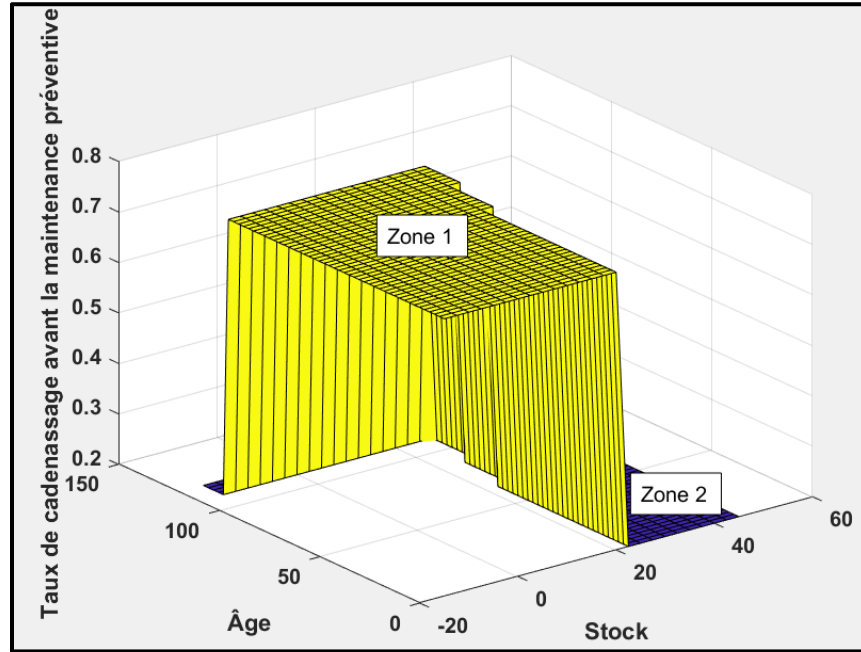


Figure 5.6 Taux de cadenassage avant la maintenance préventive

Cette figure montre que la politique de cadenassage avant la maintenance préventive est fonction du niveau d'inventaire et de l'âge de l'unité de captation. Lorsqu'on a un niveau de stock inférieur au seuil critique ($Z(a)$) donné par la politique de production à l'équation (5.21), alors il faut cadenasser au taux maximal afin d'éviter la pénurie en produits finis (zone 1). En revanche, si le niveau d'inventaire est supérieur à la valeur seuil critique ($Z(a)$) alors le personnel de la maintenance peut se permettre de prendre leurs temps pour cadenasser; dans ce cas ils le feront au taux minimal (zone 2). Cette politique de cadenassage se formule de la manière suivante :

$$w_{cp}(4, a, x) = \begin{cases} w_{cpmax} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone 1} \\ w_{cpmin} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.23)$$

▪ Taux de cadenassage avant la réparation

L'évolution dans le temps du taux de panne est décrite par l'équation (5.3). Plus le système de production prend de l'âge, plus il y'a des chances qu'il tombe en panne. En cas de défaillance, on se doit donc d'effectuer un cadenassage pour protéger les travailleurs qui s'occupent à remettre en marche le système manufacturier. C'est ainsi qu'une politique de cadenassage est proposé à la figure 5.7.

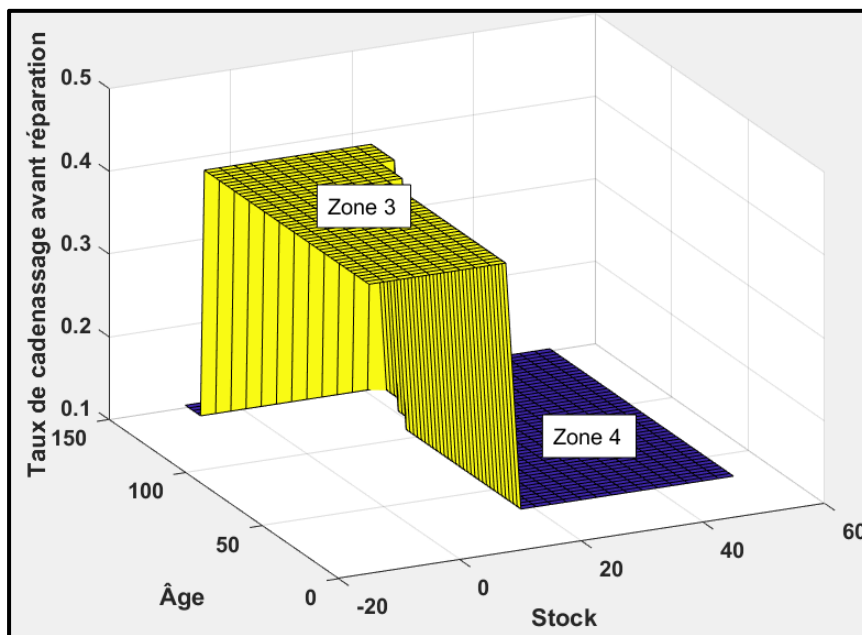


Figure 5.7 Taux de cadenassage avant la réparation

Cette figure propose la stratégie à adopter pour faire le cadenassage tout en gardant optimal le coût total de production. La politique de cadenassage avant réparation est similaire par son graphe à celle de la maintenance préventive. Elle dépend également du niveau de stock et de l'âge de l'unité de protection. Tout comme précédemment, lorsqu'on se trouve avec un stock moins confortable au risque d'avoir une pénurie, en cas de panne, on se doit de faire le cadenassage au taux maximal. En comparant ces deux méthodes de cadenassage, on s'aperçoit que le seuil optimal où on se décide de cadenasser au maximum ou au minimum est différent. En effet, le temps moyen pour effectuer la maintenance préventive est supérieur au temps moyen pour une réparation pour la simple raison que la maintenance préventive est une activité

planifiée. La figure 5.7 est constituée de deux grandes zones à savoir la zone 3 (cadenasser au taux maximal) et la zone 4 (cadenasser au taux minimal). La politique de cadenassage avant réparation se définit de la manière suivante :

$$w_{cr}(2, a, x) = \begin{cases} w_{crmax} & \text{si } (x(t), a(t)) \in \text{zone 3} \\ w_{crmin} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.24)$$

Afin de confirmer l'exactitude des résultats obtenus, nous nous devons de faire une analyse de sensibilité.

5.5 Analyse de sensibilité

Les résultats que nous avons obtenus précédemment ont permis d'établir la stratégie à adopter pour rendre bénéfique nos opérations de productions. Les résultats issus du modèle conçu ne pourraient être confirmés que si une analyse de sensibilité est faite. Cette analyse sera portée sur le taux de production, le taux d'envoi en maintenance préventive et enfin sur le taux de cadenassage avant la réparation et avant la maintenance préventive. Pour ce fait, nous allons fais varier le coût de rupture de stock, le coût de mise en inventaire et le coût de cadenassage.

▪ Variation du coût de mise en inventaire

Les résultats de cette opération sont portés dans le tableau 5.2 et la figure 5.8 en donne une illustration. La valeur du seuil critique dans ce cas est donnée pour un âge correspondant à 25, 60, 85. Les valeurs prises par c^+ sont 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9 et le seuil critique correspondant à ces valeurs sont porté dans le tableau suivant :

Tableau 5.2 Variation du seuil critique en fonction du coût de mise en inventaire

Coût de mise en inventaire	1	2	4	5	6	8	9
Seuil critique (a=85)	15	12.5	10	10	7.5	7.5	7.5
Seuil critique (a=60)	7.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Seuil critique (a=25)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

D'après ce tableau, nous pouvons voir que le seuil critique décroît quand le coût de mise en stock croît. En effet vu qu'on augmente le coût de stockage des produits finis le modèle nous propose de diminuer le seuil critique pour minimiser le coût total de production. L'effet observé sur le seuil critique est en phase avec la réalité industrielle, car l'augmentation du coût de mise en inventaire entraîne une diminution de la quantité des produits à stocker ce qui est tout à fait normal. La figure 5.8 illustre l'impact de la variation du coût de mise en inventaire sur le seuil critique.

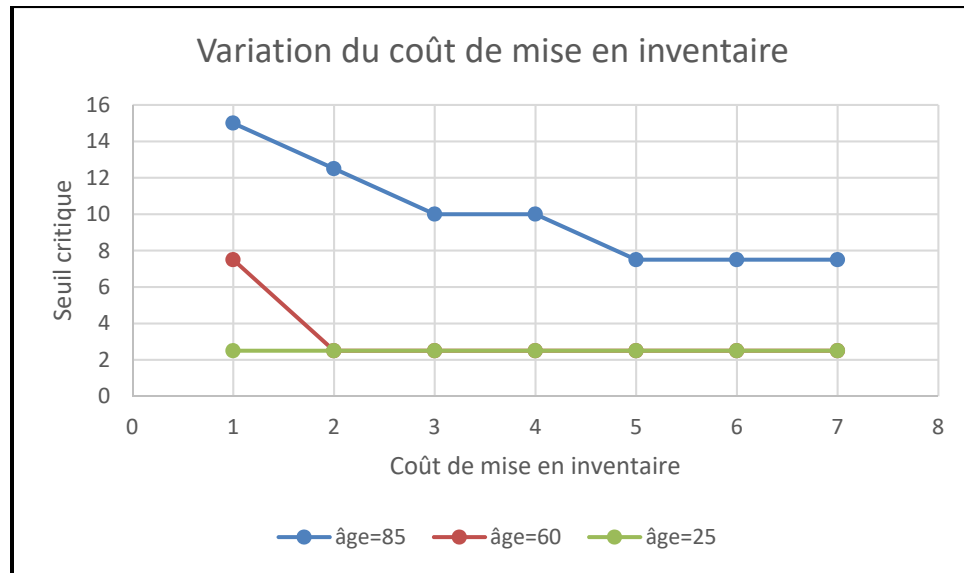


Figure 5.8 Variation du coût de mise en inventaire

▪ Variation du coût de rupture de stock

En ce qui concerne le coût de pénurie, les valeurs attribuées à c^- et les valeurs des seuils critiques (en fonction de l'âge) obtenus sont portées dans le tableau 5.3. Dans ce cas, nous avons fixé les autres paramètres et nous avons fait varier uniquement le coût de pénurie afin d'obtenir le seuil critique correspondant. Le constat fait à partir de ce tableau est qu'il faut diminuer la valeur du seuil critique si le coût de pénurie décroît. Cela veut tout simplement dire qu'il est optimal de produire moins quand le coût de rupture de stock décroît. Le seuil critique régresse lorsqu'on diminue la valeur du coût de rupture de stock. En fait le modèle juge selon le coût associé qu'il est mieux de subir une pénurie que de produire et stocker. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

Tableau 5.3 Variation du seuil critique en fonction du coût de rupture de stock

Coût de rupture de stock	100	90	80	70	50	40	30	20	10
Seuil critique (a=85)	27.5	27.5	27.5	25	25	22.5	22.5	20	15
Seuil critique (a=60)	27.5	27.5	27.5	25	25	22.5	22.5	20	7.5
Seuil critique (a=25)	10	7.5	7.5	7.5	5	5	2.5	2.5	2.5

Pour mieux illustrer les résultats du tableau, nous avons réalisé la figure suivante.

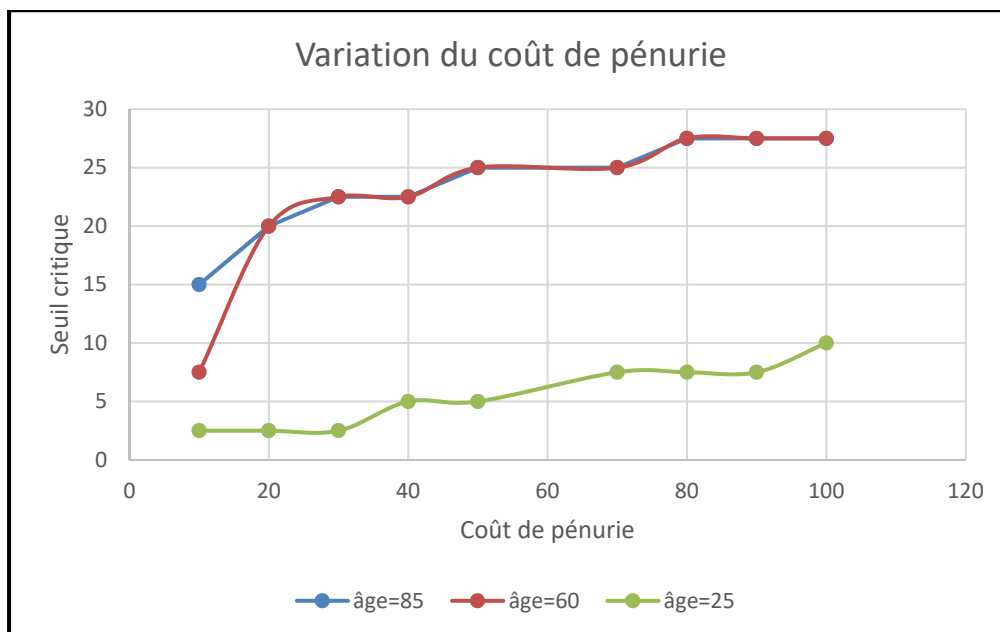


Figure 5.9 Variation du coût de rupture de stock

▪ Variation du coût de cadénassage

Rappelons que le cadénassage est une étape du processus de maintenance qui se fait en amont. Le cadénassage n'est en réalité qu'un ajout de temps sur l'activité de maintenance. Pour mener à bien cette analyse, nous avons fait varier le coût associé au cadénassage et nous avons observé l'impact sur le seuil critique et sur la trace du taux de cadénassage. En ce qui concerne le seuil critique, les données sont portées au tableau 5.4. Le constat fait à ce niveau est que le seuil critique est très peu sensible à la variation du coût de cadénassage. En effet, le cadénassage est une activité qui s'effectue suivant une procédure bien établie par les organismes de normalisation. Par conséquent c'est une activité planifiée dont on connaît les différentes étapes à suivre. Cela dit, elle prendra donc moins de temps pour être accompli; ce qui explique sa faible influence sur le seuil critique et sur le coût de production. De plus, le coût de cadénassage n'est pas directement lié à la dynamique du stock (contrairement au coût de pénurie et de stockage : voir équation (5.8)).

Tableau 5.4 Variation du seuil critique en fonction du coût de cadénassage

Coût de cadénassage	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Seuil critique(a=85)	15	15	15	15	15	15	15	15	10	10
Seuil critique (a=60)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	5	5	5
Seuil critique (a=25)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Il faut noter que le taux de cadénassage avant la maintenance corrective n'est pas identique à celui de la maintenance préventive, car l'opération d'entretien préventif est planifiée donc on se prépare à la tâche tant dis que la maintenance corrective est le résultat d'une panne qui arrive de façon inopinée. Les figures 5.10 et 5.11 représentent respectivement les traces de la politique de cadénassage avant maintenance préventive et avant réparation. Ces traces sont constituées de deux principales zones; une zone où l'on fait le cadénassage au taux maximal

et l'autre zone où il se fait au taux minimal. Nous pouvons voir sur la figure 5.10 que la variation du coût de cadenassage a une influence sur la politique de cadenassage avant maintenance préventive comparée à la politique avant réparation. En fait, la défaillance d'un équipement est un évènement qui arrive aléatoirement. Du coup, si on a une panne et que le seuil optimal n'est pas encore atteint, le cadenassage se fera toujours au taux maximal surtout que le cadenassage prend très peu de temps donc un coût faible. Par ailleurs, la maintenance préventive est une activité planifiée. Le modèle aura tendance à réduire la zone où la maintenance se fait au taux maximal (voir figure 5.10) pour minimiser le coût de production.

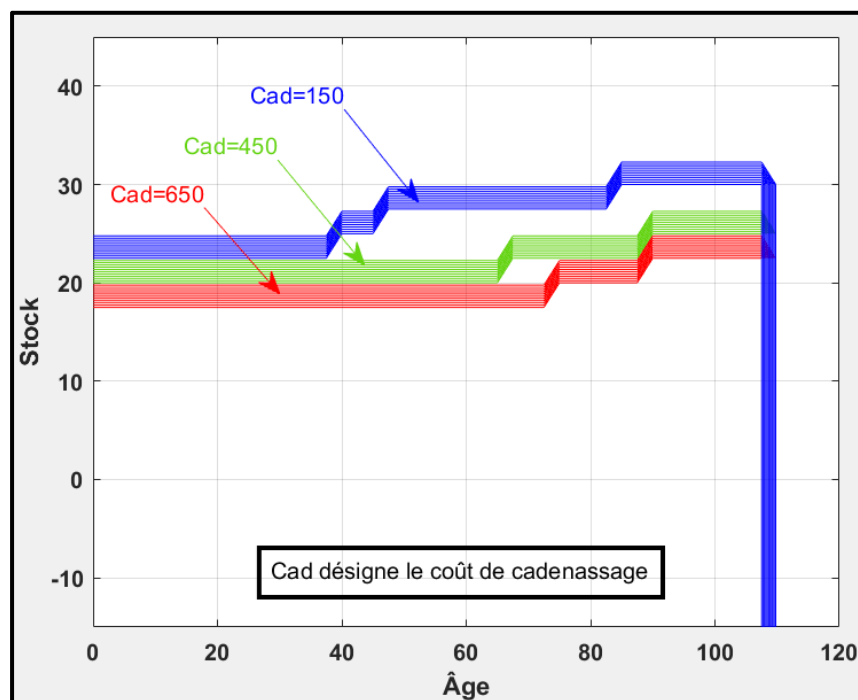


Figure 5.10 Trace du taux de cadenassage avant la maintenance préventive

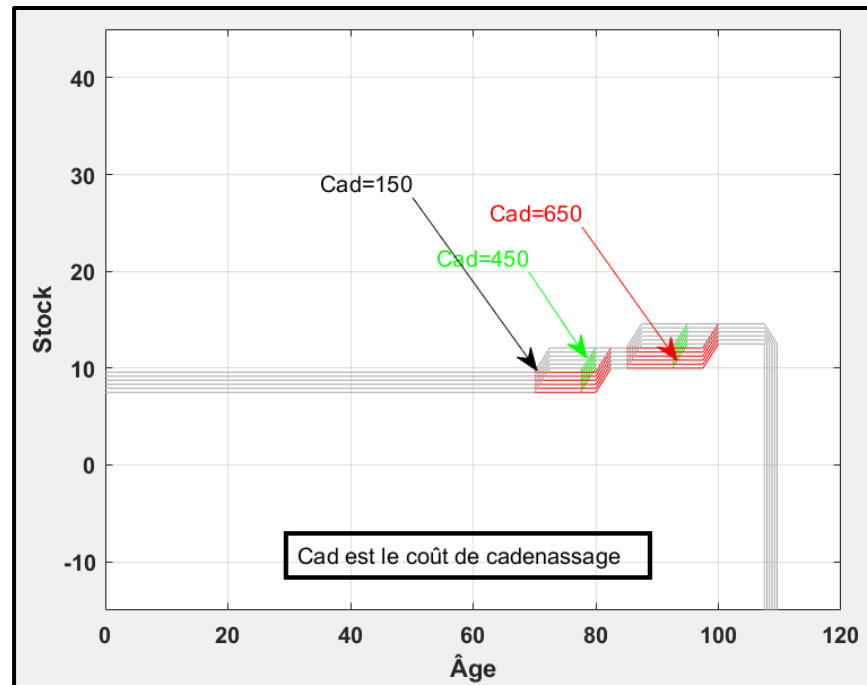


Figure 5.11 Trace du taux de cadenassage avant réparation

5.6 Conclusion

La planification de la production d'un système manufacturier flexible est un processus qui dépend de plusieurs paramètres tels que l'humain. C'est ainsi que nous nous sommes donc penchés sur la question d'intégrer l'aspect de la santé et la sécurité des employés dans un modèle décrit par un processus stochastique afin d'établir une stratégie qui tient compte non seulement de la production, mais aussi de la prévention des maladies et des accidents au travail. L'objectif étant de minimiser le coût total de production tout en respectant les lois sur la santé et la sécurité au travail. Le cadenassage est l'aspect sécurité que nous avons ajouté au système décrit au chapitre précédent en vue du respect de la loi encadrant la maintenance (CSA Z460-20). Le système considéré était sujet à des activités de réparations et de maintenance préventive qui sont tous deux des activités faites après le cadenassage. L'optimisation de cette chaîne de production passe par le contrôle des variables telles que le taux de production, le taux d'envois en maintenance préventive et le taux de cadenassage. Ces variables ont permis

de minimiser le coût total de production donné par la fonction valeur qui est solution des équations d'HJB.

La résolution analytique des équations d'HJB développées étant impossible, nous avons utilisé une méthode numérique basée sur l'approche de Kushner et Dupuis (1992) pour trouver la commande optimale du problème d'optimisation du système manufacturier considéré dans cette étude. Après simulation, nous avons pu établir une politique à seuil critique (HPP) décrivant la stratégie optimale à adopter pour les activités de production, de maintenance préventive et de cadenassage. Le cadenassage permet d'isoler les sources d'énergie lors d'une intervention sur un équipement. Il en ressort que l'impact principal du cadenassage sur les activités de maintenance et de réparation est d'accroître le temps prévu pour ses activités. Par conséquent, le gestionnaire de production devra prévoir plus de stock pour satisfaire sa clientèle durant la maintenance et la réparation. La confirmation de cette stratégie s'est faite par une analyse de sensibilité où nous avons fait varier plusieurs paramètres afin d'analyser leurs effets sur les différents politiques établis.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur deux domaines spécifiques à savoir la planification de la production et la santé et sécurité au travail. Du point de vue production, le problème rencontré était la minimisation des coûts de production et l'amélioration de la disponibilité des équipements. Pour ce qui est de la santé et sécurité au travail, nous avons dans un premier temps, travaillé sur la prévention des maladies professionnelles (silicose) en intégrant dans le système de production deux unités de protections ayant pour objectif de réduire au maximum la concentration des particules de silice cristalline et limiter les conséquences sur la santé de l'employé. Dans un second temps, nous avons intégré la notion de cadenassage pour prévenir tout accident lié aux activités de maintenance. Il était donc question de modéliser le système de production en intégrant ces deux aspects afin de mettre sur pied une stratégie de commande optimale visant à minimiser le coût de production tout en préservant la santé des employés. Pour ce fait, nous avons subdivisé le travail en plusieurs parties.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé des notions fondamentales qui ont permis de mieux comprendre l'environnement manufacturier. Nous avons, par la même occasion, présenté dans ce chapitre, la silice cristalline, sa provenance ainsi que ses effets sur la santé de celui qui l'ingère. En parcourant la littérature, nous avons pu dégager quelques limites en ce qui concerne l'optimisation des systèmes manufacturiers ainsi que les stratégies de maintenances intégrées aux chaînes de production. En considérant le volume de documents consultés pour cette partie, nous avons dressé un tableau synthétique pour mettre en exergue les limites des documents utilisés. Cette revue de littérature nous a permis de situer notre travail par rapport à l'ensemble des travaux déjà effectués.

Dans le deuxième chapitre, pour mieux situer le lecteur, nous avons décrit le procédé sur lequel nous avons effectué notre étude. De l'extraction à la consommation, il en ressortait que le granit subit plusieurs transformations avant d'être mis sur le marché. Les employés qui effectuaient cette transformation étaient sujets à de graves problèmes de santé comme la

silicose lorsqu'ils ingéraient les particules émises durant le procédé. Dans le souci de limiter le risque d'exposition, certains organismes tels que NIOSH ou OSHA avaient non seulement établi une limite d'exposition à respecter, mais aussi proposer des solutions à mettre en place pour réduire la concentration des particules de silices cristallines. Parmi ses recommandations figurait la combinaison du procédé de lubrification et de ventilation locale. Nous avons donc joint cette mesure de prévention à la machine de production pour en faire un système manufacturier que nous avons dans la suite du travail modélisé.

Au chapitre 3, nous avons traité le problème de planification d'un système manufacturier soumis à des pannes et réparations aléatoires. Le système était constitué d'une machine à laquelle étaient greffés deux équipements de protection produisant un seul type de pièce. L'unité de production était décrite par un processus stochastique à 8 modes. La variable de décision considérée dans ce cas était le taux de production de la machine. En nous basant sur les méthodes numériques, nous avons pu obtenir la politique de commande optimale qui minimise les coûts de production. Une analyse de sensibilité a ensuite été faite pour vérifier la véracité du modèle conçu. Afin de nous rapprocher de la réalité industrielle, nous avons intégré dans le chapitre quatre deux concepts à savoir : la limite d'exposition aux particules de silice cristalline et la dégradation du système de production.

La quatrième partie de ce mémoire était consacrée à l'élaboration d'une stratégie conjointe de production et de maintenance dans le but de minimiser le coût lié au polissage des blocs de granit. L'introduction de la maintenance préventive permet non seulement d'améliorer la disponibilité des équipements, mais sert aussi à limiter la concentration des particules de silice afin de demeurer dans la marge prévue par la réglementation. Le système manufacturier étudié dans cette partie était le même que celui du chapitre 3. La différence entre ce chapitre et le précédent reposait sur l'ajout de deux nouvelles notions qui sont la maintenance préventive et la limite d'exposition. Nous avons tenu compte dans la modélisation du système, la limite d'exposition proposée par OSHA. La loi de commande optimale intégrait les stratégies de production et de maintenance. La chaîne de Markov non homogène nous a permis de modéliser le système considéré dans cette partie du travail. Les variables de décision étaient le taux de

production et le taux de maintenance préventive. Les résultats obtenus nous ont permis d'établir la stratégie de commande optimale qui minimise les dépenses liées à la production. Cette politique consistait à produire au taux maximal si le stock est inférieur au seuil critique (qui est fonction de l'âge); produire à la demande lorsque le stock est égal au seuil critique; arrêter l'unité de production si le stock est supérieur au seuil critique. Une analyse de sensibilité a été faite pour confirmer la ténacité du modèle développé. En référence aux différentes publications faites sur le nombre d'accidents enregistrés pendant les activités de maintenance, nous avons jugé nécessaire d'intégrer au chapitre 5 le concept de cadenassage dans la modélisation du système.

La cinquième et dernière partie du travail portait sur l'intégration du cadenassage dans le système de production déjà décrit au chapitre précédent. L'objectif était de proposer une stratégie de production, de maintenance, de cadenassage en tenant compte de la limite d'exposition aux particules de silice cristalline. Le cadenassage est certes considéré par certains manufacturiers comme une activité à faible valeur ajoutée, mais grâce aux données publiées par l'IRSST sur les coûts imputables aux accidents au travail il est clair qu'il faut en tenir compte en contexte de production manufacturière.

Grâce à cette étude, les entreprises du secteur de la transformation du granit peuvent optimiser leurs productions tout en garantissant à leurs employés un environnement de travail sain et sécuritaire. La principale contribution de cette recherche réside dans la modélisation d'une unité de transformation du granit intégrant deux systèmes de protection des employés contre l'exposition aux particules de silice cristalline dans le but d'optimiser le procédé. Pour valider le modèle, nous avons effectué une analyse de sensibilité. Toutefois, pour les travaux futurs, nous avons quelques recommandations à faire :

- Dans ce mémoire nous nous sommes limités au procédé de polissage plan des blocs de granit qui est une étape pour la fabrication du comptoir de cuisine. Il serait donc intéressant d'étendre le problème résolu sur toute la chaîne de production du comptoir

incluant les autres procédés tels que la découpe, le polissage de bord ou encore le perçage.

- Considérer la demande des clients en produits finis comme une variable aléatoire.
- Faire le contrôle de la maintenance corrective.
- Étendre l'étude à d'autres secteurs d'activités autres que la transformation du granit.

ANNEXE I

PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 3) : SYSTÈME DE PRODUCTION AVEC PANNES ET RÉPARATIONS ALÉATOIRES

```
hx1=0.1; %pas suivant x
Um=0.5; % taux de production max
c1p=5; % pénalise le stock positif
c1m=80; % pénalise le stock négatif
MTTRM=5; %Temps de réparation de la meuleuse
MTTRC=10; %Temps de réparation de captation à la source
MTTRH=10; %Temps de réparation de l'humidification
MTBFM=100; %Temps moyen de bon fonctionnement meuleuse
MTBFC=1000; %Temps moyen de bon fonctionnement captation
MTBFH=1000; %Temps moyen de bon fonctionnement humidification
LambdaM=1/MTBFM; %Taux de panne de la meuleuse
LambdaC=1/MTBFC; %Taux de panne de la source de captation
LambdaH=1/MTBFH; %Taux de panne de lubrification
MuM=1/MTTRM; %Taux de réparation de la meuleuse
MuC=1/MTTRC; %Taux de réparation de l'unité de captation
MuH=1/MTTRH; %Taux de réparation de lubrification
q12=LambdaH; % Taux de panne de H
q14=LambdaC;%Taux de panne de C
q15=LambdaM;%Taux de panne de M
q21=MuH;%Taux de réparation de H
q41=MuC;%Taux de réparation de C
q51=MuM;%Taux de réparation de M
q23=LambdaC;%Taux de panne de C
q26=LambdaM;%Taux de panne de M
q32=MuC;%Taux de réparation de C
q62=MuM;%Taux de réparation de M
q34=MuH;%Taux de réparation de H
q43=LambdaH;%Taux de panne de H
q38=LambdaM;%Taux de panne de M
q47=LambdaM;%Taux de panne de M
q56=LambdaH;%Taux de panne de H
q57=LambdaC;%Taux de panne de C
q74=MuM;%Taux de réparation de M
q65=MuH;%Taux de réparation de H
q75=MuC;%Taux de réparation de C
q68=LambdaC;%Taux de panne de C
q86=MuC;%Taux de réparation de C
q78=LambdaH;%Taux de panne de H
```

```

q87=MuH;%Taux de réparation de H
q83=MuM;%Taux de réparation de M
d=0.45;%taux de demande
rho=0.01;
x1inf=-5;% borne inférieure du stock
x1sup=20;% borne supérieure du stock
Nx1=1+(x1sup-x1inf)/hx1;%Nombre d'intervalles de la grille

cont1=[];%taux de production pour un outil parfait(1 seul mode opérationnelle)

UU1=[];

Va1=[];
Va2=[];
Va3=[];
Va4=[];
Va5=[];
Va6=[];
Va7=[];
Va8=[];

VP1M=[];
VP2M=[];
VP3M=[];
VP4M=[];
VP5M=[];
VP6M=[];
VP7M=[];
VP8M=[];

xx1=[];
UU1(1)=0;
UU1(2)=d;
UU1(3)=Um;

Vp1=zeros(Nx1);
Vp2=zeros(Nx1);
Vp3=zeros(Nx1);
Vp4=zeros(Nx1);
Vp5=zeros (Nx1);
Vp6=zeros(Nx1);
Vp7=zeros(Nx1);
Vp8=zeros(Nx1);

Va1=zeros(Nx1);

```

```

Va2=zeros(Nx1);
Va3=zeros(Nx1);
Va4=zeros(Nx1);
Va5=zeros(Nx1);
Va6=zeros(Nx1);
Va7=zeros(Nx1);
Va8=zeros(Nx1);

```

%étude de faisabilité

```

Q=[];
A=[];
QTrans=[];
Pi=[];

q13=0;q16=0; q17=0; q18=0; q24=0; q25=0; q27=0; q28=0; q31=0; q35=0; q36=0; q37=0;
q42=0; q45=0; q46=0; q48=0; q52=0; q53=0; q54=0; q58=0; q61=0; q63=0; q64=0; q67=0;
q71=0; q72=0; q73=0; q76=0; q81=0; q82=0; q84=0; q85=0;
Q(1,2)=q12; Q(1,3)=q13; Q(1,4)=q14; Q(1,5)=q15; Q(1,6)=q16; Q(1,7)=q17; Q(1,8)=q18;
Q(1,1)=-(Q(1,2)+Q(1,4)+Q(1,5)); Q(2,1)=q21; Q(2,3)=q23; Q(2,4)=q24; Q(2,5)=q25;
Q(2,6)=q26; Q(2,7)=q27; Q(2,8)=q28; Q(2,2)=-(Q(2,1)+Q(2,3)+Q(2,6)); Q(3,1)=q31;
Q(3,2)=q32; Q(3,4)=q34; Q(3,5)=q35; Q(3,6)=q36; Q(3,7)=q37; Q(3,8)=q38; Q(3,3)=
-(Q(3,4)+Q(3,2)+Q(3,8)); Q(4,1)=q41; Q(4,2)=q42; Q(4,3)=q43; Q(4,5)=q45; Q(4,6)=q46;
Q(4,7)=q47; Q(4,8)=q48; Q(4,4)=-(Q(4,1)+Q(4,3)+Q(4,7)); Q(5,1)=q51; Q(5,2)=q52;
Q(5,3)=q53; Q(5,4)=q54; Q(5,6)=q56; Q(5,7)=q57; Q(5,8)=q58; Q(5,5)=
-(Q(5,1)+Q(5,6)+Q(5,7)); Q(6,1)=q61; Q(6,2)=q62; Q(6,3)=q63; Q(6,4)=q64; Q(6,5)=q65;
Q(6,7)=q67; Q(6,8)=q68; Q(6,6)=-(Q(6,2)+Q(6,5)+Q(6,8)); Q(7,1)=q71; Q(7,2)=q72;
Q(7,3)=q73; Q(7,4)=q74; Q(7,5)=q75; Q(7,6)=q76; Q(7,8)=q78; Q(7,7)=
-(Q(7,4)+Q(7,5)+Q(7,8)); Q(8,1)=q81; Q(8,2)=q82; Q(8,3)=q83; Q(8,4)=q84; Q(8,5)=q85;
Q(8,6)=q86; Q(8,7)=q87; Q(8,8)=-(Q(8,3)+Q(8,6)+Q(8,7));
QTrans=Q';
QTrans(1,1)=1; QTrans(1,2)=1; QTrans(1,3)=1; QTrans(1,4)=1; QTrans(1,5)=1;
QTrans(1,6)=1; QTrans(1,7)=1; QTrans(1,8)=1;
A=[1 0 0 0 0 0 0 0];
Pi=QTrans^(-1)*A';
Faisabilite=(Pi(1)*Um-d);
Stop=0;
if Faisabilite>=0
    display('système faisable')
else
    display('système non faisable')
    Stop=1;
end

```

```

it=0; precis=0.001;
Err=100000; %pour while err > precis
for i=1:Nx1
cont1(i)=0;
end

```

```

C1MAX=0; C1MIN=5e+10;

```

```

while (Err > precis)&&(Stop==0) %boucle d'iteration
    Err=0;
    C1MAX=0; C1MIN=5e+10;
    it=it+1;
    %
    % Policy evaluation
    %
    for i=1:Nx1
        x1=x1inf+(i-1)*hx1;
        xx1(i)=x1;
        u1=cont1(i);
        [Va11, Va21, Va31, Va41, Va51, Va61, Va71,
        Va81]=coutbChap1(i,x1,hx1,u1,q12,q21,q23,q32,q15,q51,q26,q62,q43,q34,q14,q41,q47,q74
        ,q38,q83,q56,q65,q57,q75,q68,q86,q78,q87,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,Vp6,Vp7,Vp8,d,Nx1,rh
        o,c1p,c1m);
        Va1(i)=Va11;
        Va2(i)=Va21;
        Va3(i)=Va31;
        Va4(i)=Va41;
        Va5(i)=Va51;
        Va6(i)=Va61;
        Va7(i)=Va71;
        Va8(i)=Va81;

        if abs(Va1(i)-Vp1(i))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va1(i)-Vp1(i));
        end
        if abs(Va1(i)-Vp1(i))< C1MIN
            C1MIN=abs(Va1(i)-Vp1(i));
        end
        if abs(Va2(i)-Vp2(i))>C1MAX
            C1MAX=abs(Va2(i)-Vp2(i));
        end
        if abs(Va2(i)-Vp2(i))<C1MIN
            C1MIN=abs(Va2(i)-Vp2(i));
        end
    end
end

```

```

if abs(Va3(i)-Vp3(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va3(i)-Vp3(i));
end
if abs(Va3(i)-Vp3(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va3(i)-Vp3(i));
end
if abs(Va4(i)-Vp4(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va4(i)-Vp4(i));
end
if abs(Va4(i)-Vp4(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va4(i)-Vp4(i));
end
if abs(Va5(i)-Vp5(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va5(i)-Vp5(i));
end
if abs(Va5(i)-Vp5(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va5(i)-Vp5(i));
end
if abs(Va6(i)-Vp6(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va6(i)-Vp6(i));
end
if abs(Va6(i)-Vp6(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va6(i)-Vp6(i));
end
if abs(Va7(i)-Vp7(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va7(i)-Vp7(i));
end
if abs(Va7(i)-Vp7(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va7(i)-Vp7(i));
end
if abs(Va8(i)-Vp8(i))>C1MAX
    C1MAX=abs(Va8(i)-Vp8(i));
end
if abs(Va8(i)-Vp8(i))<C1MIN
    C1MIN=abs(Va8(i)-Vp8(i));
end
end % end de for i=1: policy evaluation
vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(vmin-vmax);
Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
Vp3=Va3;
Vp4=Va4;
Vp5=Va5;

```

```

Vp6=Va6;
Vp7=Va7;
Vp8=Va8;
% policy improvement
V1_op=5e+10;
V2_op=5e+10;
V3_op=5e+10;
V4_op=5e+10;
V5_op=5e+10;
V6_op=5e+10;
V7_op=5e+10;
V8_op=5e+10;
for i=1:Nx1
VP1M=1000000000;
VP2M=1000000000;
VP3M=1000000000;
VP4M=1000000000;
VP5M=1000000000;
VP6M=1000000000;
VP7M=1000000000;
VP8M=1000000000;
x1=x1inf+(i-1)*hx1;
xx1(i)=x1;
for c1=1:3
u1=UU1(c1);
[Va11, Va21, Va31, Va41, Va51, Va61, Va71, Va81]
=coutbChap1(i,x1,hx1,u1,q12,q21,q23,q32,q15,q51,q26,q62,q43,q34,q14,q41,q47,q74,q38,q
83,q56,q65,q57,q75,q68,q86,q78,q87,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,Vp6,Vp7,Vp8,d,Nx1,rho,c1p,c
1m);
if Va11 < VP1M
VP1M = Va11;
cont1(i)=u1;
end
if Va21 < VP2M
VP2M = Va21;
end
if Va31 < VP3M
VP3M = Va31;
end
if Va41 < VP4M
VP4M = Va41;
end
if Va51 < VP5M
VP5M = Va51;
end
end

```



```

if Va61 < VP6M
VP6M = Va61;
end
if Va71 < VP7M
VP7M = Va71;
end
if Va81 < VP8M
VP8M = Va81;
end
if Va11 < V1_op
V1_op=Va11;
X1_op=x1;
end
if Va21 < V2_op
V2_op=Va21;
X2_op=x1;
end
if Va31<V3_op
    V3_op=Va31;
    X3_op=x1;
end
if Va41<V4_op
    V4_op=Va41;
    X4_op=x1;
end
if Va51<V5_op
    V5_op=Va51;
    X5_op=x1;
end
if Va61<V6_op
    V6_op=Va61;
    X6_op=x1;
end
if Va71<V7_op
    V7_op=Va71;
    X7_op=x1;
end
if Va81<V8_op
    V8_op=Va81;
    X8_op=x1;
end
end % for c1
Va1(i)=VP1M;
Va2(i)=VP2M;
Va3(i)=VP3M;

```

```

Va4(i)=VP4M;
Va5(i)=VP5M;
Va6(i)=VP6M;
Va7(i)=VP7M;
Va8(i)=VP8M;
end % for i=x1 policy improv.
end % iteration while
Hedging_point1 =X1_op;
Hedging_point2 =X2_op;
Hedging_point3 =X3_op;
Hedging_point4 =X4_op;
Hedging_point5 =X5_op;
Hedging_point6 =X6_op;
Hedging_point7 =X7_op;
Hedging_point8 =X8_op;
figure(1)
plot(xx1,Va1)
xlabel('x')
ylabel('v(1,x)')
title('Value function at mode 1')
grid on
figure(2)
plot(xx1,Va2)
xlabel('x')
ylabel('v(2,x)')
title('Value function at mode 2')
grid on
figure(3)
plot(xx1,Va3)
xlabel('x')
ylabel('v(3,x)')
title('Value function at mode 3')
grid on
figure(4)
plot(xx1,Va4)
xlabel('x')
ylabel('v(4,x)')
title('Value function at mode 4')
grid on
figure(5)
plot(xx1,Va5)
xlabel('x')
ylabel('v(5,x)')
title('Value function at mode 5')
grid on

```

```
figure(6)
plot(xx1,Va6)
xlabel('x')
ylabel('v(6,x)')
title('Value function at mode 6')
grid on
figure(7)
plot(xx1,Va7)
xlabel('x')
ylabel('v(7,x)')
title('Value function at mode 7')
grid on
figure(8)
plot(xx1,Va8)
xlabel('x')
ylabel('v(8,x)')
title('Value function at mode 8')
grid on
figure(9)
plot(xx1, cont1)
xlabel('x')
ylabel('u1(1,x)')
title('Production rate at mode 1')
grid on
```


ANNEXE II

ÉQUATIONS DU SYSTÈME À 3 MODES

- Diagramme de transition

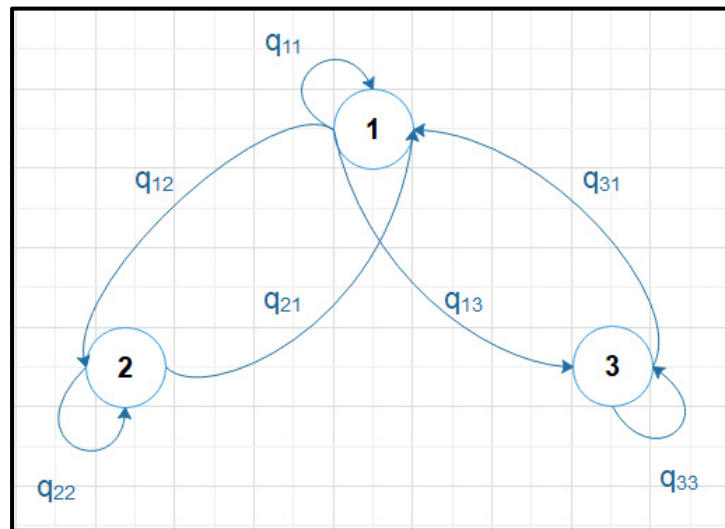


Diagramme de transition du système

$\xi(t) = 1$, le système est en opération.

$\xi(t) = 2$, le système est en panne.

$\xi(t) = 3$, le système est en maintenance préventive.

$\xi(t) \in B = \{1,2,3\}$

- Matrice de transition

$$Q(.) = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & 0 \\ q_{31} & 0 & q_{33} \end{bmatrix}$$

Avec :

$w_p(t) = q_{13}(t)$: définit le taux d'envois en maintenance préventive.

$q_{12}(a(t))$ définis le taux de panne du système de production en fonction de l'âge

$$q_{12}(a(t)) = A_0 + A_t(1 - \exp(K * a^3(t)))$$

- **Domaine de commande admissible**

$$\Gamma(\alpha) = \left\{ (u(\cdot), w_p(\cdot)) \in R^2 / 0 \leq u(\cdot) \leq u_{max}, w_p^{min} \leq w_p(\cdot) \leq w_p^{max} \right\}$$

- **Coût instantané**

$$g(x, \alpha, u, a) = c^+ x^+ + c^- x^- + c^\alpha \quad \forall \alpha \in B$$

c^α : coût engagé pour remettre en marche le système manufacturier.

$$c^\alpha = c_r ind\{\xi(t) = 2\} + c_p Ind\{\xi(t) = 3\}$$

- **Coût total**

$$J(x, a, u, \alpha) = E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, \alpha, u, a) dt / x(0) = x, \xi(0) = \alpha \right\}$$

- **Équations d'HJB**

$$\rho v(\alpha, x, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(\alpha)} \left[g(\cdot) + ku \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial a} + (u - d) \frac{\partial v(\alpha, x, a)}{\partial x} + \sum_{\beta \in A} q_{\alpha\beta} v(\beta, x, \varphi(\xi, a)) \right]$$

Au mode 1, on a :

$$v^h(x, 1, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(1)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^1(1 + \rho/\Omega_h^1)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^1)} \begin{pmatrix} P_x^+(1)v^h(x + h_x, 1, a) \\ + P_x^-(1)v^h(x - h_x, 1, a) \\ + P_a(1)v^h(x, 1, a + h_a) \\ + P^2(1)v^h(x, 2, a) \\ + P^3(1)v^h(x, 3, 0) \end{pmatrix} \right]$$

Au mode 2, on a :

$$v^h(x, 2, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(2)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^2(1 + \rho/\Omega_h^2)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^2)} \begin{pmatrix} P_x^-(2)v^h(x - h_x, 2, a) \\ + P^1(2)v^h(x, 1, a) \end{pmatrix} \right]$$

Au monde 3, on a :

$$v^h(x, 3, a) = \min_{u, w_p \in \Gamma(3)} \left[\frac{g(\cdot)}{\Omega_h^3(1 + \rho/\Omega_h^3)} + \frac{1}{(1 + \rho/\Omega_h^3)} \begin{pmatrix} P_x^-(2)v^h(x - h_x, 3, a) \\ P^1(3)v^h(x, 1, a) \end{pmatrix} \right]$$

ANNEXE III

PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 4) : SYSTÈME DE PRODUCTION AVEC MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET LIMITE D'EXPOSITION : CAS DE 12 MODES

```
Ao=0.0001;
At=0.01;
K=0.0000005;
Ku=1;
Elim=0.05% Concentration limite
E0=0.01;
Em=0.05;
Et=0.0000000001;
cp= 5;      % pénalise le stock positif
cm= 80;     % pénalise le stock négatif
cmp= 350;   % pénalise la maintenance préventive
cr=5000;    %pénalise la maintenance corrective

Um=0.5;     % taux de production max.
d=0.45;     % taux de demande

q15_min= 0.000001 ; % taux de maintenance préventive minimale
q15_max= 1; % taux de maintenance préventive maximale
q51=0.1 ; % taux de retour en maintenance préventive, réparation
MTBFM=100;%temps moyen de bon fonctionnement de M
MTTRM=5;%temps moyen pour réparer M
MTBFL=1000;%temps moyen de bon fonctionnement de L
MTTRL=10;%%temps moyen pour réparer
MTBFC=1000;
MTTRC=10;%temps moyen pour réparer C
qpm=1/MTBFM;
qpl=1/MTBFL;
qrm=1/MTTRM;
qrl=1/MTTRL;
qrc=1/MTTRC;

q12=qpl;
q43=qpl;
q56=qpl;
q912=qpl;
q1110=qpl;
q78=qpl;
```

q19=qpm;
q212=qpm;
q310=qpm;
q411=qpm;
q57=qpm;
q68=qpm;
q75=qrm;
q86=qrm;
q91=qrm;
q103=qrm;
q114=qrm;
q122=qrm;
q32=qrc;
q41=qrc;
q1012=qrc;
q119=qrc;
q21=qrl;
q34=qrl;
q65=qrl;
q87=qrl;
q1011=qrl;
q129=qrl;
Va1=[];
Va2=[];
Va3=[];
Va4=[];
Va5=[];
Va6=[];
Va7=[];
Va8=[];
Va9=[];
Va10=[];
Va11=[];
Va12=[];

VP1M=[];
VP2M=[];
VP3M=[];
VP4M=[];
VP5M=[];
VP6M=[];
VP7M=[];
VP8M=[];
VP9M=[];
VP10M=[];

```

VP11M=[];
VP12M=[];

rho= 0.01;      % taux d'actualisation
hx1= 2;         % pas sur l'âge
hx2= 2;         % pas sur le stock
x1sup= 120;     % maximum sur l'âge
x1inf= 0;       % minimum sur l'âge
x2sup= 45;      % maximum sur le stock
x2inf= -15;     % minimum sur le stock
Nx1=1+(x1sup-x1inf)/hx1; % nombre de points sur la grille de l'âge
Nx2=1+(x2sup-x2inf)/hx2; % nombre de points sur la grille du stock


Vp1=zeros(Nx2,Nx1);
Vp2=zeros(Nx2,Nx1);
Vp3=zeros(Nx2,Nx1);
Vp4=zeros(Nx2,Nx1);
Vp5=zeros(Nx2,Nx1);
Vp6=zeros(Nx2,Nx1);
Vp7=zeros(Nx2,Nx1);
Vp8=zeros(Nx2,Nx1);
Vp9=zeros(Nx2,Nx1);
Vp10=zeros(Nx2,Nx1);
Vp11=zeros(Nx2,Nx1);
Vp12=zeros(Nx2,Nx1);


Va1=zeros(Nx2,Nx1);
Va2=zeros(Nx2,Nx1);
Va3=zeros(Nx2,Nx1);
Va4=zeros(Nx2,Nx1);
Va5=zeros(Nx2,Nx1);
Va6=zeros(Nx2,Nx1);
Va7=zeros(Nx2,Nx1);
Va8=zeros(Nx2,Nx1);
Va9=zeros(Nx2,Nx1);
Va10=zeros(Nx2,Nx1);
Va11=zeros(Nx2,Nx1);
Va12=zeros(Nx2,Nx1);


u11=zeros(Nx2,Nx1);
ur11=zeros(Nx2,Nx1);
u33=zeros(Nx2,Nx1);
ur33=zeros(Nx2,Nx1);

```

```

X1_op=[];
X2_op=[];

UU1(1)=0;
UU1(2)=d;
UU1(3)=Um;

UU3(1)=q15_min;
UU3(2)=q15_max;

Z1_op=[];
Z2_op=[];
xx2=[];%stock
xx1=[];%âge
it=0;
Err=10e+10;
it_max=1000;
precis=0.001;

while (Err > precis)

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

for j=1:Nx1
    x1=x1inf+(j-1)*hx1;
    xx1(j)=x1;
    for i=1:Nx2
        x2=x2inf+(i-1)*hx2;
        xx2(i)=x2;

        fu=Ku*u11(i,j);
        q14=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
        q23=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
        q911=q23;
        q1210=q23;

        ut33=u33(i,j);
        ut11=u11(i,j);

```

```
[Vx1,Vx2,Vx3,Vx4,Vx5,Vx6,Vx7,Vx8,Vx9,Vx10,Vx11,Vx12]=coutbmp12mod(i,j,x1,x2,hx1,hx2,ut11,ut33,q51,q19,q212,q310,q411,q57,q68,q14,q23,q1210,q911,q12,q43,q56,q912,q1110,q78,q75,q86,q91,q103,q114,q122,q32,q41,q1012,q119,q34,q21,q65,q87,q1011,q129,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,Vp6,Vp7,Vp8,Vp9,Vp10,Vp11,Vp12,d,Nx1,Nx2,rho,cp,cm,cmp,cr,fu);
```

```
    Va1(i,j)=Vx1;
    Va2(i,j)=Vx2;
    Va3(i,j)=Vx3;
    Va4(i,j)=Vx4;
    Va5(i,j)=Vx5;
    Va6(i,j)=Vx6;
    Va7(i,j)=Vx7;
    Va8(i,j)=Vx8;
    Va9(i,j)=Vx9;
    Va10(i,j)=Vx10;
    Va11(i,j)=Vx11;
    Va12(i,j)=Vx12;
```

```
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
```

```

if (abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j))>C1MAX)
    C1MAX=abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j));
end
if (abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j))<C1MIN)
    C1MIN=abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j));
end
if (abs(Va6(i,j)-Vp6(i,j))>C1MAX)
    C1MAX=abs(Va6(i,j)-Vp6(i,j));
end
if (abs(Va6(i,j)-Vp6(i,j))<C1MIN)
    C1MIN=abs(Va6(i,j)-Vp6(i,j));
end
if (abs(Va7(i,j)-Vp7(i,j))>C1MAX)
    C1MAX=abs(Va7(i,j)-Vp7(i,j));
end
if (abs(Va7(i,j)-Vp7(i,j))<C1MIN)
    C1MIN=abs(Va7(i,j)-Vp7(i,j));
end
if (abs(Va8(i,j)-Vp8(i,j))>C1MAX)
    C1MAX=abs(Va8(i,j)-Vp8(i,j));
end
if (abs(Va8(i,j)-Vp8(i,j))<C1MIN)
    C1MIN=abs(Va8(i,j)-Vp8(i,j));
end
if(abs(Va9(i,j)-Vp9(i,j)) > C1MAX)
    C1MAX=abs(Va9(i,j)-Vp9(i,j));
end
if (abs(Va9(i,j)-Vp9(i,j)) < C1MIN)
    C1MIN=abs(Va9(i,j)-Vp9(i,j));
end
if(abs(Va10(i,j)-Vp10(i,j)) > C1MAX)
    C1MAX=abs(Va10(i,j)-Vp10(i,j));
end
if (abs(Va10(i,j)-Vp10(i,j)) < C1MIN)
    C1MIN=abs(Va10(i,j)-Vp10(i,j));
end
if(abs(Va11(i,j)-Vp11(i,j)) > C1MAX)
    C1MAX=abs(Va11(i,j)-Vp11(i,j));
end
if (abs(Va11(i,j)-Vp11(i,j)) < C1MIN)
    C1MIN=abs(Va11(i,j)-Vp11(i,j));
end
if(abs(Va12(i,j)-Vp12(i,j)) > C1MAX)
    C1MAX=abs(Va12(i,j)-Vp12(i,j));
end

```

```

    if (abs(Va12(i,j)-Vp12(i,j)) < C1MIN)
        C1MIN=abs(Va12(i,j)-Vp12(i,j));
    end

end % for j
end % for i

Vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
Vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(Vmin-Vmax)

Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
Vp3=Va3;
Vp4=Va4;
Vp5=Va5;
Vp6=Va6;
Vp7=Va7;
Vp8=Va8;
Vp9=Va9;
Vp10=Va10;
Vp11=Va11;
Vp12=Va12;
% policy improvement
V1_op=5e+10;
V2_op=5e+10;
V3_op=5e+10;
V4_op=5e+10;
V5_op=5e+10;
V6_op=5e+10;
V7_op=5e+10;
V8_op=5e+10;
V9_op = 5e+10;
V10_op = 5e+10;
V11_op = 5e+10;
V12_op = 5e+10;
for j=1:Nx1 % age
    x1=x1inf+(j-1)*hx1;
    xx1(j)=x1;
for i=1:Nx2 % stock
    x2=x2inf+(i-1)*hx2;
    xx2(i)=x2;
    q14=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
    q23=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
    q911=q23;

```

```
q1210=q23;
```

```
VP1M=1000000000;
VP2M=1000000000;
VP3M=1000000000;
VP4M=1000000000;
VP5M=1000000000;
VP6M=1000000000;
VP7M=1000000000;
VP8M=1000000000;
VPM9=1000000000;
VPM10=1000000000;
VPM11=1000000000;
VPM12=1000000000;
```

```
for c1=1:3
    ur11(i,j)=UU1(c1);
    fu=Ku*ur11(i,j);
```

```
for c3=1:2          %/* selection d'un taux de envois en maintenance preventive */
    ur33(i,j)=UU3(c3);
    if x1>=110

        VP1M=0;
        end
    if x1>=106 && x2<11
        ur33(i,j)=UU3(2)+9;
    end
```

```
ut33=ur33(i,j);%preventive
ut11=ur11(i,j);
```

```
[Vy1,Vy2,Vy3,Vy4,Vy5,Vy6,Vy7,Vy8,Vy9,Vy10,Vy11,Vy12]=coutbmp12mod(i,j,x1,x2,hx1,hx2,ut11,ut33,q51,q19,q212,q310,q411,q57,q68,q14,q23,q1210,q911,q12,q43,q56,q912,q1110,q78,q75,q86,q91,q103,q114,q122,q32,q41,q1012,q119,q34,q21,q65,q87,q1011,q129,Vp1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,Vp6,Vp7,Vp8,Vp9,Vp10,Vp11,Vp12,d,Nx1,Nx2,rho,cp,cm,cmp,cr,fu);
```

```
Va1(i,j)=Vy1;
Va2(i,j)=Vy2;
Va3(i,j)=Vy3;
Va4(i,j)=Vy4;
```



```

Va5(i,j)=Vy5;
Va6(i,j)=Vy6;
Va7(i,j)=Vy7;
Va8(i,j)=Vy8;
Va9(i,j)=Vy9;
Va10(i,j)=Vy10;
Va11(i,j)=Vy11;
Va12(i,j)=Vy12;

```

```

if Vy1 < VP1M
    VP1M = Vy1;
    u11(i,j)=ur11(i,j);
    u33(i,j)=ur33(i,j);

```

```

    if i > 1

```

```

        if u11(i,j)==u11(i-1,j)
            xx=i;

```

```

        else

```

```

            X1_op = x2;

```

```

        end

```

```

    end

```

```

end

```

```

if Vy2 < VP2M
    VP2M = Vy2;
end
if Vy3 < VP3M
    VP3M = Vy3;
end
if Vy4 < VP4M
    VP4M = Vy4;
end
if Vy5 < VP5M
    VP5M = Vy5;

```

```

end

```

```

if Vy6 < VP6M
    VP6M = Vy6;

```

```

end

```

```

if Vy7 < VP7M
    VP7M = Vy7;
end
if Vy8 < VP8M
    VP8M = Vy8;
end
if Vy9 < VP9M
    VP9M = Vy9;
end
if Vy9 < VP9M
    VP9M = Vy9;
end
if Vy10 < VP10M
    VP10M = Vy10;
end
if Vy11 < VP11M
    VP11M = Vy11;
end
if Vy12 < VP12M
    VP12M = Vy12;
end

if Vy1 < V1_op
    V1_op = Vy1;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2; %stock
    X1_op = x1; %age
end
if Vy2 < V2_op
    V2_op = Vy2;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy3 < V3_op
    V3_op = Vy3;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy4 < V4_op
    V4_op = Vy4;

```

```

I_op = i;
J_op = j;
X2_op = x2;
X1_op = x1;
end
if Vy5<V5_op
    V5_op=Vy5;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy6<V6_op
    V6_op=Vy6;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy7<V7_op
    V7_op=Vy7;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy8<V8_op
    V8_op=Vy8;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy9<V9_op
    V9_op=Vy9;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;
    X1_op = x1;
end
if Vy10<V10_op
    V10_op=Vy10;
    I_op = i;
    J_op = j;
    X2_op = x2;

```

```

        X1_op = x1;
    end
    if Vy11<V11_op
        V11_op=Vy11;
        I_op = i;
        J_op = j;
        X2_op = x2;
        X1_op = x1;
    end
    if Vy12<V12_op
        V12_op=Vy12;
        I_op = i;
        J_op = j;
        X2_op = x2;
        X1_op = x1;
    end

    end    % /* end de c3 */

    end    % /* end de c1 */
end    % /* end de i
Z1_op(j)=X1_op;
Z2_op(j)=X2_op;

end    % /*end de j */
end    % /*iteration */
toc

Hedging_Point1 = X1_op
Hedging_Point2 = X2_op
Va1_op = V1_op
Va2_op=V2_op

figure(9)
surf(xx2,xx1,u11')
xlabel('Stock')
ylabel('Age')
zlabel('Production rate')

grid on

figure(10)
surf(xx2,xx1,u33')
xlabel('Stock')

```

```
ylabel('Age')  
zlabel('Preventive maintenance rate')  
grid on
```

```
figure(11)  
plot( xx1,Z1_op')  
xlabel('Age')  
ylabel('Threstold')  
grid on
```

```
figure(12)  
surf(xx2,xx1,Va1')  
xlabel('Âge')  
ylabel('Stock')  
zlabel('Va1')  
title('Fonction valeur au mode 1')  
grid on
```


ANNEXE IV

PREMIÈRE PAGE DE L'ARTICLE

GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2020, Berlin Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? - Paper No

Optimization of production strategies integrating occupational health and safety aspects: case of granite processing

*Kevin Gildas DONGMO TAMBAH, Jean Pierre KENNE, Victor SONGMENE
Mechanical Engineering Department
Production Technologies Integration Laboratory
University of Quebec, École de Technologie Supérieure
1100 Notre Dame Street West, Montreal, Quebec Canada, H3C 1K3*

Abstract. This article deals with the case of a granite processing line emitting silica particles that are harmful to the health of operators. This production chain is subject to deterioration over time that can lead to breakdowns. If nothing is done, these breakdowns will lead to equipment replacements. The manufacturing system consists of a machine, to which are grafted two protective equipments that reduce the particles emitted at the source. The silica particles emitted during production must respect the concentration limits provided by the regulations of the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 2015). The goal of this work is to develop a production strategy to optimize the performance of the system while preserving the health of workers. The optimal conditions are obtained by applying the stochastic optimal control theory. The resulted optimality conditions are solved numerically to determine the control policies.

Keywords: Manufacturing system, optimization, silica particles, production planning, replacement policy, numerical methods.

1. Introduction

According to the data from the International Labour Organization (ILO, 2019), 2.78 million of workers lose their live each year due to occupational accidents and diseases; 2.4 million of these deaths are attributable to occupational diseases such as silicosis. In addition, there are 378 million victims of work accidents and non-fatal occupational diseases each year. Fatal or not, these adverse events are responsible for several lost working days, which would represent on average four per cent of global Gross Domestic Product (Hämäläinen et al., 2017; Hämäläinen et al., 2014). The primary objective of companies is to make a profit, and this is achieved through the preservation of workers' health and a good optimization strategy. The manufacturing environment, particularly that of granite processing, is governed by laws such as the one limiting the concentration of silica particles that can be inhaled by the operator during production.

The goal of this research is therefore to propose to manufacturing managers a dynamic model that allows them to make profits while respecting the exposure limit for silica particles set out by the legislation. In the past, several researchers such as Charlot et al. (2007) and Emami-Mehrgani et al. (2014) have studied the issue of production planning in a flexible manufacturing environment by integrating aspects such as the lockout, preventive maintenance or human errors. Very little or no work to date, has integrated the occupational disease prevention aspect into a dynamic model

ANNEXE V

PROGRAMME MATLAB MODEL PRINCIPAL (CHAPITRE 4) : MAINTENANCE PRÉVENTIVE ET PLANIFICATION DE LA PRODUCTION AVEC CADENASSAGE

```
Ao=0.0001;
At=0.01;
K=0.0000005;
Ku=1;

cp=1; %pénalise la mise en stock
cm=10;%pénalise le manque de stock
cmp=100; %pénalise la maintenance préventive
Cad=450; %pénalise le cadénassage avant la maintenance préventive
cr=5000; %pénalise la réparation

Um=0.5; % Taux de production
d=0.45; %Taux de demande

q14_min=0.0000001; %taux minimal d'envois en maintenance préventive
q14_max=1; %taux d'envois maximal en maintenance préventive

q45_min=0.2; %Taux minimal de cadénassage avant la maintenance préventive
q45_max=0.75; %Taux maximal de cadénassage avant la maintenance préventive
q51=0.1;

q23_min=0.15; %Taux minimal de cadénassage avant la réparation
q23_max=0.45; %Taux maximal de cadénassage avant la réparation
q31=0.13;

Va1=[];
Va2=[];
Va3=[];
Va4=[];
Va5=[];

VP1M=[];
VP2M=[];
VP3M=[];
VP4M=[];
VP5M=[];
```

```

rho= 0.01;      % taux d'actualisation
hx1= 1;         % pas sur l'âge
hx2= 1;         % pas sur le stock
x1sup= 120;     % maximum sur l'âge
x1inf= 0;       % minimum sur l'âge
x2sup= 45;      % maximum sur le stock
x2inf= -15;     % minimum sur le stock
Nx1=1+(x1sup-x1inf)/hx1; % nombre de points sur la grille de l'âge
Nx2=1+(x2sup-x2inf)/hx2; % nombre de points sur la grille du stock

Vp1=zeros(Nx2,Nx1);
Vp2=zeros(Nx2,Nx1);
Vp3=zeros(Nx2,Nx1);
Vp4=zeros(Nx2,Nx1);
Vp5=zeros(Nx2,Nx1);

Va1=zeros(Nx2,Nx1);
Va2=zeros(Nx2,Nx1);
Va3=zeros(Nx2,Nx1);
Va4=zeros(Nx2,Nx1);
Va5=zeros(Nx2,Nx1);

u11=zeros(Nx2,Nx1); % initialise la matrice des taux de production
ur11=zeros(Nx2,Nx1);
u14=zeros(Nx2,Nx1); % initialise la matrice des taux de maintenance préventive
ur14=zeros(Nx2,Nx1);
u45=zeros(Nx2,Nx1); %initialisation de la matrice du taux de cadencage avant la
maintenance préventive
ur45=zeros(Nx2,Nx1);
u23=zeros(Nx2,Nx1); % initialisation du taux de cadencage avant réparation.
ur23=zeros(Nx2,Nx1);

X1_op=[];
X2_op=[];

Z1_op=[];
Z2_op=[];
xx2=[];%stock
xx1=[];%âge

UU1=[];
UU3=[];
UU4=[];
UU5=[];

```

```
UU1(1)=0;
UU1(2)=d;
UU1(3)=Um;
```

```
UU3(1)=q23_min;
UU3(2)=q23_max;
```

```
UU4(1)=q14_min;
UU4(2)=q14_max;
```

```
UU5(1)=q45_min;
UU5(2)=q45_max;
```

```
it=0;
Err=10e+10;
it_max=1000;
precis=0.001;
```

```
while (Err > precis)
```

```
it=it+1;
tic
C1MIN=5e+5;
C1MAX=0;
```

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

```
for i=1:Nx2
    x2=x2inf+(i-1)*hx2;
    xx2(i)=x2;
```

```
fu=Ku*u11(i,j);
q12=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
```

```
ut11=u11(i,j);
ut23=u23(i,j);
ut14=u14(i,j);
ut45=u45(i,j);
```

```
[Vx1,Vx2,Vx3,Vx4,Vx5]=coutb5emi(i,j,x1,x2,hx1,hx2,ut11,ut45,ut14,ut23,q12,q51,q31,Vp
1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,d,Nx1,Nx2,rho,Cad,cp,cm,cmp,cr,fu);
```

```
    Va1(i,j)=Vx1;
    Va2(i,j)=Vx2;
    Va3(i,j)=Vx3;
    Va4(i,j)=Vx4;
    Va5(i,j)=Vx5;
```

```
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
if (abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j))>C1MAX)
    C1MAX=abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j));
end
if (abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j))<C1MIN)
    C1MIN=abs(Va5(i,j)-Vp5(i,j));
end

end
end
Vmin=(rho/(1-rho))*C1MIN;
```

```
Vmax=(rho/(1-rho))*C1MAX;
Err=abs(Vmin-Vmax)
```

```
Vp1=Va1;
Vp2=Va2;
Vp3=Va3;
Vp4=Va4;
Vp5=Va5;
```

```
V1_op=5e+10;
V2_op=5e+10;
V3_op=5e+10;
V4_op=5e+10;
V5_op=5e+10;
```

```
for j=1:Nx1 % age
x1=x1inf+(j-1)*hx1;
xx1(j)=x1;
for i=1:Nx2 % stock
x2=x2inf+(i-1)*hx2;
xx2(i)=x2;
q12=(Ao+ At*(1-exp(-K*xx1(j)*xx1(j)*xx1(j))));
```

```
VP1M=1000000000;
VP2M=1000000000;
VP3M=1000000000;
VP4M=1000000000;
VP5M=1000000000;
```

```
for c1=1:3
    ur11(i,j)=UU1(c1);
    fu=Ku*ur11(i,j);
```

```
for c2=1:2
    ur45(i,j)=UU5(c2);
```

```
for c3=1:2
    ur23(i,j)=UU3(c3);
```

```
for c4=1:2
    ur14(i,j)=UU4(c2);
```

```

if x1>=110
VP1M=0;
end
if x1>=105 && x2<12.5
    ur14(i,j)=UU4(2)+9;

end
ut11=ur11(i,j);%production
ut23=ur23(i,j);%cadenassage avant réparation
ut14=ur14(i,j);% taux d'envois en maintenance préventive
ut45=ur45(i,j);%cadenassage avant maintenance

```

```

[Vy1,Vy2,Vy3,Vy4,Vy5]=coutb5emi(i,j,x1,x2,hx1,hx2,ut11,ut45,ut14,ut23,q12,q51,q31,Vp
1,Vp2,Vp3,Vp4,Vp5,d,Nx1,Nx2,rho,Cad,cp,cm,cmp,cr,fu);

```

```

Va1(i,j)=Vy1;
Va2(i,j)=Vy2;
Va3(i,j)=Vy3;
Va4(i,j)=Vy4;
Va5(i,j)=Vy5;

```

```

if Vy1< VP1M
    VP1M = Vy1;
    u11(i,j)=ur11(i,j);
    u14(i,j)=ur14(i,j);

```

```

if i > 1

```

```

    if u11(i,j)==u11(i-1,j)
        xx=i;

```

```

    else
        X1_op = x2;

```

```

    end
end
end

```

```

if Vy2 < VP2M
    VP2M = Vy2;
    u23(i,j)=ur23(i,j);
end

```

```

if Vy3 < VP3M
VP3M = Vy3;
end
if Vy4 < VP4M
VP4M = Vy4;
u45(i,j)=ur45(i,j);
end
if Vy5 < VP5M
VP5M = Vy5;
end

if Vy1 < V1_op
V1_op=Vy1;
I_op = i;
J_op = j;
X2_op = x2;%stock
X1_op = x1;%age
end
if Vy2 < V2_op
V2_op=Vy2;
I_op = i;
J_op = j;
X2_op = x2;
X1_op = x1;
end
if Vy3<V3_op
V3_op=Vy3;
end
if Vy4<V4_op
V4_op=Vy4;
end
if Vy5<V5_op
V5_op=Vy5;
end

end % for c4
end %for c3
end %for c2
end %for
end %for i
end %for j
end
toc

```

```

Z1_op(j)=X1_op;
Z2_op(j)=X2_op;
Hedging_Point1 = X1_op
Hedging_Point2 = X2_op
Va1_op = V1_op
Va2_op=V2_op

```

```

figure(1)
surf(xx2,xx1,u11')
xlabel('Stock')
ylabel('Age')
zlabel('Production rate')

```

```

grid on

```

```

figure(2)
surf(xx2,xx1,u14')
xlabel('Stock')
ylabel('Age')
zlabel('Preventive maintenance rate')

```

```

grid on

```

```

figure(3)
surf( xx2,xx1,u23')
xlabel('Stock')
ylabel('Âge')
zlabel('Cadénassage avant réparation')
grid on

```

```

figure(4)
surf(xx2,xx1,u45')
xlabel('Stock')
ylabel('Âge')
zlabel('Cadénassage avant maintenance préventive')
grid on

```

```

figure(5)
surf(xx2,xx1,Va1')
xlabel('Âge')
ylabel('Stock')
zlabel('Va1')
title('Fonction valeur au mode 1')
grid on

```


BIBLIOGRAPHIE

- Akella, R. et Kumar, P.R. (1986). Optimal control of production rate in a failure-prone manufacturing system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 116-126.
- Audard, F. (2016). Modélisation Eulérienne de la vidange d'un silo et de l'expansion du panache. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- ASP. (2017). Le cadenassage : guide de prévention 5ième édition. Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction.
- Badiane, A., S. Nadeau., J.P. Kenné., V. Polotski. (2016). Optimizing production while reducing machinery lockout/tagout circumvention possibilities. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 22, No.2, pp. 188-201. 1355-2511. DOI 10.1108/JQME-04-2014-0015.
- Bahloul, A., Rafael Francisco, V.J., Djebara, A., Songmene, V., Saidi, M.N., Kouam, J., Reggio, M., et Villapando, F. (2019). Transformation du granit- Caractérisation et contrôle de la poussière de la silice émise par le polissage, Rapport Scientifique R-1054, Montréal, IRSST, 2019, 115 pages : <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1054.pdf?v=2020-02-18>
- Basnet, C. et Mize, J. (1986). Object-Oriented framework for operating flexible manufacturing systems. *Proceedings of the International Conference on Object-Oriented Manufacturing Systems*, pp. 341-346.
- Benedetti, C. (2002). Introduction à la gestion des opérations (4e éd). Québec: Sylvain Ménard.
- Bielecki, T. et P.R. Kumar. (1988). Optimality of zero-inventory policies for unreliable manufacturing systems. *Operation Research*, vol 36, pp. 532-541.
- Bironneau, L. (2000). Le choix des méthodes et outils de pilotage de la production en milieu industriel. France, Centre de Recherche Rennais en Économie et Gestion. Université de Rennes 1.
- Boukas, E.K. et A. Haurie. (1990). Manufacturing flow control and preventing maintenance: a stochastic control approach. *Automatic control*, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33, pp. 1024-1031.

- Boukas, E.K. (1997). Commande stochastique appliquée aux systèmes de production. Thèse de doctorat, Montréal, École Polytechnique de Montréal.
- Boukas, E.K. et J.P. Kenne. (1997). Maintenance and production control of manufacturing systems with setups. In lectures in applied mathematics, 33, pp. 55-70.
- Boukas, E.K. (1998). Hedging Point Policy Improvement. Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 97, n° 1, pp. 47-70.
- Bourque, G. (2016). Outil d'identification des risques : prise en charge de la santé et la sécurité au travail. Commission des Normes, de l'équité, de la santé et la sécurité au travail, pp. 10.
- Chinniah, Y. et M. Champoux. (2008). La sécurité des machines automatisées : Analyses des risques et des moyens de protection sur une presse à injection de plastique. R-557 Montréal: IRSST, pp.93.
- Clarke, F. (1983). Optimization and nonsmooth analysis Wiley. New York.
- CNESST. (2012). Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice. Guide des bonnes pratiques.
- CNESST. (2016). Cadenassage et autres méthodes de contrôle des énergies. Guide d'information sur les dispositions réglementaires.
- Dehayem Nodem, F.I. (2009). Commande optimale stochastique appliquée à la gestion de capacité des systèmes dynamiques en environnement manufacturier. Thèse de doctorat électronique, Montréal, École de technologie supérieure.
- Dehayem-Nodem, F.I., Kenné, J.P., and Gharbi, A. (2011). Production planning and repair/replacement switching policy for deteriorating manufacturing systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 57(5-8), 827-840.
- Diep Thanh, T. (2011). Commande optimale stochastique appliquée aux systèmes manufacturiers avec des sauts semi-Markoviens. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure.
- Elhafsi, M. et S.X. Bai. (1996). Optimal production control of a dynamic two-products manufacturing system with setup costs and setup times. Journal of global optimization, pp. 183-216.

- Emami-Mehrgani, Behnam. (2012). Optimisation des politiques de surveillance pas l'intégration du cadenassage/decadenassage dans la gestion de la capacité de production. Thèse de doctorat de l'École de Technologie Supérieure.
- Emami-Mehrgani, B., J.P. Kenné., S. Nadeau. (2013). Lockout/tagout and optimal production control policies in failure-prone non-homogenous transfer lines with passive redundancy. *International Journal of production Research*, Vol.51, No.4, pp.1006-1023.
- Emami-Mehrgani, B., S. Nadeau., J.P. Kenné. (2014). Optimal lockout/tagout, preventive maintenance, human error and production policies of manufacturing systems with passive redundancy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 20, No.4, pp. 453-470. DOI 10.1108/JQME-10-2012-0035.
- Fontaine, G. (2009). L'exposition à la silice cristalline dans le secteur du bâtiment et des travaux publics : un risque évitable. Agence de la santé et des services sociaux de Montréal Guide d'animation, pp. 23-26.
- Fubini, B. (1998). Health effects of silica. In *the Surface properties of silica*, John Wiley & Sons Ltd.
- Garceau, J.J. (1996). Analyse de rentabilité en ingénierie. Trois-Rivières : Éditions SMG, p. 515.
- Gershwin, S. B. (1994). *Manufacturing systems engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gharbi, A. et J.P., Kenne. (2003). Optimal production control in stochastic multiple-products multiple-machines manufacturing systems. *IIE transaction (Institute of Industrial Engineers)*, pp.941-952.
- Görner, P. et J.F. Fabriès. (1996). Industrial aerosol measurement according to the new sampling conventions. *Occupational Hygiene*, pp. 361-376.
- Guide de bonnes pratiques- Silice cristalline. (s.d). Guide de bonnes pratiques sur la protection de la santé des travailleurs dans le cadre de la manipulation et de l'utilisation de la silice cristalline et des produits qui en contiennent.
- Haghighat, F., A. Bahloul., J. Lara., R. Mostofi et A. Mahdavi. (2013). Développement d'une procédure de mesure d'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire N95

contre les nanoparticules. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail, rapport R-776, pp. 14-15.

Hämäläinen, P., J. Takala, et T. Boon Kiat. (2017). Global estimates of occupational accidents and work-related illnesses. Congrès Mondial sur la sécurité et la santé et la santé au travail, Singapour, Workplace Safety and Health Institute.

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). (1997). Fiche toxicologie 232-Silice cristalline.

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). (2015). Principes généraux de ventilation. Guide pratique de ventilation No 0. ED 695.

Institut de Recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail (IRSST). (2015). Combien coûte une lésion professionnelle. Statistique sur mesure. DS-014.

Jared, C.H., D.L. Johnson, et M.L. Phillips. (2014). Respirable silica dust suppression during artificial stone countertop cutting. The chartered Society for Worker Health Protection, vol. 59, n° 1, pp. 122-126.

Johnson, D. L., Phillips, M. L., Qi, C., Van, A. T., & Hawley, D. A. (2017). Experimental Evaluation of Respirable Dust and Crystalline Silica Controls During Simulated Performance of Stone Countertop Fabrication Tasks with Powered Hand Tools. *Annals of work exposures and health*, 61(6), 711–723. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx040>.

Kenne, J.P. et A. Gharbi. (2004). A simulation optimization based on control policy for failure prone one-machine, two-product manufacturing systems. *Computers and Industrial Engineering*, pp. 285-292.

Kenné, J.P., et Boukas, E.K. (2003). Hierarchical control of production and maintenance rates in manufacturing systems. *Journal Qual Maint Eng* 9(1): 66-82.

Kenne, J.P., E.K. Boukas., et A. Gharbi, A. (2003). Control of production and corrective maintenance rates in a multiple-machine, multiple-product manufacturing system, mathematical and computer modelling 38, pp. 351-365.

Kenne, J.P., et L.J. Nkeungoue. (2008). Simultaneous control of production of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system. *Applied Numerical Mathematics*, vol.58, Issue 2, pp. 180-194.

- Kimemia, J. et Gershwin, S.B. (1983). An algorithm for computer control of production in flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 353-362.
- Kouedeu, A.F., J.P. Kenne., P. Dejax et V. Songmene. (2014). Production and maintenance planning for failure prone deteriorating manufacturing system: A hierarchical control approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Kushner, H. et P.G. Dupuis. (1992). *Numerical methods for stochastic control problems in continuous time*. Springer-Verlag, New York.
- Li, J.R., P.K. Li, et B.T. Shu. (2007). Generation of possible multiple components disassembly sequence for maintenance using a disassembly constraint graph. *International Journal of Production Economics*, Vol .102, pp. 51-65.
- Ling, Wang, Chu, J. et Wu. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, vol.107, pp.63-151.
- Migan, Emmanuel (2015). Études de polissage du granit : pratiques industrielles, fini de surface et émission des poussières. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de Technologie Supérieure.
- Nkuengoué, L.J. (2005). Étude de commande optimale des systèmes de production en présence des modes dégradés. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de Technologie Supérieure.
- Occupational Safety and Health Administration and National Institute for Occupational Safety and Health. (2015). Worker exposure to silica during countertop manufacturing, finishing and installation. Hazard Alert. DHHS (NIOSH) Publication Number 2015-106.
- Older, G.J et Suri, R. (1980). Time optimal of part-routing in a manufacturing system with failure prone machines. In *Proceedings of the 19th IEEE conference on decision control*, vol 5, pp. 722-727.
- OMS. (2019). Lignes directrices de l’OMS pour la protection des travailleurs contre les risques potentiels des nanomatériaux manufacturés. Guides et outils techniques et de sensibilisation. DT-1036, pp. 49-51.
- Organisation Internationale du Travail. (2019). La sécurité et la santé au cœur de l’avenir du travail : mettre à profit 100 ans d’expérience. Première édition 2019.

- Ouaret, S., J.P. Kenne, A. Gharbi, V. Polotski. (2015). Age-dependent production and replacement strategies in failure-prone manufacturing systems. *Journal of engineering manufacture*, Vol 231, no 3, pp.540-554.
- Ouaret, Samir. (2012). Modélisation et évaluation des performances d'un système hybride fabrication réutilisation en logistique inverse. Mémoire de maîtrise de l'École de Technologie Supérieure.
- Rishel, R. (1975). Control of systems with jumps Markov disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp.241-244.
- Rivera-Gómez, Héctor., Gharbi, Ali., Kenné, Jean-Pierre., Montañó-Arango, Oscar et Hernández-Gress, Eva Selene. (2018). Subcontracting strategies with production and maintenance policies for a manufacturing system subject to progressive deterioration. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, vol. 200, pages 103-118.
- Rivera-Gómez, Héctor., Gharbi, Ali., Kenné, Jean-Pierre., Montañó-Arango, Oscar et Jose Ramón Corona-Armenta. (2020). Joint optimization of production and maintenance strategies considering a dynamic sampling strategy for a deteriorating system. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 140, 106273.
- Ross, S.M. (2003). *Introduction to probability models eighth edition*. Academic press.
- Sabourin, G. (2013). Silice cristalline la poussière qu'on a à l'œil. CNESST, Prévention au travail, hiver 2012-2013, Vol25, n° 4, pp. 3-14.
- Sader, B.H. et C.D. Sorensen. (2003). Deterministic and stochastic dynamic modelling of continuous manufacturing system using analogies to electrical system. *Proceedings of 2003 simulation conference: Driving innovation*, New Orleans, LA, United States, institute of Electrical and Electronics Engineer Inc.
- Saidi, M.N, V. Songmene, J. Kouam, et A. Bahoul. (2019). Study of surface quality and dust particles emission and dispersion during dry polishing of granite. In press, *Adv. Manuf. Tech.*
- Saidi, N.M. (2018). Polissage du granit : qualité, émission, et dispersion des poussières et moyens de contrôle à la source. Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure

- Saidi, M.N., Djebara, A., Songmene, V. *et al.* Experimental Evaluation of Three Local Exhaust Ventilation Systems Designed to Reduce Ultrafine Dust Emission During a Polishing Process. *Aerosol Sci Eng* **4**, 9–17 (2020). <https://doi.org/10.1007/s41810-019-00050-5>
- Samba, Ness Gracia. (2017). Intégration de la dynamique de l'humain dans la planification de la production d'un système manufacturier. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure.
- Songmene, V., J. Kouam et A. Bahloul, (2018), Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite, *Measurement*, Volume 114, January 2018, Pages 398-408; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.012>
- Stecke, K.E. et J.J. Solberg. (1981). Loading and control policies for a flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, pp. 481-490.
- Szymendera, S.D. (2016). Respirable crystalline silica in the workplace: New occupational safety and health administration (OSHA standards). In *Congressional Research Service*, 7-5700.
- Takala, J., P. Hämäläinen., K.L. Saarela., L.Y. Yun., K. Manickam., T.W. Jin., P. Heng., C. Tjong., L.G. Kheng., S. Lim., et G.S. Lin. (2014). Global estimates of the burden of injury and illness at work in 2012. *Journal of Occupational and Environment Hygiene*, 11:5, 326-337, DOI: 10.1080/15459624.2013.863131.
- Yotat Kemi, F.E. (2017). Optimisation des stratégies de fabrication et de réutilisation de l'aluminium en logistique inverse. Mémoire de maîtrise en génie mécanique, École de Technologie Supérieure.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Production Research*, vol.1, p.469-489.
- Yan, H., et Q. Zhang. (1997). A numerical method in optimal production and setup scheduling of stochastic manufacturing systems. *Automatic Control, IEEE Transaction on*, vol 42, n° 10, pp. 1452-1455.
- Zhang, G., R. Liu, L. Gong, et Q. Huang. (2006). An analytical comparison on cost and performance among DMS, FMS, AMS and RMS. In *reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, pp. 659-673. Springer Berlin Heidelberg.