

**Erreur humaine et intégration du cadenassage/décadenassage
à la planification de la production et de la maintenance avec
demande stochastique dans un système manufacturier flexible**

par

Issa DIOP

MÉMOIRE PAR ARTICLES
PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MEMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 22 FEVRIER 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Nadeau Sylvie, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Behnam Emami-Mehrgani, codirecteur de mémoire
Groupe Synetik

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

M. Ali Gharbi, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

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

LE 24 JANVIER 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le travail présenté est effectué sous la forme d'un mémoire par articles. L'article de revue avec comité de pairs qui constitue le cœur de ce mémoire a été soumis le 02 octobre 2017 à la revue IJPR (*International Journal of Production Research*). Le troisième chapitre du mémoire présente l'article en question : « Erreur humaine et intégration du cadenassage/décadenassage à la planification de la production et de la maintenance avec demande stochastique dans un système manufacturier flexible » (*Human error, optimal production control policies, corrective maintenance with lockout/tagout and random demand*). L'article est rédigé en anglais pour des raisons de publication, mais le reste du mémoire est en français. L'opportunité de publier en anglais élargit la diffusion des résultats à un grand nombre de lecteurs. Préalablement, les résultats en mi-chemin ont été soumis et présentés devant la communauté scientifique à l'occasion d'un congrès provincial et international. Ainsi, une affiche de vulgarisation scientifique avec comité de pairs a été présentée au 38ième congrès de la Fondation de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST) sur le thème « comportements sécuritaires, les tiens, les miens, les nôtres » à Shawinigan, QC, Canada (du 18 au 20 mai 2016). Par ailleurs, un résumé informatif a été soumis et présenté au huitième congrès de l'AHFE (*International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*) à Los Angeles (Californie, États-Unis). De même, une présentation de la problématique et des objectifs de recherche a été réalisée à la cinquième édition de « Ma thèse en 180 secondes » à l'École de technologie supérieure, ÉTS, 2016.

« *Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien* », Socrate.

REMERCIEMENTS

Il est toujours difficile de faire un retour aux études après un long *break*. Cette décision fût l'une des plus importantes dans ma vie. Le travail de recherche réalisé durant mes deux années de maîtrise au sein de l'Équipe de REcherche en Sécurité du Travail (ÉREST) à l'École de technologie supérieure (ÉTS) a impliqué d'énormes sacrifices, mais bonifie mon expérience en tant que jeune chercheur.

Je tiens à remercier sincèrement les deux personnes qui m'ont encadré tout au long de la maîtrise à savoir ma directrice Sylvie Nadeau, professeure titulaire en génie mécanique à l'École technologie supérieure (ÉTS) et mon codirecteur Behnam Emami-Mehrgani, directeur de production au Groupe Synetik. C'est grâce à leur encadrement et disponibilité que j'ai pu définir les contours de ce projet et aboutir aux objectifs de la recherche. Leurs rétroactions ont été très objectives et constructives afin de clarifier les orientations et la portée du projet de recherche.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury : M. Yvan Beauregard, président du jury (département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure, ÉTS) et M. Ali Gharbi, membre du jury (département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure, ÉTS). Leurs remarques ont été très constructives et m'ont permis de faire les dernières retouches de ce travail.

Je remercie le décanat des études de l'ÉTS, et la Fondation de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST), pour leur soutien financier sous forme de bourses.

Je tiens à remercier les organisateurs du huitième congrès de l'AHFE (*International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*) d'avoir accepté la présentation de mon résumé informatif de conférence à Los Angeles (Californie, États-Unis). À cet égard, je remercie également l'École de technologie supérieure (ÉTS). Grâce à l'octroi de la bourse de financement pour le rayonnement de la recherche - Soutien financier pour la diffusion et le rayonnement des travaux de recherche à des congrès ou colloques – j'ai pu présenter mes travaux à ce congrès international.

VIII

J'adresse aussi mes remerciements aux organisateurs du 38^{ième} congrès de la Fondation de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST) d'avoir accepté mon affiche de vulgarisation scientifique.

Mes remerciements vont également à l'endroit du décanat des études de l'ÉTS d'avoir accepté ma participation à la cinquième édition de « Ma thèse en 180 secondes » en 2016.

Je remercie également mes collègues au laboratoire de l'Équipe de REcherche en Sécurité du Travail (ÉREST) et à l'administration de l'École de technologie supérieure (ÉTS) pour leur amitié et encouragements tout au long de mes travaux.

Mes remerciements vont également à mes proches pour leur soutien sans failles. À ma mère, mes frères et sœurs, sans oublier mon défunt père. Que la terre de Kelle lui soit légère.

ERREUR HUMAINE ET INTÉGRATION DU CADENASSAGE/DÉCADENASSAGE À LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE AVEC DEMANDE STOCHASTIQUE DANS UN SYSTÈME MANUFACTURIER FLEXIBLE

Issa DIOP

RÉSUMÉ

Le cadenassage/décadenassage (C/D) est une obligation légale au Québec selon l'article 188.2 du règlement sur la santé et la sécurité du travail, RSST (*D. 1187-2015, a. 3*). Récemment, en septembre 2015, le conseil d'administration de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) a entériné un projet de règlement plus sévère visant à introduire dans le RSST des dispositions plus spécifiques sur le C/D et les méthodes de contrôle des énergies dangereuses. Les modifications apportées viennent préciser notamment les responsabilités de chaque intervenant.

Ce projet de recherche traite un problème de processus décisionnels des systèmes de production. L'objectif principal vise le développement d'une politique de commande optimale, robuste et souple, facilitant l'intégration du C/D à la planification de la production et de la maintenance corrective (MC) dans un système manufacturier flexible (FMS). La finalité est de minimiser les coûts totaux de production intégrant les coûts d'inventaire et de pénurie et d'inciter de manière durable, par le biais du C/D, le travailleur ainsi que l'employeur à rendre leurs lieux de travail sécuritaires. À cet égard, la prise en considération du FMS dans un environnement incertain a permis de mettre en exergue l'importance de l'erreur humaine (EH) à la gestion conjointe de la production et de la MC intégrant les procédures de C/D selon l'article de la CNESST susmentionné.

Le FMS sous étude est constitué d'une machine produisant deux types de produits (M1P2) pour répondre à deux types de demandes. Le système est sujet à la défaillance humaine sous forme d'EH, ainsi qu'à des pannes et des réparations stochastiques.

Une politique de commande optimale de la production et de la MC est développée par le biais d'une approche combinant un formalisme analytique et des méthodes numériques ainsi

qu'expérimentaux. Cette dernière est basée sur la simulation, les plans d'expériences et des outils statistiques, ainsi que les algorithmes génétiques. Par ailleurs, une illustration numérique et une analyse de sensibilité seront présentée pour exprimer l'utilité et l'efficacité de l'approche proposée.

In fine, il sera déterminé le taux de production qui minimise les coûts escomptés d'inventaire et de pénurie dans un horizon de planification infinie. Cette approche permet de définir les processus de décision optimaux à moindre coût et réalistes d'intégration du C/D dans un FMS tout en prenant en compte l'influence de l'EH à la politique de commande optimale de la production et de la maintenance.

Mots-clés : Commande optimale de la production, Maintenance corrective, Cadenassage / décadenassage, Erreur humaine.

OPTIMAL PRODUCTION AND CORRECTIVE MAINTENANCE POLICY IN A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM WITH LOCKOUT/TAGOUT, HUMAN ERROR AND RANDOM DEMAND

Issa DIOP

ABSTRACT

Lockout/tagout (LOTO) has become a legal obligation in Quebec under article 188.2 of Quebec legislation on occupational health and safety (RSST). Before undertaking any work in the danger zone of a machine LOTO must be applied in accordance with this subdivision. In September of 2015, the CNESST endorsed a draft proposing stricter OHS guidelines. The RSST has included more specific regulations with regard to LOTO and hazardous energy control methods. These new regulations spell out the duties of each actor and encourage workers and employers to stay mindful of health and safety in the workplace.

LOTO is practised in manufacturing facilities to ensure safety during machinery maintenance procedures. In flexible manufacturing systems, human error (HE) is a major source of accidents and process deviations. Special measures are needed to minimize occupational risk and increase operational efficiency.

In this article, we consider a production control problem involving a failure-prone machine meeting two types of demand and we discuss the associated decision-making process. The aim is to develop an optimal, robust and flexible control strategy that facilitates the integration of LOTO into corrective maintenance (CM) and ultimately into production. By planning CM, machine availability is increased, and inventory can be built up. The influence of HE on flexible manufacturing systems (FMS) is viewed in terms of production and maintenance planning. The frequency of machine repair depends largely on HE. The intrinsic costs of shortage, inventory and CM are optimised over an unbounded planning horizon. Analytical formalism is combined with discrete events simulation, as well as design of experiments and a genetic algorithm to identify the optimal planning of production and CM with mandatory LOTO. A numerical example and sensitivity analysis are proposed to express, in quantitative terms, the usefulness and efficiency of the proposed approach.

Keywords : Optimal production control, Corrective maintenance, Lockout/tagout, Human error.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Méthode de recherche	9
1.2.1 Approche « effet boule de neige » (snowball-approach).....	9
1.2.2 Définition du plan de concept.....	11
1.2.3 Sélection d'un échantillon d'articles.....	12
1.2.4 Résultats.....	12
1.3 Organisation des systèmes manufacturiers	13
1.3.1 Introduction.....	13
1.3.2 Systèmes manufacturiers	14
1.3.3 Système manufacturier flexible (FMS).....	15
1.3.4 Système manufacturier reconfigurable (RMS)	19
1.3.5 Industrie 4.0	21
1.4 Politique de maintenance	22
1.4.1 La maintenance préventive	24
1.4.2 La maintenance corrective / réactive	27
1.4.3 La maintenance prédictive	28
1.4.4 Maintenance productive.....	29
1.5 Cadenassage/décadenassage (C/D).....	34
1.6 Erreur humaine.....	36
1.7 Approche d'optimisation	37
1.7.1 Introduction.....	37
1.7.2 Commande optimale dans un environnement manufacturier	38
1.7.3 Approche de résolution mathématique	39
1.7.4 Optimisation basée sur la simulation	41
1.7.5 Algorithmes génétiques	44
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE, MÉTHODOLOGIE, CONTRIBUTION ET STRUCTURE DE LA RECHERCHE.....	51
2.1 Introduction.....	51
2.2 Structure du mémoire.....	52
2.3 Objectifs et hypothèses de la recherche	52
2.4 Question de recherche.....	55
2.5 Méthodologie de recherche.....	56
2.6 Contribution et retombées scientifique	58
CHAPITRE 3 HUMAN ERROR, OPTIMAL PRODUCTION CONTROL POLICIES, CORRECTIVE MAINTENANCE WITH LOCKOUT /TAGOUT AND RANDOM DEMAND	61

3.1	Abstract	61
3.2	Introduction.....	62
3.3	Literature review.....	63
3.4	Notations and assumptions	68
3.4.1	Notations	68
3.4.2	Assumptions.....	69
3.5	Problem statement.....	69
3.6	Numerical example	76
3.6.1	Production policy structure	79
3.6.2	Simulation model	81
3.6.3	Design of experiment and genetic algorithm methodologies	84
3.7	Sensitivity analysis.....	87
3.8	Discussion	90
3.9	Conclusion	92
3.10	Acknowledgments.....	93
3.11	Appendices.....	93
3.11.1	Optimality conditions.....	93
3.11.2	Numerical method.....	95
3.11.3	Experimental design.....	100
	REFERENCES	101
	CONCLUSION	109
ANNEXE I	LISTE DES PUBLICATIONS	113
ANNEXE II	RÉSUMÉ INFORMATIF PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'AHFE 2017	115
ANNEXE III	AFFICHE DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE AVEC COMITÉ DE PAIRS PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'AQHSST	117
ANNEXE IV	RÉSOLUTION DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES SOUS MATLAB	119
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	121

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Principes de l'industrie 4.0	22
Tableau 1.2	Terminologie des algorithmes génétiques	45
Table 3.1	Values of the numerical parameters.....	78
Table 3.2	Levels on input factors.....	85
Table 3.3	Polynomial coefficients and cost function.....	86
Table 3.4	MATLAB parameters for the GA.....	86
Table 3.5	Sensitive analysis outcomes.....	87
Table 3.6	Experimental design wizard.....	100

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Cartographie de la recherche bibliographique	10
Figure 1.2	Plan de concepts.....	11
Figure 1.3	Types de documents recensés	13
Figure 1.4	Relation entre les types de flexibilité (Bowne et al., 1984)	17
Figure 1.5	Maintenance préventive	26
Figure 1.6	Maintenance corrective.....	28
Figure 1.7	Maintenance prédictive.....	29
Figure 1.8	Maintenance productive.....	30
Figure 1.9	Choix d'une méthode de maintenance	33
Figure 1.10	Impacts d'une mauvaise gestion de la maintenance	33
Figure 1.11	Méthodes d'optimisation basée sur la simulation	42
Figure 1.12	Processus de résolution des algorithmes génétiques.....	46
Figure 2.1	Système de production étudié	53
Figure 2.2	Cartographie de la méthodologie de recherche.....	57
Figure 3.1	Methodological approach.....	70
Figure 3.2	The flexible manufacturing system under study	71
Figure 3.3	Transition diagram of machine states	72
Figure 3.4	FMS production rate for product 1	79
Figure 3.5	FMS production rate for product 2	80
Figure 3.6	Simulation model	82
Figure 3.7	Average inventory level.....	83
Figure 3.8	Average time in system.....	83

Figure 3.9	Changes in the production threshold as a function of the cost of product shortage	88
Figure 3.10	Change in the production threshold as a function of inventory cost.....	89
Figure 3.11	Change in the production threshold as a function of the CM and LOTO duration.....	90

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Abréviations, sigles et acronymes

Descriptions

<i>d</i>	Demande
<i>MP</i>	Matière première
<i>C/D</i>	Cadenassage/décadenassage
<i>LOTO</i>	Lockout / tagout
<i>MC</i>	Maintenance corrective
<i>CM</i>	Corrective maintenance
<i>EH :</i>	Erreur humaine
<i>HE</i>	Human error
<i>CNESST</i>	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité au travail
<i>RSST</i>	Règlement sur la santé et la sécurité au travail
<i>SST</i>	Santé et sécurité au travail
<i>HJB</i>	Hamilton-Jacobi-Bellman
<i>HPP</i>	Hedging Point Policy (Politique de production à seuil critique)
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failures (Temps moyen entre deux défaillances)
<i>MTTR</i>	Mean Time to Repair (Temps moyen de réparation)
<i>DOE</i>	Design of experience (Plan d'expérience)
<i>AG_S</i>	Algorithmes génétiques
<i>GA_S</i>	Genetic Algorithms
<i>RAC</i>	Journal de revue avec comité de pairs
<i>CAC</i>	Conférence avec comité de pairs
<i>AGV</i>	Véhicule à guidage automatique, ou véhicule autoguidé (robot) est un robot qui se déplace de façon autonome sans l'intervention humaine (<i>Automated Guided Vehicle or Automatic Guided Vehicle</i>).
<i>FMS</i>	Système manufacturier flexible (<i>Flexible Manufacturing System</i>)
<i>RMS</i>	Système manufacturier reconfigurable (<i>Reconfigurable Manufacturing System</i>)
<i>ACM</i>	Atelier à cheminements multiples (Job-shop)
<i>NGM</i>	Nouvelle génération de systèmes de production (<i>Next Generation Manufacturing</i>)
<i>BIG DATA</i>	Mégadonnées ou données massives (volumes de données à traiter de plus en plus considérables et présentant de forts enjeux)
<i>RÉALITÉ AUGMENTÉ</i>	Interface entre des données virtuelles et le monde réel (sons, images 2D, 3D, vidéos, etc.)

<i>PRODUIT INTELLIGENT</i>	Le produit coopère avec un autre produit
<i>CAPACITÉ EN TEMPS RÉEL</i>	Tableaux de bord en temps réel permettant d'améliorer le suivi des paramètres et l'analyse des données afin de prendre des décisions.
<i>IOT</i>	Internet des objets (Internet of things)
<i>MESI</i>	Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation - Québec
<i>CCTT</i>	Centres collégiaux de transfert de technologie
<i>CEFARIO</i>	Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFARIO)
<i>CRIQ</i>	Centre de recherche industrielle du Québec
<i>STIQ</i>	Sous-Traitance Industrielle Québec
<i>PRODUCTIQUE QUÉBEC</i>	Centre collégial de transfert de technologie en production assistée par ordinateur (Centre de Productique Intégrée du Québec Inc.)

LISTE DES SYMBOLES

$x(\cdot)$	Levels of inventory/shortage	$J(\cdot)$	Total cost function
d_1	Product 1 demand rate	z_j	Optimal inventory level of product type j
d_2	Product 2 demand rate	c^+	Unit manufactured holding cost per time unit
$u_1(\cdot)$	Production rate for demand 1	c^-	Unit order shortage cost per time unit
$u_2(\cdot)$	Production rate for demand 2	c_r	Corrective maintenance cost
U_{\max}	Maximal production rate	c_{LOTO}	Logout/tagout cost (LOTO cost)
$\alpha(\cdot)$	Time continuous and finite state Markov process	c^α	Operation cost under CM at state $\alpha(\cdot)$
$\Theta(\cdot)$	System state	$q_{\alpha\beta}$	Transition rate from state α to β
$\xi(\cdot)$	Stochastic process of machine states	r_{21}	Corrective maintenance rate without human error (CM - WOHE) with demand d_1
Ω	Set of system modes	r_{31}	Corrective maintenance rate with human error (CM - WHE) with demand d_1
$\Gamma(\cdot)$	Set of admissible production capacity for each	r_{54}	Corrective maintenance rate without human error (CM - WOHE) with demand d_2
$Q(\cdot)$	Transition matrix	r_{64}	Corrective maintenance rate with human error (CM - WHE) with demand d_2
$\pi(\cdot)$	Probability limit	h_x	Increment of the finite difference interval of variable x
ρ	Discount rate	$\vartheta_x(\cdot)$	Value function given a small increment of the inventory x
$g(\cdot)$	Instantaneous cost	$\vartheta(\cdot)$	Approximation of the value function given a small increment of h_x

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, des centaines de travailleurs de différentes industries manufacturières ont été victimes d'accidents ou d'incidents lors d'interventions sur des machines ou des équipements en panne (Bulzacchelli et al., 2008; Bulzacchelli et al., 2007). À cet égard, de nombreux chercheurs confirment un niveau de risque élevé inhérent au métier de la maintenance des machines (Grusenmeyer, 2000; 2005; Lind, 2008; 2009; Väyrynen, 1984). En réponse à cette situation, l'utilisation de procédures de cadenassage / décadénassage (C/D) est l'une des solutions pour prévenir les accidents et incidents liés au métier de la maintenance des équipements en panne (Matsuoka et al., 2001).

Le C/D est devenu une obligation légale au Québec selon l'article 188.2 du règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST). Cette réglementation indique les mesures de sécurité à suivre avant d'entreprendre toute action de maintenance, de réparation ou de déblocage dans la zone dangereuse d'une machine.

Le C/D se définit comme « une mesure de prévention pour contrer les blessures causées par le dégagement intempestif d'une source d'énergie lors de l'installation, de l'entretien ou de la réparation d'une machine, d'un équipement ou d'un processus industriel » (*cf. D. 1187-2015, a. 3.art. 188.2*). Autrement dit, le C/D est un ensemble de procédures et de bonnes pratiques qui ont pour finalité la maîtrise de toutes sources d'énergie du système pour rendre l'intervention d'un technicien de maintenance saine et sécuritaire. Toutefois, malgré cette obligation légale de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), des chercheurs soulignent que l'utilisation de ces procédures de C/D, sous sa forme actuelle, présente certaines lacunes (Charlot et al., 2007; Emami-Mehrgani et al., 2012). Malheureusement, des entreprises continuent toujours à négliger les règles de sécurité relatives au C/D. En réponse à cette situation, le conseil d'administration de la CNESST a entériné un projet de règlement plus sévère visant à introduire dans le RSST des dispositions plus spécifiques sur le C/D et les méthodes de contrôle des énergies dangereuses en septembre 2015. Les modifications apportées viennent préciser notamment les responsabilités de chaque intervenant. Ces dispositions réglementaires permettront d'inciter de manière durable les

travailleurs et les employeurs à rendre leurs lieux de travail sains et sécuritaires. Néanmoins, l'unique utilisation du C/D sous forme procédurale est une solution imparfaite (Matsuoka et al., 2001). Pour cette raison, Burlet-Vienney et al. (2014) ont conçu un prototype intelligent pour l'observation et le suivi de ces procédures de C/D pendant les activités de maintenance. En revanche, des résultats d'études de cas réels d'entreprise montrent qu'un certain nombre de conditions sont requises pour satisfaire simultanément les recommandations du RSST (Chinniah et al., 2015). Cet article s'intéresse aux conditions requises pour accéder à la zone dangereuse d'une machine. Cependant, malgré la maîtrise du risque inhérent à la technologie des équipements, le risque d'erreur humaine (EH) en cours d'interventions des techniciens sur des machines en panne présente une probabilité importante (Noroozi et al., 2013; Whittingham, 2004) et un taux élevé d'indisponibilité des équipements de production. Un cas pratique a été exploré par Noroozi et al. (2014) dans une étude d'analyse de l'EH dans les procédures de maintenance d'une pompe. Ces derniers ont développé une série de scénarios de défaillances possibles lors d'opérations de démontage et de montage des composants. Ainsi, par le biais d'une analyse des facteurs humains dans les opérations de pré-maintenance et post-maintenance (Technique for Human Error Rate Prediction (THERPS), Human Error Probability (HEP)), ils indiquent que la prise en compte de l'EH dans l'analyse quantitative de risques dans les procédures de maintenance réduit considérablement la fréquence des erreurs humaines et augmente la disponibilité et la fiabilité du système. Dans le même ordre d'idée, Emami-Mehrgani et al. (2014) confirment que l'EH peut allonger les temps de réparation et son introduction dans les activités de maintenance et de C/D augmente les coûts de production, d'inventaire, de pénurie et de risques d'accidents du travail. Ces auteurs montrent l'importance de la fiabilité humaine dans l'activité de maintenance préventive avec C/D. Leur modèle permet d'aboutir à des résultats minimisant les coûts de production, d'inventaire et de maintenance sur un horizon de planification infini.

Cette problématique de l'EH est à l'origine de plusieurs catastrophes dans des domaines divers et constitue un facteur causal majeur dans l'émergence des accidents. Quelques évènements et chiffres associés à l'EH en maintenance soulignent la place de l'opérateur humain dans la genèse des accidents. Par exemple, une étude sur des équipements

électroniques révèle que 30% des défaillances sont dues à des erreurs d'opération et de maintenance (U.S. Army Material Command, 1972).

Ce sujet constitue déjà un élément d'intérêt majeur dans la communauté scientifique où des chercheurs s'intéressent de plus en plus aux volets santé et sécurité du travail (SST) (Emami-Mehrgani et al., 2014; Emami-Mehrgani et al., 2015). Cependant, la prise en considération du volet EH durant la phase de maintenance est faiblement considérée (Noroozi et al., 2014).

CHAPITRE 1

REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La planification de la production et de maintenance dans un FMS est un domaine qui, aujourd’hui, regorge de références scientifiques. Cependant, au meilleur de nos connaissances, des études qui traitent de l’intégration du cadenassage /décadenassage (C/D) dans un FMS avec une prise en considération des facteurs humains sous la forme d’erreurs humaines sont pratiquement inexistantes. De nombreux travaux disponibles dans la littérature scientifique démontrent le succès des FMS et leur importance dans la productivité et la qualité dans de nombreuses industries manufacturières (Chan et al., 2007; 2008). Dans un FMS l’intervention de l’humain est moindre par rapport à des modèles traditionnels basé sur des systèmes de manutention (*Material Handling System (MHS)*) où l’opérateur est constamment impliqué pour le transport des matériaux entre les différentes sites (Raouf et al., 1995). En effet, dans un système manufacturier flexible, cet aspect est entièrement supporté par des systèmes de véhicule à guidage automatique (*Automated Guided-Vehicle Systems (AGVS)*) et par des ordinateurs de contrôle des systèmes de manutention (*Computer-controlled MHS*). Pour plus de développements, le lecteur peut se référer aux travaux de Raouf et al. (1995) et à ses références bibliographiques. Toutefois, la présence de l’humain dans un FMS est incontournable lors des activités de programmation de mise en marche, de maintenance, etc., d’où la nécessité de prendre en considération l’impact mutuel FMS-Humain durant ces phases sous forme d’erreur humaine (EH).

Le cadre général de cette étude est bâti sur une revue systématique et critique de la littérature dans le but de synthétiser les travaux les plus signifiants dans la sphère scientifique se rapportant à la problématique de l’influence de l’EH sur l’activité de planification optimale de la production et de la maintenance intégrant le C/D.

Un survol exhaustif des travaux pertinents relevant du sujet de recherche a permis de catégoriser la littérature publiée et de faire une analyse critique des différentes recommandations de la communauté scientifique. À cet égard, nous remarquons l’existence de

trois (3) catégories d'auteurs : 1 - une première catégorie s'intéresse à la planification optimale des politiques de commande optimale de la production et de la maintenance préventive et corrective, 2 - une deuxième catégorie, suggère la prise en considération de l'étape du C/D au modèle d'affaire du système manufacturier flexible, 3 - la dernière catégorie d'auteurs intégrant les facteurs humains sous la forme d'EH ou de fiabilité humaine sont rares. C'est le cas d'Emami-Mehrgani et al. (2014); Emami-Mehrgani et al. (2015).

DANS LA PREMIERE CATEGORIE, les recommandations de la communauté scientifique tournent autour d'un seuil critique (*Hedging Point Policy (HPP)*) qui suggère de maintenir un certain niveau de produits finis en inventaire pour faire face aux aléas de la production et limiter les pénalités d'une pénurie en cas d'indisponibilité du système de production. À ce sujet, des chercheurs tels que Gershwin et al. (1984), Akella et al. (1986) ont traité cette problématique de politique de commande optimale à seuil critique. En effet, cette politique de commande est conditionnée par le niveau des inventaires. Elle suggère de produire à un taux maximal lorsque le niveau des inventaires est inférieur à ce seuil et d'arrêter de produire quand le niveau des inventaires est supérieur à cette valeur et donc suffisant pour satisfaire la demande. Cependant, il est plus prudent et crucial de garder la production égale à la demande si le niveau des inventaires de produits finis est égal à ce seuil critique.

Dans le même ordre d'idée, des chercheurs tels que Boukas et al. (1990) ont traité un modèle simultané de commande de la production et de la maintenance périodique avec une probabilité de défaillance croissante en fonction de l'âge de la machine en se basant sur les travaux de Gershwin et al. (1984); Kimemia et al. (1985) ; Olsder et al. (1980). Par la suite, Kenné et al. (1997) ont proposé une extension de ces modèles à seuil critiques en intégrant la commande des taux de maintenance en fonction du niveau d'inventaire. À cet égard, ils suggèrent la modulation des réparations à un taux minimal lorsque l'arrivée d'une panne coïncide avec un niveau confortable de l'inventaire et donc supérieur au seuil critique de réparation R (cf. l'équation ci-après). Toutefois, ces auteurs suggèrent d'effectuer la réparation à un taux maximal générant des coûts dispendieux lorsqu'une défaillance apparaît à un moment critique où le niveau d'inventaire de produits finis est inférieur à ce seuil optimal R , mais permettant de minimiser les pénalités d'une éventuelle pénurie et sauvegarder donc l'image de marque de l'entreprise. Le lecteur peut se référer aux travaux de Kenné et al. (2004b) et Kenné

et al. (2003) qui ont élargi ce modèle à des systèmes manufacturiers composés de plusieurs machines produisant plusieurs produits démontrant ainsi l'utilité de cette politique à seuil critique pour la commande des réparations. Cette politique peut se résumer dans l'équation ci-après :

$$u(.) = \begin{cases} u_{r_{\max}} & \text{si } x \geq R \\ u_{r_{\min}} & \text{si } x < R \end{cases} \quad (1.1)$$

Avec,

- u_{\max}, u_{\min} , respectivement, le taux maximal et minimal de réparation.
- R : seuil optimal de réparation.

Dans la même direction, par le biais d'une approche de combinaison d'un formalisme analytique avec des outils statistiques basés sur la simulation et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR), Gharbi et Kenné (2005) ont développé une approximation des politiques optimales de commande de la production et de la maintenance préventive pour un système manufacturier. Il est courant de retrouver ce type d'études dans la littérature s'intéressant uniquement à la problématique de commande optimale de la production et de la maintenance sans prendre en considération l'étape du C/D ou l'influence des facteurs humains sous la forme d'EH ou de fiabilité humaine.

LA DEUXIEME CATEGORIE d'auteurs ont pris en compte dans leurs travaux de recherche la problématique du C/D, mais ont passé sous silence son corollaire les facteurs humains sous forme d'EH. C'est le cas de Charlot et al. (2007) qui développent une étude d'intégration du C/D à la planification de la production en mettant en application une théorie pour déterminer une loi de commande qui fournit les taux de production, d'envoi en C/D, d'inspection et de réparation des machines de façon à commander le temps du C/D. En effet, selon ces auteurs, tous les paramètres de commande sont donnés en fonction de l'inventaire. Ainsi, dans leurs travaux, ils ont démontré l'existence d'un coût optimal qui intègre la sécurité à la planification de la production à travers le C/D pour diminuer les risques d'accidents, de plus ils ont montré que la commande du C/D est optimal par rapport au C/D à un taux fixe. Seulement, ces derniers se sont heurtés au problème de la résolution numérique des équations différentielles de Hamilton-Jacobi-Bellman avec l'augmentation du nombre des machines qui rend le problème beaucoup plus complexe à résoudre. Badiane et al. (2010) conclut sur la

nécessité incontournable de considérer l'étape du C/D comme une activité à part entière à la planification optimale de la production et de la maintenance.

DANS LA DERNIERE CATEGORIE d'auteurs, la littérature est peu abondante. Cependant, il est inutile de préciser que les facteurs humains sous la forme de risque d'erreur ou de fiabilité humaine reçoivent une attention croissante au fil des années et constituent de nos jours un élément d'intérêt majeur dans le milieu scientifique. Le risque d'erreur humain est une combinaison de probabilité d'occurrence d'une erreur et de sa sévérité (Kuselman, 2015). Emami-Mehrgani et al. (2014) ont réalisé une étude permettant d'optimiser les coûts de production, d'inventaire et de maintenance intégrant le C/D dans un horizon de planification infini. Cependant, ces derniers se sont surtout confrontés aux difficultés de la résolution numérique des équations différentielles de Hamilton-Jacobi-Bellman avec l'augmentation du nombre des machines qui rend le problème beaucoup plus complexe à résoudre. En effet, ces chercheurs ont eu recours à une approche de modélisation analytique et de résolution numérique qui laisse apparaître une incomplétude du paramétrage de l'heuristique de résolution de la loi de commande. Une approche d'optimisation combinant l'intelligence artificielle par exemple l'algorithme génétique et l'optimisation basée sur la simulation d'événements discrets/continus est prometteuse pour traiter le problème de commande optimal de la production et des activités de maintenance intégrant le C/D.

Dans le même ordre d'idée, Faber et al. (2015) ont proposé un système de commande automatique plus souple et flexible basé sur un modèle cognitif automatisé constitué d'une unité de commande cognitif (*Cognitive Control Unit (CCU)*) et d'un planificateur de séquences d'assemblage (*Graph-based Assembly Sequence Planer (GASP)*). Dans le travail présenté (Faber et al., 2015), une étude de simulation a été réalisée en mettant l'accent sur la réduction des changements entre l'opérateur humain et le robot d'assemblage afin de diminuer les événements redoutés sources d'accidents du travail.

Pour mieux cerner la problématique de recherche, cette revue de littérature est structurée en sept sections incluant la présente section introductory. La seconde section présente la méthode de recherche (approche effet boule de neige, définition du plan de concept et présentation des résultats des références sélectionnées sur des bases de données (Compendex, Inspec, Google scholars, Scopus)). L'organisation des systèmes manufacturiers

font l'objet de la troisième section. La section quatre introduit la politique de maintenance. L'approche d'intégration du C/D dans les systèmes manufacturiers est analysée dans la section cinq. La section six explore les facteurs humains et l'EH en particulier. La dernière section de cette revue de littérature est consacrée aux méthodes d'optimisation de la production et de la maintenance dans les systèmes manufacturiers afin d'aboutir aux objectifs et hypothèses de recherche.

1.2 Méthode de recherche

1.2.1 Approche « effet boule de neige » (snowball-approach)

Pour avoir une cartographie de l'état de l'art de la recherche au sujet de la planification de la production et de la maintenance avec intégration du C/D et la prise en compte des facteurs humains (FH) sous forme d'erreur humaine (EH), une revue systématique et critique de la littérature basée essentiellement sur une approche ‘effet boule de neige’ (snowball-approach) (Glock, 2012) est développée dans ce mémoire. Le plan de concept a permis de choisir une combinaison de termes pour la recherche documentaire sur les moteurs de recherche spécialisés Compendex, Inspec, Google scholars, Scopus, pour identifier les travaux les plus significatifs qui interviennent, au sens large, à la planification de la production et de la maintenance et les facteurs humains en termes d'erreur humaine (EH). La figure 1.1 ci-dessous schématise la démarche:

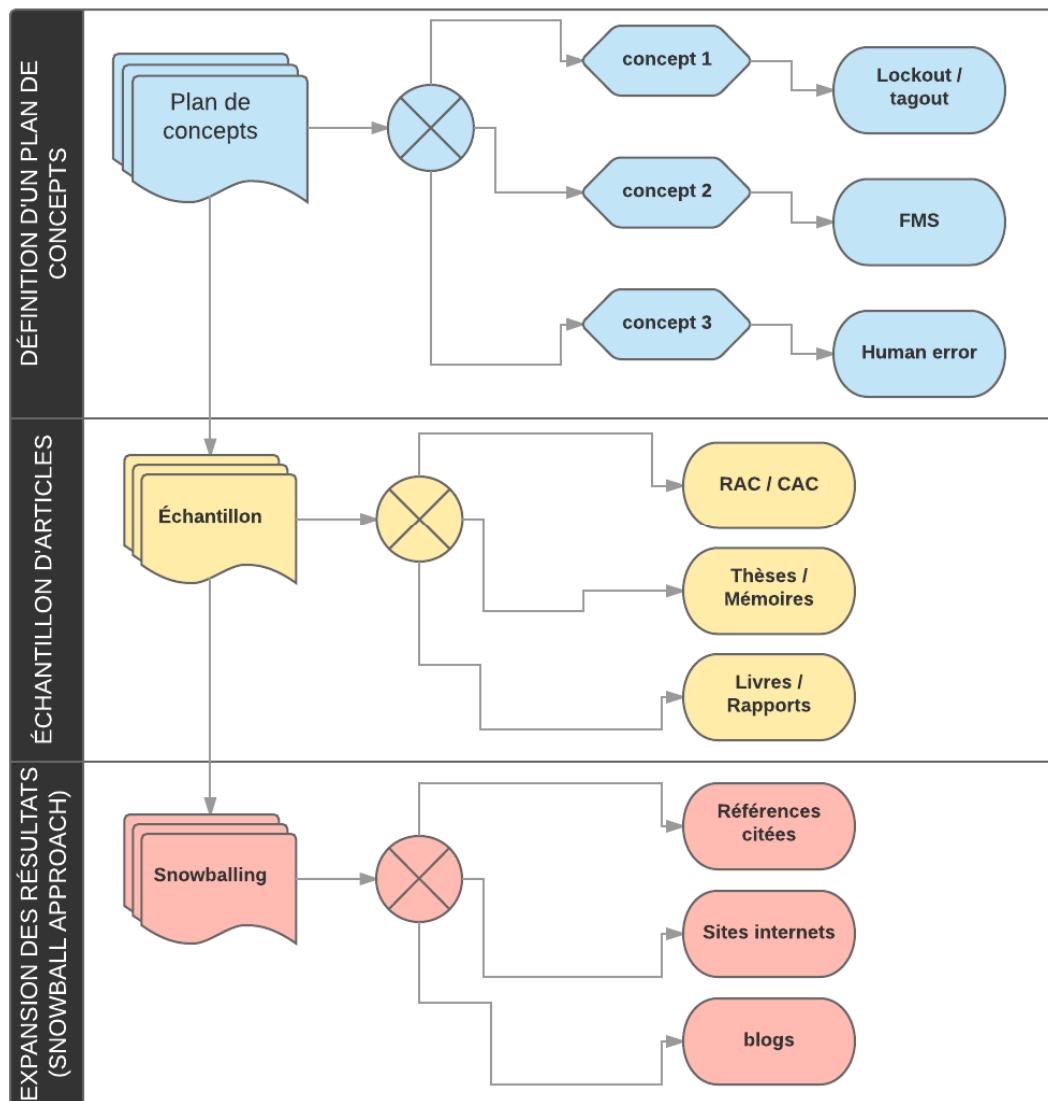


Figure 1.1 Cartographie de la recherche bibliographique

Dans la sous-section 1.2.2 un plan de concepts sera établi afin de sélectionner un échantillon d'articles selon des critères qui seront définis.

1.2.2 Définition du plan de concept

Un mot-clef est un mot associé à un contenu qui, une fois indexé, permet d'identifier un article dans un fichier. Dans une première étape, un plan de concept est réalisé dans le but d'identifier les travaux les plus significatifs par le biais des mots-clefs. Le plan retenu (cf. Figure 1.2 ci-dessous) fait apparaître trois concepts. Une combinaison de termes pertinents a permis de définir un énoncé de recherche pertinent.

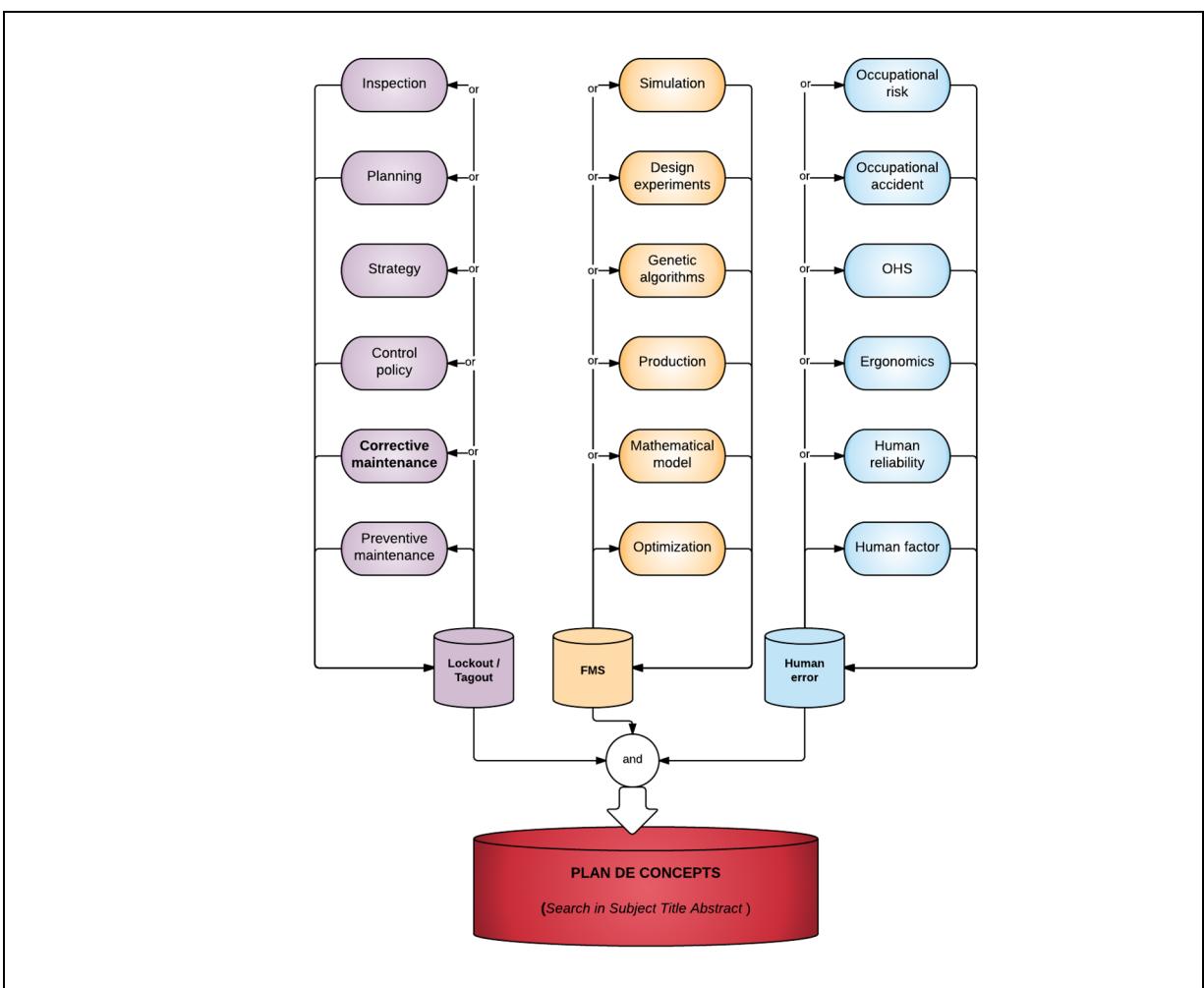


Figure 1.2 Plan de concepts

1.2.3 Sélection d'un échantillon d'articles

Les articles identifiés pour la revue de littérature ont été soumis à plusieurs filtres de sélection selon des critères de pré-sélection suivant le plan de concept ci-dessus. Ainsi, pour faire partie du lot de références retenues, le document doit satisfaire à un certain nombre de conditions : (1) l'article a paru dans un journal de revue avec comité de pairs (RAC) ou dans une conférence avec comité de pairs (CAC), (2) ou un actes de congrès, un rapports d'études, une thèse ou une maîtrise, (3) l'article contient une combinaison de mots-clefs des colonnes de la matrice dans son « titre » ou dans son « résumé », (4) la langue de publication est soit l'anglais ou le français.

Les articles ainsi identifiés seront sujets à des analyses plus approfondies en lisant au complet son contenu. En outre, la méthode effet-boule-de-neige (*snowball-approach*) sera utilisée en consultant les articles cités dans les travaux sélectionnés découlant de la première recherche documentaire.

Les résultats de la sélection sont présentés dans la section suivante.

1.2.4 Résultats

Dans la première sélection, il a été sélectionné un nombre de 1845 références bibliographiques. Il a été alors nécessaire de faire un choix en fonction de la pertinence du contenu de l'article en lien avec notre sujet de recherche. Ainsi, un total de 255 publications a été repéré. Les documents trouvés ont été par la suite importés dans le logiciel de gestion bibliographique Endnote.

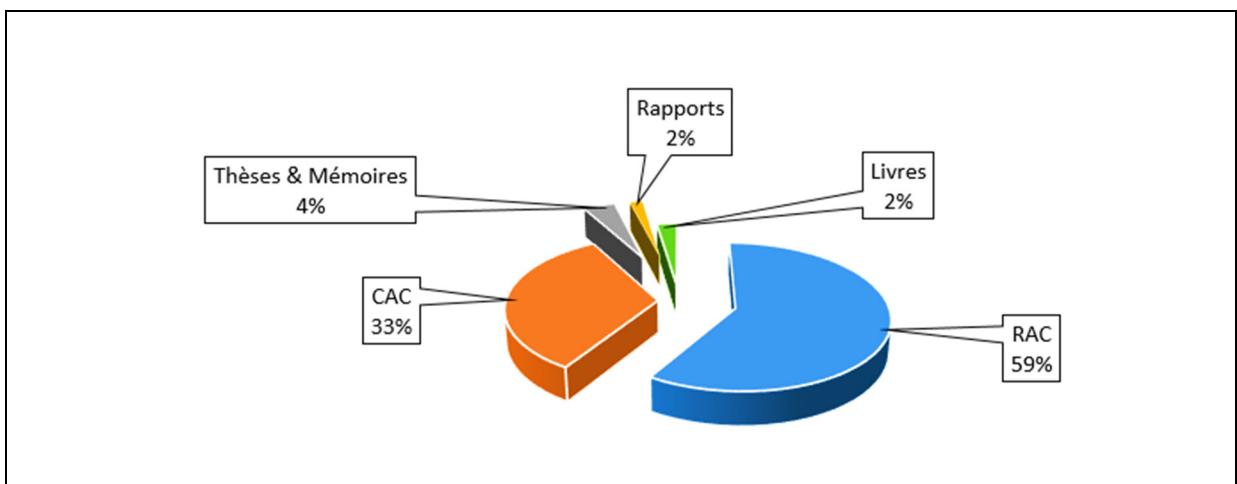


Figure 1.3 Types de documents recensés

La figure 1.3. ci-dessus illustre les pourcentages des types de documents recensés avec une prédominance des revues de journal avec comité de pairs (59% de RAC) et des conférences avec comité de pairs (33% de CAC).

1.3 Organisation des systèmes manufacturiers

1.3.1 Introduction

De nos jours, les industries manufacturières sont confrontées à de nombreux facteurs contraignants tels que la mondialisation économique se manifestant par l'interdépendance croissante des économies, l'intensification de la concurrence internationale, la globalisation des marchés et leur volatilité. De plus, la condition volatile des marchés économiques et l'avancée rapide de la technologie contraignent les acteurs des industries à adapter leurs systèmes manufacturiers à la nouvelle donne pour faire face aux défis imposés par la compétition des économies internationales. Pour faire face à un tel environnement incertain, de nouveaux concepts de système manufacturier émergent comme une alternative viable. Les systèmes manufacturiers transforment des matières premières en des produits finis. Les industries responsables de ces systèmes peuvent survivre si et seulement si leurs objectifs ultimes sont atteints, c'est-à-dire un gain en valeur sous forme de profit, de réputation et de parts de marché. L'environnement manufacturier a un impact important dans la performance d'un système

manufacturier. Aujourd’hui, cet environnement est plus que stochastique, il est incertain. Le déclin de la production de masse des Etats-Unis a donné lieu à une variété d’approches mieux adaptées aux mutations rapides des années 80 de l’industrie manufacturière (Duguay et al., 1997). Plusieurs systèmes de production ont été proposés au fil des ans tels que les systèmes de production de masse, la production épurée (*lean production*), la production agile, la production de masse personnalisée, les systèmes manufacturiers flexibles (*Flexible Manufacturing Systems (FMS)*) et les systèmes manufacturiers reconfigurable (*Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)*). Des chercheurs indiquent que ce phénomène est dû à un nouvel environnement concurrentiel des industries manufacturières émergeant et imposant des changements systématiques dans la conception et la gestion des systèmes manufacturiers classiques (Molina et al., 2005). Ce faisant, un avantage concurrentiel dans la nouvelle économie mondiale appartiendra aux entreprises qui sont capables de répondre rapidement à la demande de produits personnalisés et de haute qualité de fabrication (Molina et al. 1998). Pour cette raison, les industriels s’orientent de plus en plus vers des systèmes de production capables de fabriquer des produits de bonne qualité à moindres coûts tout en respectant les délais de fabrication et de livraison. Pour faire face à un tel environnement incertain, le concept des FMS émerge comme une alternative viable aux systèmes de production classiques.

Dans la suite de cette section, nous explorerons brièvement les systèmes manufacturiers afin d’aboutir à la classification des FMS et des RMS.

1.3.2 Systèmes manufacturiers

Gershwin définit un système manufacturier, dans (Gershwin, 2002), consistant en un ensemble de machines, de moyens de transport, d’ordinateurs, d’entreposage, et d’autres éléments mis ensemble dans le but de fabriquer des produits. Ces systèmes manufacturiers sont constitués de plusieurs postes de travail en interaction. En général, deux classes de systèmes automatisés de production multipostes (Buzacott, 1982) sont rencontrées : (1) ligne de transfert automatique (*automatic transfer-lines*) et (2) le système manufacturier flexible (FMS). Dans une ligne de transfert automatique, les séquences des machines sont prédéfinies et gérées par

un système de soutien automatisé pour la fabrication d'une très petite famille de pièces. Alors que les FMS ont la particularité d'être rapidement reconfigurables en fonction des contraintes de production, de maintenance et de sécurité. Ils sont des systèmes de production fortement automatisés et adaptés à la fabrication de différentes séries de produits et à des gammes de produits diverses.

La tendance actuelle des industriels est une orientation vers des systèmes manufacturiers de plus en plus flexibles qui ont la possibilité d'être adaptés rapidement à la fabrication de diverses gammes de produits à des coûts et des temps de maintenance moindres. Ceci permet aux décideurs de ces industries de faire face aux contraintes liées à l'environnement stochastique et incertain de ces systèmes.

Pour mieux comprendre le concept des systèmes manufacturiers flexibles (FMS), une revue détaillée de littérature est développée à la sous-section 1.3.3 ci-après.

1.3.3 Système manufacturier flexible (FMS)

La flexibilité des systèmes manufacturiers est un concept complexe, multidimensionnel et difficile à cerner (Sethi et al., 1990). Ces derniers soutiennent que la flexibilité d'un système manufacturier est liée à sa capacité d'adaptabilité à son environnement. Dans son livre « Manufacturing Systems Engineering », Stanley B. Gershwin définit un système manufacturier flexible (FMS) comme étant un ensemble de machines, de système de transport, de pièces brutes, de systèmes d'entreposage et de système de commande (Gershwin, 2002). Selon ce dernier, le concept de flexibilité est lié à la capacité du système manufacturier à fabriquer au moins deux types de pièces dans une période de temps spécifiée (Product Flexibility) ou bien de produire la même pièce en utilisant différentes configurations (Process Flexibility ou Multiple Route). Dans la même direction, pour clarifier ce concept de flexibilité des systèmes de production, Raj et al. (2008) affirment dans leur approche de modélisation des FMS, que cette nouvelle technologie des systèmes de production est conçue de telle sorte qu'elle doit être au même niveau d'efficacité qu'une ligne de transfert (Transfer-line) bien équilibrée et équivalent à la flexibilité d'un atelier à cheminements multiples (ACM) (Job-shop). Les ACM sont caractérisés par leur capacité à répondre aux variations des opérations

de production et une variété de produits. L'objectif de ces systèmes est de minimiser le temps de production. Un FMS n'est pas seulement constitué de systèmes à commande numérique par calculateur (Computer Numerical Control (CNC)). Il intègre aussi du matériel de soutien comme des robots de manutention et des véhicules à guidage automatique (Automatic Guided Vehicles (AGVs)) et des systèmes de stockage et d'extraction (Automatic Storage and Retrieval System (AS/RS)) (Raj et al., 2008). Ce faisant, l'opérateur humain est appelé tous les jours à coopérer avec ces robots. De nos jours, on assiste à l'émergence de nouveaux types de robots collaboratifs occupant de plus en plus la place des humains à l'exécution de tâches répétitives, pénibles et peu attrayantes. Colgate et al. (1996) sont les premiers à proposer le concept du néologisme de coopération des robots avec l'opérateur humain « *COBOT* ». Pour plus de détails, le lecteur est référé aux travaux de (Duchaine et al., 2007). Ce dernier présente une nouvelle méthode pour rendre cette coopération plus transparente. Dans le même ordre d'idée, Akella et al. (1999) mentionnent que des dispositifs dotés d'intelligence (*Intelligent Assist Devices IAD*) sont conçus pour les lignes d'assemblage et permettent de réduire les problèmes d'ergonomie d'ordre physique et cognitif tout en améliorant la sécurité, la qualité et la productivité. Les travaux de Faber et al. (2015) fournissent la démonstration qu'un système de commande cognitif automatisé (*Cognitive Control Unit (CCU)* ; *Graph-based Assembly Sequence Planer (GASP)*) permet d'optimiser les conditions de travail ergonomiques pour l'opérateur humain dans des situations de coopération homme-robot. Cependant, la recherche sur les impacts en santé et sécurité au travail des robots collaboratifs est émergente (Jocelyn et al., 2017). Des changements technologiques s'observent tous les jours, mais on ne sait pas leur impact d'aujourd'hui et demain sur la SST. Cette problématique mérite d'être adressée urgemment.

Le constat est clair, un FMS doit constituer une méthode alternative d'agencement des postes de travail avec une certaine flexibilité qui lui permet de réagir face aux aléas quand la production en ligne devient trop complexe à organiser du fait de la diversification des produits. Les acteurs d'un FMS doivent s'assurer de la résilience de leur système pour faire face aux événements redoutables et donc prévisibles. Ils doivent toutefois prendre en compte l'agilité face à l'incertitude. Cette flexibilité peut être subdivisée en deux grandes catégories : (1) la flexibilité de la machine et (2) la flexibilité de routage (Browne et al., 1984). Ces derniers

définissent huit différents types de flexibilité dans le contexte des FMS dans (Browne et al., 1984) : (1) flexibilité de machine, (2) flexibilité de processus, (3) flexibilité de produit, (4) flexibilité de routage, (5) flexibilité de volume, (6) flexibilité d'expansion, (7) flexibilité d'opération, (8) flexibilité de production.

Nous parlons de flexibilité de la machine (*Machine Flexibility*) quand la machine et l'ordre d'exécution des opérations sont reconfigurables pour apporter les changements nécessaires pour fabriquer une variété de types de produits ou de composants donnés (flexibilité de produit, flexibilité de processus, flexibilité d'opération). Nous parlons de flexibilité de routage (*Routing Flexibility*) quand le système manufacturier est suffisamment flexible pour exécuter la même opération de fabrication en utilisant différentes machines et absorber les aléas de la capacité de production tels que l'augmentation du nombre d'unités à être fabriquées (flexibilité de volume et flexibilité d'expansion). Quant à la flexibilité de la production, elle est définie comme étant l'univers des types de pièces que le FMS peut produire dépendant du niveau de technologie existant (Browne et al., 1984).

Ces différents types de flexibilités ne sont pas indépendants. La figure 1.4 ci-dessus présente les relations entre les types de flexibilité des FMS.

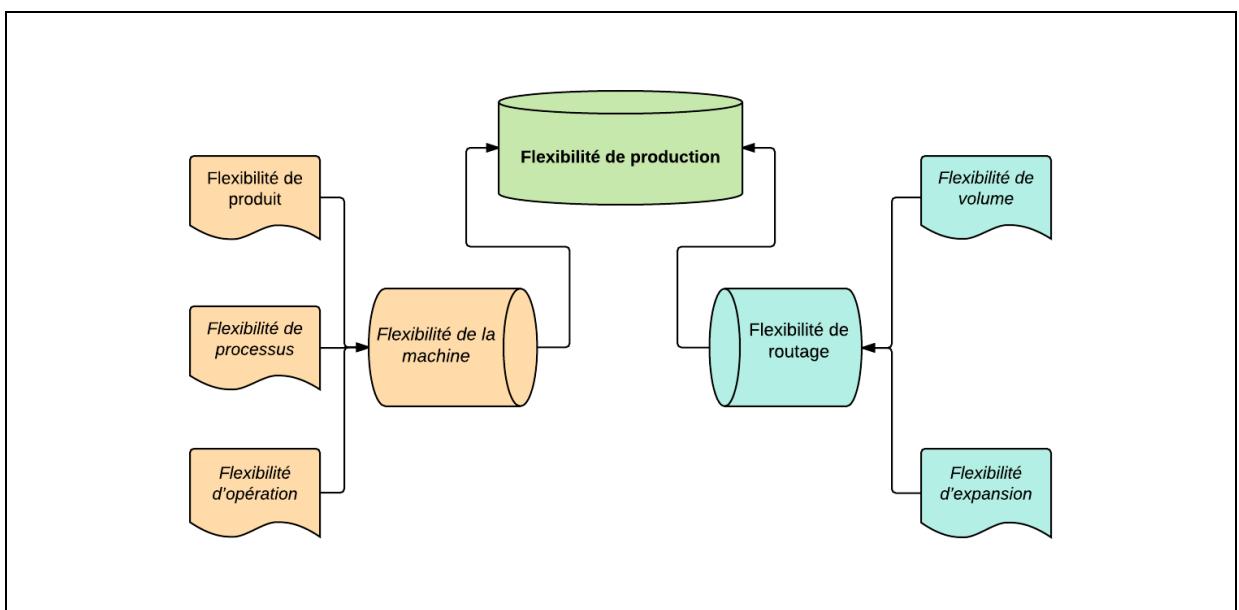


Figure 1.4 Relation entre les types de flexibilité (Bowne et al., 1984)

In fine, il ressort de l'analyse de la littérature plusieurs définitions plus ou moins différentes, ce qui sème la confusion autour du concept des FMS. Au meilleur de nos connaissances, il n'existe pas une définition normalisée acceptée pour ce terme. En effet, certains systèmes sont appelés FMS juste parce qu'ils contiennent du matériel automatisé. La plupart d'entre eux sont basées sur la composition matérielle du système. Le niveau d'automatisation permet de déterminer le degré de flexibilité du FMS. En réalité, la notion de flexibilité est liée à la possibilité d'un système de produire plus d'une pièce avec peu coûts et de temps perdu pour changer la configuration des machines. C'est cette caractéristique qui différencie les FMS des autres systèmes de fabrication. Cela suppose un investissement sur des machines flexibles dotées de changeurs d'équipements et d'opérateurs polyvalents. Cependant, la mise en œuvre de ces systèmes flexibles engendre un coût énorme d'où la nécessité de faire un investissement à long terme en tenant compte de la volatilité des marchés économiques. La manière dont le FMS est exploité et le degré de flexibilité sont essentiels pour la prise de décision (Browne et al., 1984). Par conséquent, il est bon de décider du degré de flexibilité qui permet un équilibre entre le coût de mise en œuvre et les avantages d'un FMS. En outre, l'efficacité et l'efficience d'un FMS sont liées à sa sûreté de fonctionnement i.e. sa fiabilité, sa maintenabilité et sa disponibilité.

Finalement, dans le cadre de ce mémoire, la définition retenue pour le concept de flexibilité est similaire à celle de Mehrabi et al. (2000). Ainsi, un FMS se définit comme étant:

Un système manufacturier ajustable composé de matériel fixe intégrant des logiciels programmables pour gérer les modifications des bons de travail (work-orders), des calendriers de production (production schedules), un ensemble d'instructions de commande numérique par ordinateur (part-programs, machine controller unit, processing unit) pour commander les machines, et l'outillage requis pour répondre à la fabrication de plusieurs types de pièces.

Récemment, une nouvelle génération de systèmes manufacturiers a émergé, en l'occurrence les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS). Molina et al. (2005) soutiennent que la prochaine génération des systèmes manufacturiers aura l'obligation d'une

flexibilité meilleure que celle des dernières décennies, et doit être reconfigurable rapidement et dotée d'intelligence suffisante pour répondre aux attentes d'un marché très volatile. Cependant, les coûts associés à l'introduction des technologies conventionnelles de cette nouvelle réalité des industries sont extrêmement élevés. Dans la sous-section 1.3.4 ci-après, ce type de système sera exploré en comparaison avec les systèmes classiques de production de masse et les FMS.

1.3.4 Système manufacturier reconfigurable (RMS)

En réponse aux exigences des clients et à la volatilité des marchés économiques, les systèmes de production ont évolué tout au long de l'histoire, de la production de masse à la genèse des systèmes flexibles et reconfigurables. Au début du XXe siècle, la production de masse a contribué à l'émergence d'une classe en fournissant de l'emploi et des moyens de production qui ont contribué à améliorer la qualité de vie de ce segment de la société (Molina et al., 2005). Par contre, dans la seconde moitié de ce siècle, ces systèmes manufacturiers se sont heurtés à des problèmes d'efficacité et d'efficience pour satisfaire une demande croissante de clients de plus en plus exigeants. C'est ainsi qu'une nouvelle génération de systèmes de production (*Next Generation Manufacturing (NGM)*) a vu le jour et nécessitant l'utilisation de nouveaux concepts. Les industries manufacturières du XXIe siècle doivent adapter cette vision de flexibilité et d'agilité pour atteindre l'excellence opérationnelle et rester compétitives (Duguay et al., 1997). Molina et al. (2005) indique que le concept qui découle de la définition de la mission des NGM est le système manufacturier reconfigurable (RMS) pour répondre à une demande de produits variés. Ces derniers soulignent que l'industrie manufacturière de la prochaine génération devra intégrer plus de souplesse et d'intelligence pour évoluer vers des systèmes de fabrication reconfigurables. Ces auteurs soutiennent, en particulier, que le concept « *d'intelligence* » devient plus pertinent en raison de la nécessité de maintenir des opérations de fabrication plus efficaces et plus efficientes avec un temps minimal d'interruption de service dans des conditions d'incertitude. Les RMS intègrent des ressources matérielles et de commande à tous les niveaux de fonctionnalité et d'organisation, permettant un ajustement rapide de la capacité et des fonctionnalités en réponse à des changements soudains des marchés

économiques ou dans les exigences des organismes de réglementation (Bi et al., 2008). Cependant, ces derniers soulignent que lors de la troisième conférence sur les RMS qui s'est tenue à l'université du Michigan en mai 2005, les participants ont eu des divergences sur la définition de ce type de système de production. Ainsi, (1) une catégorie de participants considère qu'un RMS est un paradigme intermédiaire entre les systèmes de production de masse et les FMS, (2) d'autres font valoir qu'un RMS est un système manufacturier avancé dont la flexibilité est supérieure à celle d'un FMS, (3) une troisième catégorie pense qu'il n'y a pas de différence entre un FMS et un RMS. Des chercheurs indiquent qu'un RMS est une nouvelle conception des systèmes manufacturiers capables d'être ajustés rapidement au besoin pour faire face à la volatilité des marchés économiques (Mehrabi et al., 2000). Ces derniers soutiennent que ce nouveau type de système de production permet non seulement la flexibilité de produire une variété de types de pièces, mais aussi celle de changer le système lui-même. Des études (Mehrabi et al., 2000) soutiennent qu'un tel système est composé de modules (*Hardware & Software*) qui n'encourent pas le risque de l'obsolescence, car ils permettent un changement rapide de composants et d'applications permettant un réarrangement rapide et fiable du système.

Dans la suite de ce mémoire, la définition de Mehrabi et al. (2002) qui est en phase avec les travaux de Koren et al. (1997) est considérée :

Un RMS est un système de production permettant une adaptation rapide de la capacité et des fonctionnalités en réponse à une nouvelle situation (demande, nouveau produit, nouvelle technologie) en réarrangeant ou bien en changeant sa composition (machines, convoyeurs, mécanismes, capteurs, algorithmes de contrôle par exemple).

Les réparations à intervalles de temps réguliers par une activité dite de maintenance peuvent prolonger la vie utile (Dhillon et al., 2006). Par ailleurs, l'automatisation et la numérisation deviennent une priorité pour la majorité des industries de nos jours. Cette transformation numérique correspondant à ce que certains nomment la quatrième révolution industrielle constitue, une occasion pour renforcer l'industrie manufacturière québécoise. Elle

implique des changements profonds de paradigmes au niveau des modèles d'affaires et des systèmes de production, ainsi qu'à la main-d'œuvre (MESI, 2016).

C'est ainsi en 2011 que le groupe allemand de recherche appliquée Fraunhofer (Fraunhofer Society for the Advancement of Applied Research) propose le terme « industrie 4.0 » pour la première fois pour définir la quatrième révolution industrielle. Aujourd'hui, les ingénieurs et chercheurs du monde entier se mobilisent pour explorer les fondements de ce concept, son évolution et les facteurs de succès d'implantation de projets d'industrie 4.0. En prenant l'exemple du Québec, le ministère de l'économie, de la science et de l'innovation (MESI) collabore avec des centres collégiaux de transfert de technologie (CCTT) et des organismes de recherches tels que le Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFARIO), le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) et le Sous-Traitance Industrielle Québec (STIQ) dans le but d'orienter les futurs projets d'accompagnement des industries québécois pour prendre le virage numérique (MESI, 2016). Un sondage effectué par le journal Le Devoir (Rettino-Parazelli, 2017) auprès de 960 chefs d'entreprises canadiennes souligne que 39% des industries ont intégré des technologies de l'industrie 4.0 dans leurs système de production. Le Québec prend la tête du peloton avec 45% d'entreprises avec un projet de numérisation ; cependant, seulement 5% de ces entreprises ont complété la numérisation de leurs chaînes de production.

1.3.5 Industrie 4.0

L'émergence du nouveau paradigme « *Industrie 4.0* » désigne la quatrième révolution industrielle et se caractérise par l'automatisation et l'intégration de nouvelles technologies numérique à la chaîne de valeur de l'industrie manufacturière. Ce contexte oblige les gestionnaires industriels à réviser leurs modèles d'affaire et prendre le virage numérique caractérisé par l'excellence opérationnelle, l'expérience client et la gouvernance numérique. Les « *Big data* », et l'interconnexion des équipements (*l'internet des objets IOT*), ainsi que flexibilité des systèmes de production, parmi d'autres, constituent un ensemble de défis exigeant aux dirigeants d'agir rapidement. En effet, le contexte de l'environnement des systèmes manufacturiers de nos jours, de plus en plus complexes, force ses acteurs à adapter

leur modèle de gestion des risques à la nouvelle phase de numérisation industrielle. Cette dernière apporte une émergence de nouvelles opportunités et de nouveaux défis, ainsi que de nouveaux modèles pour optimiser l'organisation et l'allocation du travail à diverses activités de production. La numérisation induira des changements profonds à la planification des besoins en main-d'œuvre. La transformation numérique des usines permettra l'automatisation de la gestion des opérations (capacité de traitement en temps réel des données) afin d'optimiser la gestion des opérations tout en gagnant en productivité.

Cette transformation numérique repose sur des principes dénommés principes 4.0 qui sont l'interopérabilité, la virtualisation, la capacité en temps réel, l'orientation service et la modularité. Une définition synthétique de ces termes est fournie dans le tableau 1.1 ci-dessous :

Tableau 1.1 Principe de l'industrie 4.0

Interopérabilité	Communication des systèmes entre eux (partage de données).
Virtualisation	Concept d'usine virtuelle (représentation virtuelle en temps réel de l'usine permettant de suivre les activités, d'évaluer la performance et d'alerter en cas de dysfonctionnement).
Capacité en temps réel	Tableaux de bord en temps réel permettant d'améliorer le suivi des paramètres et l'analyse des données afin de prendre des décisions.
Orientation Service	Capacité à revoir le modèle d'affaires, par exemple un service associé à une vente du produit.
Modularité	Fonctionnalités d'un progiciel de gestion permettant de faire évoluer aisément des modules selon les besoins se rapprochant le plus des processus d'entreprise (processus métier) et des processus opérationnels (de réalisation).

Il est urgent pour les petites et moyennes entreprises (PME) québécoises d'agir afin de saisir l'opportunité d'un virage numérique (MESI, 2016).

1.4 Politique de maintenance

De nos jours, à l'ère de la quatrième révolution industrielle, les activités stratégiques de maintenance et la gestion efficace des équipements de production sont sans nul doute l'un des leviers clés de l'évolution des systèmes manufacturiers. Les gestionnaires doivent considérer la maintenance comme une fonction à part entière à la gouvernance de leur système

pour atteindre les objectifs de productivité, l'excellence opérationnelle, tout en maintenant un niveau élevé de fiabilité des équipements (Ben-Daya et al., 2009b; Chelsom et al., 2005). Ce n'est seulement depuis la seconde guerre mondiale qu'il y a eu de profondes avancées scientifiques et technologiques qui aujourd'hui, mettent en évidence le besoin de prêter plus d'attention à la maintenance (Dhillon et al., 2006). En revanche, ce dernier signale l'urgence d'une rupture avec les méthodes classiques afin de préserver la fonction des équipements, éviter les conséquences d'une défaillance et assurer la capacité de production des équipements.

La première approche scientifique de gestion de la maintenance date des années 50. En cette période, la maintenance préventive était considérée comme un moyen de réduire les défaillances et les interruptions non-planifiées. Par la suite, à l'aube des années 60, les premiers modèles de recherche opérationnelle au sujet de la maintenance voient le jour avec comme but l'optimisation de ces programmes de maintenance. Ce n'est qu'à partir des années 70 que les techniques de surveillance (i.e. maintenance conditionnelle, maintenance prédictive) font leur apparition. Celles-ci permettent de prédire les défaillances en utilisant l'information de l'état actuel de l'équipement. Parmi tant d'autres, la surveillance de vibrations, l'analyse des particules d'huile font partie de ces programmes et techniques de surveillance. Finalement, dans les années 80, avec l'avènement de l'ordinateur, la fonction maintenance adopte une nouvelle restructuration de ses processus administratifs en facilitant l'accès à l'information. C'est ainsi que de nouvelles méthodes de résolution de problèmes connexes à la maintenance, parmi tant d'autres font leur apparition tels que la maintenance basée sur la fiabilité MBF (*Reliability centered maintenance (RCM)*) et la maintenance totale (*Total productive maintenance (TPM)*). Le lecteur peut se référer à Dekker (1996) pour plus de développements.

Géhan et al. (2014) remarquent que l'apparition d'un événement redouté tel que la survenue d'une défaillance est un phénomène aléatoire. En outre, le contexte actuel des systèmes manufacturiers intègre un caractère incertain. Ce faisant, une attention particulière est requise pour éviter la compromission de l'atteinte des objectifs en termes de productivité et de bien-être des personnes. En réponse à cette situation, une planification conjointe de la production et de la maintenance est requise.

La profitabilité d'un système de production peut dépendre considérablement du coût de sa maintenance. À ce sujet, Chelsom et al. (2005) remarquent que ce coût de la maintenance

peut atteindre entre 2 à 10 % dans un système manufacturier, et 24% dans l'industrie du transport. Par ailleurs, Dhillon et al. (2006) révèlent qu'une estimation de 80% du budget de l'industrie est consacré à éliminer des défaillances chroniques des machines, des systèmes et des personnes. Si nous nous référons à ces chercheurs, une maintenance efficace et efficiente peut réduire les coûts liés aux défaillances de 40 à 60%. Dans le même ordre d'idée, de nombreux auteurs, tels que -Stevenson et al. (2006) se sont intéressés de près ou de loin au domaine de la maintenance dans un système de production. Selon ces auteurs, le concept de maintenance intègre un ensemble de moyens requis pour remettre et maintenir un système en état de bon fonctionnement.

Reason (2000) définit la maintenance comme étant un ensemble d'activités permettant de maintenir une installation et sa capacité de production dans un état similaire à l'origine (*as-built*). En 2001, la norme européenne NFEN13306X60-319 propose une nouvelle définition de la maintenance similaire à celle de Reason (2000) comme étant un « ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

Selon Ben-Daya et al. (2009b), la principale responsabilité de la maintenance est de fournir un service permettant à une organisation à atteindre ses objectifs. À cet effet, plusieurs types de maintenance sont définis. Dhillon et al. (2006) identifient trois grands ensembles : la maintenance préventive, la maintenance corrective et la maintenance prédictive.

1.4.1 La maintenance préventive

Elle se définit comme étant « un ensemble d'actions menées selon un horaire planifié, périodique et spécifique pour garder un article ou un matériel dans un état de fonctionnement spécifié par le biais d'un processus de vérification et de remise en état ». Autrement dit, « c'est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu ». Elle permet d'éviter des défaillances en cours d'utilisation de l'équipement.

La politique de maintenance préventive peut se définir comme un ensemble d'actions permettant de maintenir ou de restaurer un équipement donné dans le but de prévenir les défaillances (Duffuaa et al., 1999).

L'analyse des coûts de la maintenance préventive doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter. Au cours des dernières décennies, une variété de politiques de maintenance préventive a été développée dans la littérature (Duffuaa et al., 1999). Elles se subdivisent en deux grandes familles (Duffuaa et al., 1999) : la politique de type bloc (*Bloc replacement preventive maintenance policy (BRP)*) et la politique de remplacement basée sur l'âge (*Age replacement preventive maintenance policy (ARP)*).

La politique de maintenance préventive de type bloc (*Bloc replacement preventive maintenance policy (BRP)*) consiste au remplacement d'un équipement après une période $k \cdot T_{BRP}$ (avec, $k \in \{1, 2, 3, 4, \dots\}$) de fonctionnement. Le choix de k se fait en tenant compte de l'état de l'équipement à remplacer et du coût de remplacement. Cette politique est constituée d'activités d'entretien périodique requises pour le bon fonctionnement du système. Ce type de maintenance participe à l'assurance de la santé et la sécurité des travailleurs et à la minimisation du taux de défaillance des équipements en opération.

La politique de remplacement basée sur l'âge du composant (*Age replacement preventive maintenance policy (ARP)*) consiste au remplacement d'un équipement donné lorsqu'une défaillance se produit à une période inférieure à T_{ARP} (T_{ARP} le temps maximal prédéfini pour le remplacement de l'équipement). Sinon, l'équipement est gardé en fonction jusqu'à la période maximale T_{ARP} et la maintenance préventive s'effectue de manière systématique.

Il est fréquent de rencontrer la politique de commande basée sur l'âge de l'équipement dans la littérature de la communauté scientifique (Aoudjit, 2010; Boukas et al., 1990; Emami-Mehrgani et al., 2014; Valdez-Flores et al., 1989). À cet égard, Nakagawa et al. (1984) proposent une politique de remplacement selon un âge fixe ou basée sur le nombre de défaillances. Cette politique implique un remplacement après une période T de fonctionnement de l'équipement. Quant à la politique axée sur le nombre de défaillances, le remplacement est

réalisé après détection de N défaillances. Aoudjit (2010) définit différents types de maintenance pour une politique axée sur l'âge, soit la maintenance préventive minimale (parfaite soit imparfaite). La maintenance minimale maintient le taux de défaillances à un niveau constant. La maintenance parfaite, comme son nom l'indique et à l'opposé de celle imparfaite, rétablit le taux de défaillances à un niveau équivalent à l'état initial de l'équipement à sa mise en service.



Figure 1.5 Maintenance préventive

1.4.2 La maintenance corrective / réactive

C'est « une activité de maintenance ou de réparation imprévue dans le but de rétablir le composant ou l'équipement dans un état spécifié suite à une défaillance ». Elle a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

La maintenance corrective est définie dans la norme européenne NF EN 13306 X 60-319 comme étant : « La maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

Elle peut se scinder en trois catégories : (1) la maintenance palliative, (2) la maintenance curative et (3) la maintenance améliorative. La maintenance palliative permet d'intervenir sur la machine de manière provisoire pour assurer la fonction requise (dépannage). Toutefois, l'intervention curative est indispensable pour résoudre le problème de manière durable et remettre la machine à un état similaire à celui initial dans les plus brefs délais possibles pour éviter le pire (réparation, maintenance curative). -Stevenson et al. (2006) caractérisent cette dernière de « *catastrophe* », car l'intervention s'effectue à la suite d'une défaillance (arrêt ou fonctionnement dégradée) et a pour but de remettre l'équipement dans un état de service dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Ce type d'évènement intervient souvent à un moment inattendu, les conséquences sont souvent dramatiques et génèrent des coûts exorbitants. La maintenance améliorative, comme son nom l'indique, vise à améliorer la performance d'un bien dans l'objectif de diminuer les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. Elle s'efforce d'améliorer la qualité des interventions de maintenance palliative ou curative de manière à diminuer la durée d'indisponibilité du système et augmenter la qualité des produits finis. C'est aussi, l'occasion d'améliorer la maintenabilité de l'équipement (- Stevenson et al., 2006). Ces derniers définissent la maintenabilité comme étant « l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à être maintenu ou rétabli facilement dans un état lui permettant d'accomplir sa fonction prévue ».

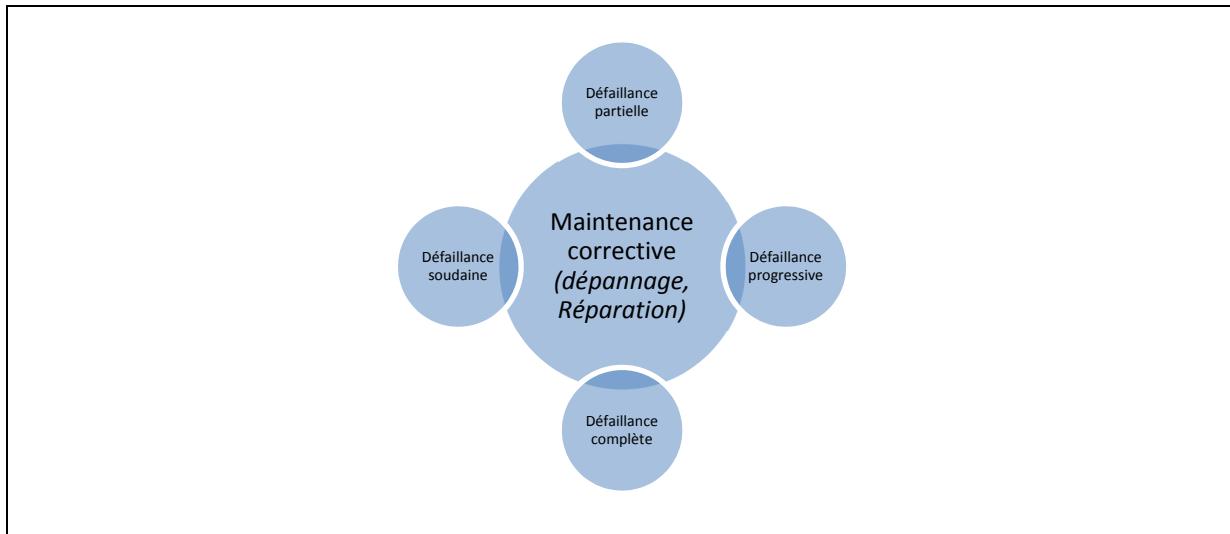


Figure 1.6 Maintenance corrective

1.4.3 La maintenance prédictive

Elle est reliée à « l'utilisation de méthodes modernes de mesure et de traitement de signaux pour diagnostiquer avec précision l'état du bien en cours d'opération ». Aussi appelée « maintenance prévisionnelle ou anticipée », elle permet de prédire la longévité de l'équipement et des pièces par des inspections, des vérifications, des tests, etc. (par exemple : test de vibration, inspection visuelle).

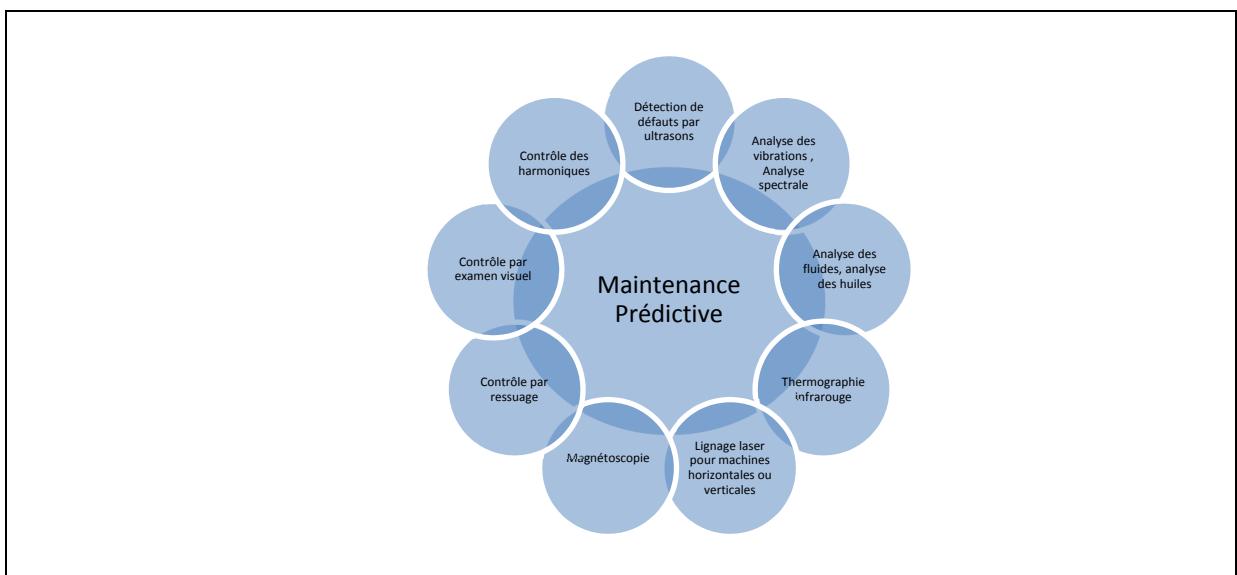


Figure 1.7 Maintenance prédictive

1.4.4 Maintenance productive

Elle consiste à intégrer l'entretien de base de façon autonome en faisant participer toutes les ressources humaines. La maintenance productive vise à optimiser l'efficacité des machines, c'est-à-dire en assurant la disponibilité maximale des équipements (cf. la maintenance totale (*Total productive maintenance (TPM)*)). Ainsi, la maintenance est intégrée à part entière dans le processus de production. L'objectif est donc (1) de diminuer les coûts et les délais ; (2) d'augmenter la qualité des produits ; (3) de minimiser les arrêts de production causés par la non-disponibilité. Cette philosophie est présente à tous les niveaux de l'entreprise et demande un engagement de tous les employés. La participation des opérateurs est une occasion d'accroître leur compétence et d'enrichir leurs tâches en leur confiant la maintenance de premier niveau. La démarche de maintenance productive est longue et continue puisqu'elle est basée sur l'amélioration continue.

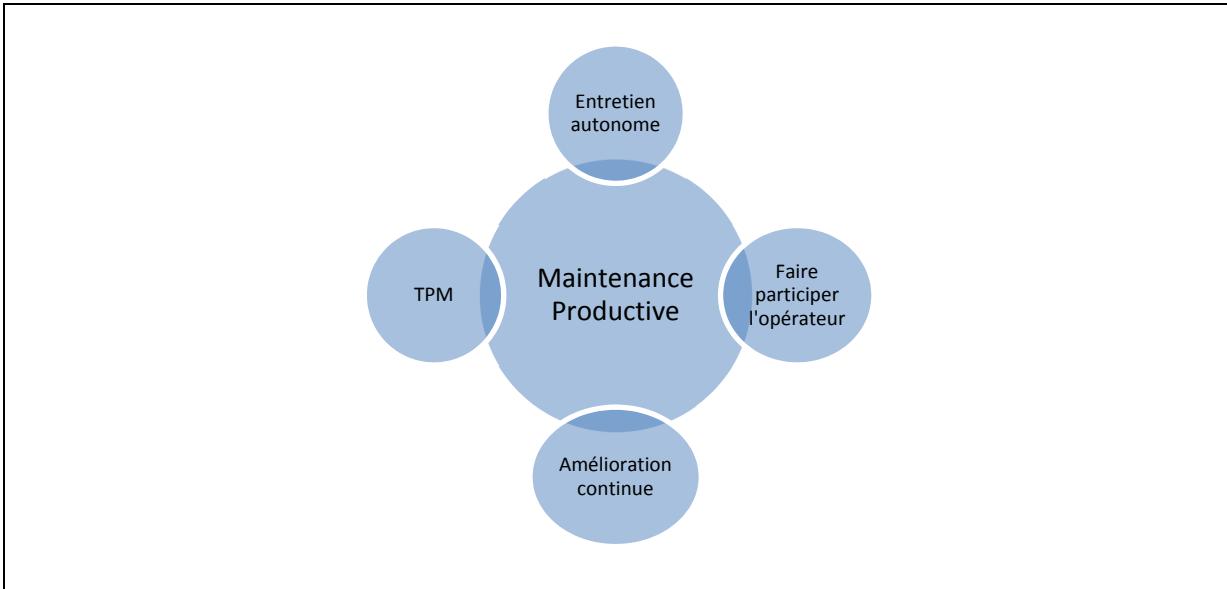


Figure 1.8 Maintenance productive

L'objectif principal de ces différents types de maintenance est de garantir la disponibilité et le maintien du système manufacturier à un niveau de performance optimal à un coût moindre. Dekker (1996) identifie quatre (4) objectifs de la maintenance : (1) assurer la fonction du système en des termes de disponibilité, d'efficacité et de qualité des produits, (2) assurer la vie du système sous forme de gestion de patrimoine (*Asset Management*), (3) assurer la sécurité, (5) assurer le bien-être de l'humain. Dans le même ordre d'idée, Khan et al. (2003) indiquent que l'objectif principal du processus de maintenance est d'accroître la productivité et la profitabilité des opérations de production et l'optimisation du coût total du cycle de vie des équipements en prenant en compte les volets sécurité et environnement. Toutefois, il est primordial de mentionner que la prise en compte du volet sécurité est prépondérante pour assurer une productivité optimale et améliorer le bien-être des travailleurs. Le concept de sûreté de fonctionnement (SDF) vient établir la jonction entre ces différents éléments. L'évolution de la maîtrise des risques et donc de la sûreté de fonctionnement rend l'entreprise d'aujourd'hui de plus en plus compétitive. La SDF est une approche systémique qui fait appel à plusieurs spécialités différentes. Elle englobe la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité (FMDS). Pour conserver la cohésion du concept FMDS, le facteur humain joue un rôle central dans le bon fonctionnement du système. Ainsi, une étude de SDF doit intégrer, le facteur

humain en raison de son importance. Depuis les années soixante, des techniques d'analyse des facteurs humains telles que : Évaluation Prévisionnelle de la Fiabilité Humaine (EPFH), Technique for Human Error Rate Prediction (THERPS), Human Error Probability (HEP), Tecnica Empirica Stima Errori Operatori (TESEO), Human Cognitive Reliability (HCR) et Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART), ont été développées suite à plusieurs travaux indiquant leur importance. En outre, l'ergonomie permet de mieux cerner et maîtriser ces facteurs inhérents à l'humain. Noroozi et al. (2014) soutiennent que la prise en compte de l'erreur humaine (EH) dans l'analyse quantitative de risques dans les procédures de maintenance réduit considérablement la fréquence des erreurs humaines et augmente la disponibilité et la fiabilité du système.

Dans les dernières décennies, la problématique de la détérioration des systèmes manufacturiers et de leur durée de vie ont été largement étudiées dans la littérature. Naguère, des milliers de modèles de maintenance et de renouvellement ont été créés en fonction du type de maintenance. Wang (2002) a réalisé une classification de ces modèles en fonction de la catégorie de la politique de maintenance utilisée : (1) remplacement basé sur l'âge (*age replacement policy*), (2) remplacement aléatoire (*random age replacement*), remplacement par blocs (*block replacement policy*), maintenance préventive périodique (*periodic preventive maintenance policy*), maintenance axée sur la défaillance (*failure limit policy*), préventif séquentiel (*sequential preventive maintenance policy*), coûts de réparation (*repair cost limit policy*), maintenance basée sur les temps de réparation (*repair time limit policy*), nombre de réparation (*repair number counting policy*), période de référence (*reference time policy*), âge mixte (*mixed age policy*), politique de maintenance axée sur la préparation (*preparedness maintenance policy*), maintenance par groupe (*group maintenance policy*), maintenance opportuniste (*opportunistic maintenance policy*).

Par ailleurs, -Stevenson et al. (2006) indiquent que les systèmes de gestion de la santé et de la sécurité au travail (SST), de l'assurance de la qualité, des systèmes du juste-à-temps JAT (*Just-in-time (JIT)*) et des opérations épurées (*Lean manufacturing*) sont efficaces que lorsqu'une politique de maintenance est formellement mise en œuvre. En effet, l'efficacité de la politique de l'entreprise dépend de l'assurance que le système opérationnel fonctionne sans défaillance. La motivation et l'implication des travailleurs, la production épurée, la gestion

intégrale de la qualité (GIQ), le JIT, la planification des besoins matières (PBM (*MRP*)), l'amélioration continue (Kaizen), le Toyota production system (TPS) dépendent tous de l'état de bon fonctionnement des équipements (-Stevenson et al., 2006). En revanche, une bonne politique de maintenance est une condition nécessaire, mais pas suffisante pour la prise de décision adéquate et l'optimisation des coûts. En matière de prise de décision, Pintelon et al. (1992) énumèrent les différents outils d'aide à la décision disponibles en maintenance. Par ailleurs, Dhillon (2002) s'est focalisé sur les critères d'une bonne gestion de la maintenabilité et de la disponibilité dans le cycle de vie d'un système, ainsi que l'impact des erreurs à la conception des politiques de maintenance.

L'optimisation des coûts du cycle de vie (Life-cycle-costing) d'un équipement devrait commencer dès la phase de conception du système en des termes de sûreté de fonctionnement (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et de sécurité) et de niveau de redondance à mettre en place. De nombreux auteurs ont abordé les notions qui s'y rattachent (-Stevenson et al., 2006; Berk, 2010; Dhillon, 2002). Des politiques de commande maintenance ont été proposées dans le but d'améliorer la rentabilité des systèmes de production dans un environnement sain et sécuritaire de manière durable.

Bien que n'apparaissant pas directement à la valeur ajoutée des biens produits par une entreprise, la maintenance est pourtant indispensable. D'une part, elle permet de maintenir des équipements en bon état de fonctionnement. D'autre part, elle permet d'assurer la production dans le respect des délais et de la qualité.

Pour bien mesurer l'importance de la maintenance dans un environnement PVA (production à valeur ajoutée ou Lean), il suffit de se rappeler que dans un tel environnement on vise généralement à produire sur commande de petits lots avec des inventaires réduits, laissant ainsi peu de marge de manœuvre, car le moindre arrêt non planifié ou un problème de qualité risque d'avoir une conséquence directe et immédiate sur le client. Une méthode appropriée pour atteindre les objectifs fixés doit être choisie et mise en application. Pour ce faire, il est prépondérant de prendre en considération les paramètres suivants :

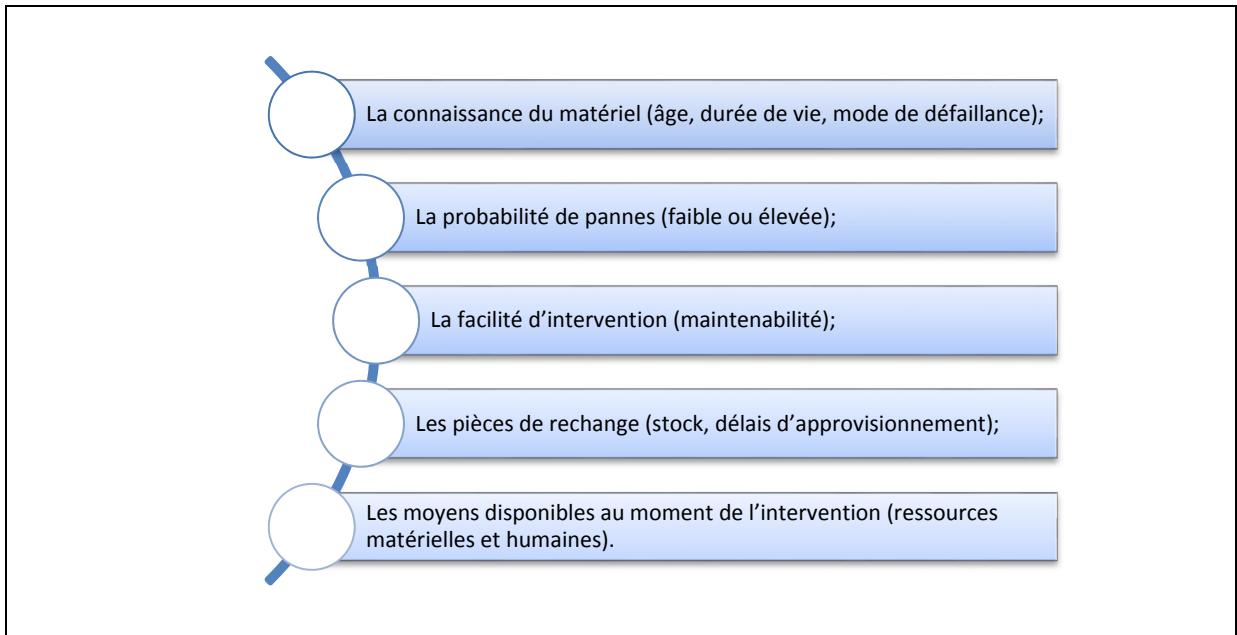


Figure 1.9 Choix d'une méthode de maintenance

Une mauvaise pratique de la maintenance a des effets néfastes sur la qualité des produits et réduit considérablement la fiabilité des équipements.

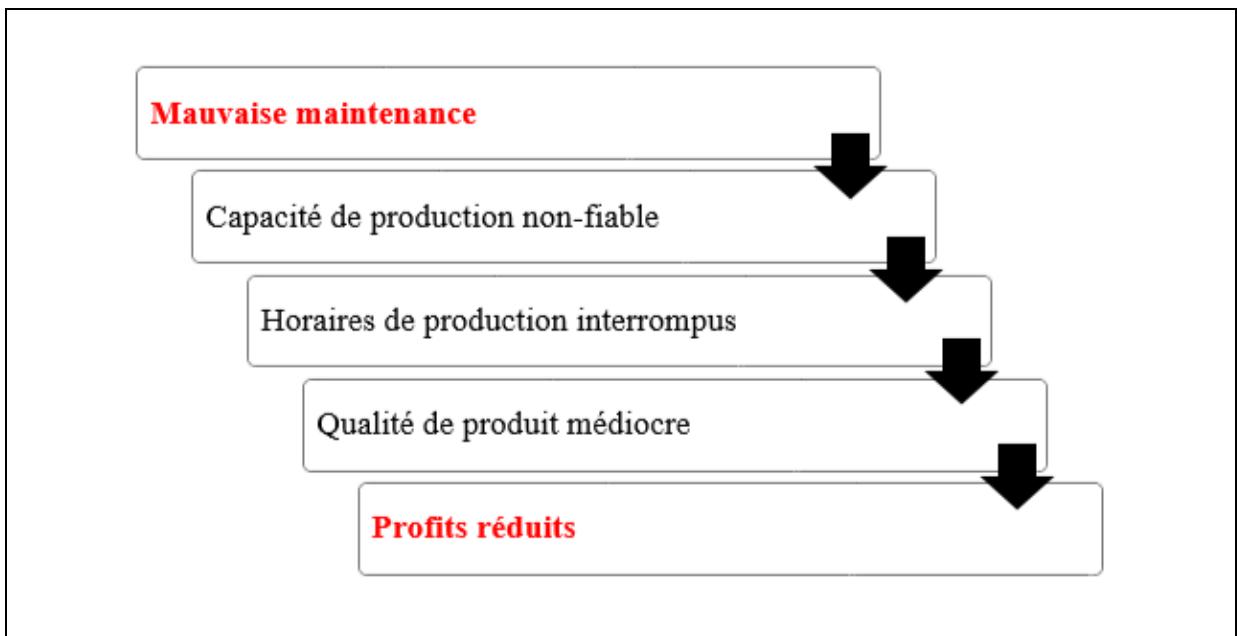


Figure 1.10 Impacts d'une mauvaise gestion de la maintenance

1.5 Cadenassage/décadénassage (C/D)

De nos jours, la prise en compte des aspects santé et sécurité au travail se justifie financièrement, en considérant les effets de ralentissement de la croissance économique causés par sa négligence (Badri et al., 2012). Au Québec, la commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) recommande les procédures de C/D pour se prémunir des accidents causés par la maintenance sur des machines en panne ou toute autre méthode assurant la sécurité du travailleur de manière équivalente. Le règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) encadrent ces procédures (*« § 1.1. — C/D et autres méthodes de contrôle des énergies - D. 1187-2015, a. 3 »*). L'article 188.2 prévoit le C/D lors de travaux de maintenance dans la zone dangereuse d'une machine.

Le C/D n'est pas toujours indispensable tel que défini à l'article 189.1 lorsque « le débranchement d'une machine est à portée de main et sous le contrôle exclusif de la personne qui l'utilise, que la source d'énergie de la machine est unique et qu'il ne subsiste aucune énergie résiduelle à la suite du débranchement ». Il est de la responsabilité de l'employeur de définir ces procédures et de veiller à leur utilisation conformément aux règles de l'art. À cet égard, il a un rôle de formateur et d'informateur vis-à-vis des personnes sous sa responsabilité. Il a également l'obligation de mettre sur pied des procédures d'allocation des horaires de travail, et des dispositions à prendre lorsqu'un travailleur oublie d'enlever son cadenas ou lorsque plusieurs employeurs seront présents (sous-traitants). Pour plus de détails sur les règles de l'art, le lecteur est référé à la norme canadienne CSA-Z460 2013 - Maîtrise des énergies dangereuses : C/D et autres méthodes. Celle-ci définit les critères de sa mise en œuvre.

Par ailleurs, il est bon de noter qu'un système de C/D n'est pas une fin en soi. C'est pour cette raison que (Saucier, 2012) stipule que le C/D n'est pas juste un cadenas. Cet auteur souligne l'importance du suivi des procédures de C/D après l'implémentation du système de C/D. En effet, une documentation du programme de C/D est nécessaire en plus des cadenas ainsi que les normes de codification et d'identifications du système constitué des machines, des dispositifs et des mécanismes de C/D et d'isolement. La documentation doit contenir les fiches de C/D, les procédures de C/D, les situations particulières. Un outil informatique est requis pour la gestion de l'audit, de la formation, et de la revue. Selon (Saucier, 2012), l'audit

et la revue sont souvent relégués au second plan alors que la réussite d'un système de C/D réside dans la qualité du suivi au quotidien (i.e. la revue et l'audit). L'article 51 de la CNESST indique que l'employeur a notamment l'obligation de (1) s'assurer que les conditions de travail du salarié sont saines et sécuritaires, (2) maîtriser les risques de santé et de sécurité liés à l'exécution du travail, (3) informer le travailleur sur ces risques, (4) former le travailleur à la prévention contre ces risques. Quant à l'article 59, il exige l'élimination des risques de SST à la source du problème par des mesures de surveillance et d'assurance qualité de l'environnement de travail. La norme Z1000 indique que le système de C/D doit s'intégrer à la politique de la SST. La norme Z460-05 relative à la maîtrise des énergies dangereuses intégrant le C/D détaille les procédures de C/D notamment dans son article 7.6. Ainsi, il est possible d'améliorer la performance du système manufacturier en termes de coût de production, de réparation et d'inspection par le contrôle du temps du C/D et la prise en compte des facteurs humains qui peuvent engendrer des erreurs humaines. Charlot et al. (2007) ont remarqué que le C/D ne peut se faire sans compromis. À ce sujet, pour remédier à la problématique de la planification de la production et de la maintenance avec C/D, Emami Mehghani et al. (2011) ont développé le concept du temps moyen de C/D (Mean Time to Lockout/tagout (MTTLT)). Ce concept consiste à prendre en considération le temps de C/D en fonction des niveaux d'inventaires et de pénurie du système de production. La politique de commande optimale qui découle de leur étude permet de diminuer les coûts de production et de maintenance sur un horizon de planification infini tout en maintenant un niveau optimal de sécurité des travailleurs.

Cependant, malgré l'abondance des écrits et les obligations formulées dans la réglementation en la matière au Québec, les dernières décennies sont teintées d'accidents et d'incidents, des centaines de travailleurs des industries manufacturières sont victimes de blessures graves voire mortelles pendant l'exercice de leurs fonctions de maintenance.

Récemment, le rapport des principales statistiques de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST-2016) révèle un bilan alarmant d'accidents du travail, de décès et de maladies professionnelles au Québec. 80.000 travailleurs ont été victimes d'accident du travail, 63 travailleurs sont décédés à la suite d'un accident du travail ; 10 à 15% de ces accidents sont liés à des machines (DC 200-1046-22). Par ailleurs, cette commission indique également près de quatre morts et plus de 1000 accidents en

moyenne tous les ans au Québec lors d'intervention sur des machines où les procédures de C/D n'étaient pas respectées de 2010 à 2014. Cette situation impacte fortement la performance du système manufacturier.

C'est ainsi qu'en 2016 la CNESST ajoute au RSST des articles (*art. 188.1 à art. 188.13*) afin de préciser les obligations des employeurs relatives au contrôle des énergies dangereuses.

Bulzacchelli et al. (2008) rappellent l'importance de l'utilisation du C/D pour prévenir la survenue de ces évènements indésirables. Toutefois, les différents acteurs impliqués dans la maintenance des équipements sont souvent confrontés aux barrières imposées par les contraintes de temps et de productivité. Ainsi, pour équilibrer le système de production avec une prise en compte de tous ces éléments, il est indispensable d'intégrer un politique de C/D robuste et souple à la planification de la production et de la maintenance.

1.6 Erreur humaine

Il n'y a pas, et il n'y aura pas, de systèmes sans hommes, quel que soit le niveau de technologie de ces systèmes malgré tous les slogans qu'on entend aujourd'hui sur l'industrie 4.0. Les métiers changeront, les paradigmes de couplage homme-machine évolueront, mais les facteurs humains resteront un domaine inévitable. Les machines nécessitent l'intervention de l'opérateur humain pour le changement de gamme de production et la mise en course, ainsi que l'entretien. Une tâche de maintenance est une activité complexe où l'opérateur exécute une variété de tâches dans un environnement incertain avec des contraintes de temps et parfois une ambiance et des conditions de travail difficiles. Cette situation caractéristique de la maintenance est génératrice d'erreurs sous différentes formes. L'erreur humaine (EH) dans la maintenance est devenue un problème urgent à traiter (Dhillon et al., 2006). Elle a un impact direct sur la disponibilité du système manufacturier et peut conduire à des incidents ou accidents durant ces interventions (Chinniah and Champoux, 2008). Par ailleurs, les erreurs peuvent être classifiées sous six catégories (Dhillon et al., 2006) : les erreurs (1) d'opération, (2) d'assemblage, (3) de conception, (4) d'inspection, (5) d'installation, et (6) de maintenance. Il existe plusieurs raisons pour lesquelles ces dernières (erreurs de maintenance) se produisent

dans un FMS. Parmi celles-ci, notons une mauvaise configuration des postes de travail (*Poor work layout*), des procédures ou des manuels de maintenance complexes obsolètes, des environnements de travail hostiles (température, humidité, bruit, etc.), l'influence de la fatigue, une formation ou une expérience insuffisantes (Dhillon et al., 2006). Il est important de noter que les personnes ayant plus d'expérience et des aptitudes plus élevées, ainsi qu'une plus grande stabilité émotionnelle ont moins de chances de provoquer des erreurs (Noroozi et al., 2013). Un certain nombre de mesures doivent être prises en compte au regard des erreurs (Collazo, 2010) : (1) des procédures et instructions de travail claires et précises, (2) une bonne ingénierie des facteurs humains pour les processus, les équipements et les environnements de travail, (3) une formation et une pratique, ainsi qu'une supervision appropriée, (5) une bonne communication, (6) des capacités humaines nécessaires pour réussir la tâche assignée.

Rasmussen (1983) classifie le comportement de l'opérateur humain sous trois catégories :

- › Le comportement machinal ou automatique de l'opérateur (*Skill-based behaviour*). Pour ce type de comportement, l'activité mentale consciente de l'humain n'est pas sollicitée.
- › Le comportement procédural (*Rule-based behaviour*). Pour ce type de comportement l'opérateur humain fait appel à l'activité mentale consciente lors de l'exécution d'une tâche.
- › Le comportement cognitif (*Knowledge-based behaviour*). L'activité mentale consciente est complexe pour ce type de comportement. C'est le cas où l'opérateur humain fait face à des situations inhabituelles.

1.7 Approche d'optimisation

1.7.1 Introduction

Dans une époque de globalisation de l'économie mondiale et de croissance accélérée de la production, il est crucial pour les acteurs des industries manufacturières d'optimiser leur production à valeur ajoutée (PVA). Ainsi, pour une gestion optimale de l'ensemble de la chaîne

de valeur, les acteurs industriels doivent faire preuve d'une grande précision en ce qui concerne la prise de décision. Dekker (1996) identifie quatre (4) étapes aux modèles d'optimisation de la maintenance : (1) description du système technique, de ses fonctions et leur importance ; (2) modélisation de la détérioration du système dans le temps et subséquemment des conséquences possibles, (3) description de l'information disponible et des actions à entreprendre pour la gestion du système, (4) fonction-objectif et technique d'optimisation permettant de trouver l'équilibre du système. En outre, le gestionnaire du système a l'obligation de garantir un environnement de travail sécuritaire tel que le prescrit les lois provinciales et canadiennes.

La problématique des modèles d'optimisation réside sur la difficulté de compréhension et d'interprétation du comportement de leur performance dans le temps du fait de leur nature stochastique et incertaine. Dans la littérature, plusieurs approches sont utilisées pour la détermination de la politique de commande optimale des systèmes de production. Dans la suite de cette section, il sera exploré les recommandations de la communauté scientifique qui ont trait à l'utilisation des approches d'optimisation pour la résolution des problèmes de commande optimale dans un système de production.

1.7.2 Commande optimale dans un environnement manufacturier

Un système manufacturier flexible est souvent constitué de plusieurs machines pilotées par un ordinateur central dont la finalité est de satisfaire la demande des clients avec une bonne gestion de l'ensemble de la chaîne de valeur. Plusieurs approches d'optimisation ont été utilisées pour la résolution de problèmes de commande optimale de la production dans un environnement manufacturier. Toutefois, la majorité de ces approches ne concernaient que des problèmes purement déterministes. Pour cette raison, des chercheurs se sont intéressés à la théorie de la commande optimale dans un environnement manufacturier prenant en compte les phénomènes stochastiques du système tels que les pannes, les réparations et la demande. Les travaux de Rishel (1975) ont permis d'élaborer les conditions d'optimum pour aboutir à une solution optimale par une approche de programmation dynamique. Le caractère stochastique de la commande optimale de la production dans un système manufacturier flexible (*FMS*) a été traité par Olsder et al. (1980) par une approche de modélisation markovienne homogène.

Toutefois, ils se sont heurtés à la complexité de résolution du modèle de programmation dynamique de leur politique de commande optimale de la production. Dans le même ordre d'idées, Kimemia et al. (1983) ont développé un algorithme de commande hiérarchisé à plusieurs niveaux permettant de caractériser un problème de commande optimal stochastique de la production. Par ailleurs, Akella et al. (1986), par une approche markovienne à taux de transition constants, ont formalisé une politique de commande optimale permettant d'obtenir la solution complète et de montrer que celle-ci est caractérisée par un certain seuil critique de l'inventaire (*Optimal inventory level*). Toutefois, l'obstacle réside toujours au niveau de la complexité de résolution de la fonction-coût à travers les équations différentielles de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) par une approche de résolution analytique lorsque le système devient plus complexe. Il est nécessaire d'utiliser une méthode de résolution numérique afin d'obtenir une solution des équations de HJB. C'est ainsi que Kushner et al. (1992) ont développé un algorithme permettant la résolution numérique des équations HJB. Ces travaux mentionnés précédemment ont marqué le point de départ de plusieurs approches disponibles dans la littérature qui feront l'objet d'une analyse détaillée dans la suite de cette section. Ainsi, elles seront adressées des approches de résolution mathématique, l'optimisation basée sur la simulation, ainsi qu'une heuristique de l'intelligence artificielle, en l'occurrence les algorithmes génétiques.

1.7.3 **Approche de résolution mathématique**

Depuis des décennies, la communauté scientifique s'est intéressée à la problématique de commande optimale stochastique des systèmes de production flexibles. Le champ des publications dans ce domaine s'élargit largement. Toutefois, les aspects de santé et de sécurité au travail ne semblent pas être suffisamment adressés par la communauté scientifique. Les premières publications, notamment celles Gershwin et al. (1984) en témoignent. Les pionniers dans ce domaine, se sont limités effectivement aux problématiques de productivité des systèmes sans prendre en considération les problématiques de santé et sécurité au travail, et de l'impact de l'EH. Par ailleurs, Kimemia et al. (1985) ont suggéré une stratégie de commande optimale du rythme de production de type seuil à point critique (*Hedging point policy (HPP)*)

dépendant du niveau d'inventaire de produit finis. Un an plus tard, Akella et al. (1986) ont abordé ce problème de commande optimale par le biais d'une résolution analytique dans le cas d'un FMS constitué d'une machine produisant un seul type de produit (M1P1) confirmant ainsi la politique à seuil critique (*HPP*). Ces études mentionnées ci-dessus ont, de facto, déclenché la multiplication du nombre des publications relatives au concept de *HPP* intégrant l'âge de la machine (*cf. Boukas et al. (1990) et ses références bibliographiques*). Par la suite, Kenné et al. (1997) ont élargi ces modèles à seuil critique en intégrant la commande des taux de maintenance en fonction du niveau d'inventaire. Ils proposent une politique de commande optimale des réparations. Le lecteur peut se référer aussi aux travaux de Kenné et al. (2004b) et Kenné et al. (2003) qui ont élargi ces modèles à des systèmes manufacturiers composés de plusieurs machines produisant plusieurs produits. Par ailleurs, des chercheurs ont intégré dans leurs problèmes de commande optimale de la production et de la maintenance les procédures de C/D (Badiane, 2010; Charlot et al., 2007; Emami-Mehrgani et al., 2011). Deux ans plus tard, Emami-Mehrgani et al. (2015) esquisSENT les contours d'une politique d'intégration de la problématique de l'erreur humaine à un problème de commande optimale de la production et de la maintenance prenant en compte les procédures de C/D. Toutefois, l'ensemble de ces auteurs susmentionnés, se sont surtout heurtés au problème de la résolution numérique de leur modèle par le biais des méthodes classiques avec l'augmentation du nombre des machines qui rend le problème beaucoup plus complexe et difficile à résoudre. La totalité de ces chercheurs emprunte la même démarche de modélisation analytique et de résolution numérique. Pour y arriver ils ont eu recours à de nombreuses hypothèses qui ne reflètent pas la réalité des phénomènes observés dans l'industrie manufacturière tels que l'impact des facteurs humains. Par exemple, pour une résolution des équations HJB, il est nécessaire de passer par une méthode numérique (approche de Kushner et al. (1992)) qui est une discréétisation de la fonction valeur des équations différentielles de HJB. En réponse à cette situation, une approche d'optimisation séquentielle combinant une méta-heuristique complète issue de l'intelligence artificielle, par exemple l'algorithme génétique ou le recuit simulé (*Simulated annealing*) combiné avec la simulation d'évènements discrets / continus, est fondamentale pour traiter les problèmes de commande optimale. D'ailleurs, Andradóttir (1998a) remarque qu'en pratique, l'approche d'optimisation par les méthodes de recherche directe (*Direct search*) se sont

montrées limitées lorsque le système devient plus complexe. D'où l'exigence d'avoir recours à des méthodes plus souples et robustes comportant des outils de modélisations moins fastidieux. Par exemple, les AGs sont une méthode d'optimisation simple et rapide pour une exploration globale et permet d'obtenir une solution approchée en un temps intéressant.

1.7.4 Optimisation basée sur la simulation

Dans un FMS, les phénomènes stochastiques constituent la pierre d'achoppement de la planification qui font souvent déraper les prévisions. Cependant, une bonne prédiction de ces phénomènes afin de prendre en compte l'impondérable dans un FMS peut permettre d'optimiser la productivité, du même coup et par ricochet, le retour sur investissement et la SST. Pour la conception et l'évaluation de ces performances, il est recommandé de recourir à des modèles de simulation aussi proches que possible de la réalité de l'environnement manufacturier (Azadivar, 1999; Azadivar et al., 1998; Azadivar et al., 1999; Kenné et al., 2001; 2004a).

L'optimisation basée sur la simulation se définit comme une pratique liant une méthode d'optimisation à un modèle de simulation dans le but de déterminer la valeur des paramètres d'entrée appropriés qui maximise la performance du système étudié (*Bowden et al., 1998*). En d'autres termes, Carson et al. (1997) décrivent la simulation comme un processus permettant de définir les meilleures valeurs d'entrée (*input variables*) parmi toutes les possibilités sans faire une évaluation explicite de chaque possibilité. Le développement de modules de simulations d'événements discrets est probablement le plus grand succès des interfaces entre la recherche opérationnelle et l'informatique (Fu, 2002). La fusion entre l'optimisation et les technologies de simulation continue à faire sa montée en puissance de plus en plus rapide (April et al., 2003). Dans la pratique, l'intégration de modules d'optimisation et de simulation est devenue omniprésente et une nécessité pour les fournisseurs de progiciels de simulation d'événements discrets (Fu et al., 2000). En production manufacturière, l'optimisation basée sur la simulation est un puissant outil d'aide à la décision. D'autre part, Carson et al. (1997) ont classé ces techniques de simulation en six (6) catégories (*cf. la figure 1.11 ci-après*).

Toutefois, nous ne rentrons pas dans les détails de chacune de ces techniques. Le lecteur peut se référer aux travaux et références bibliographiques des auteurs susmentionnés.

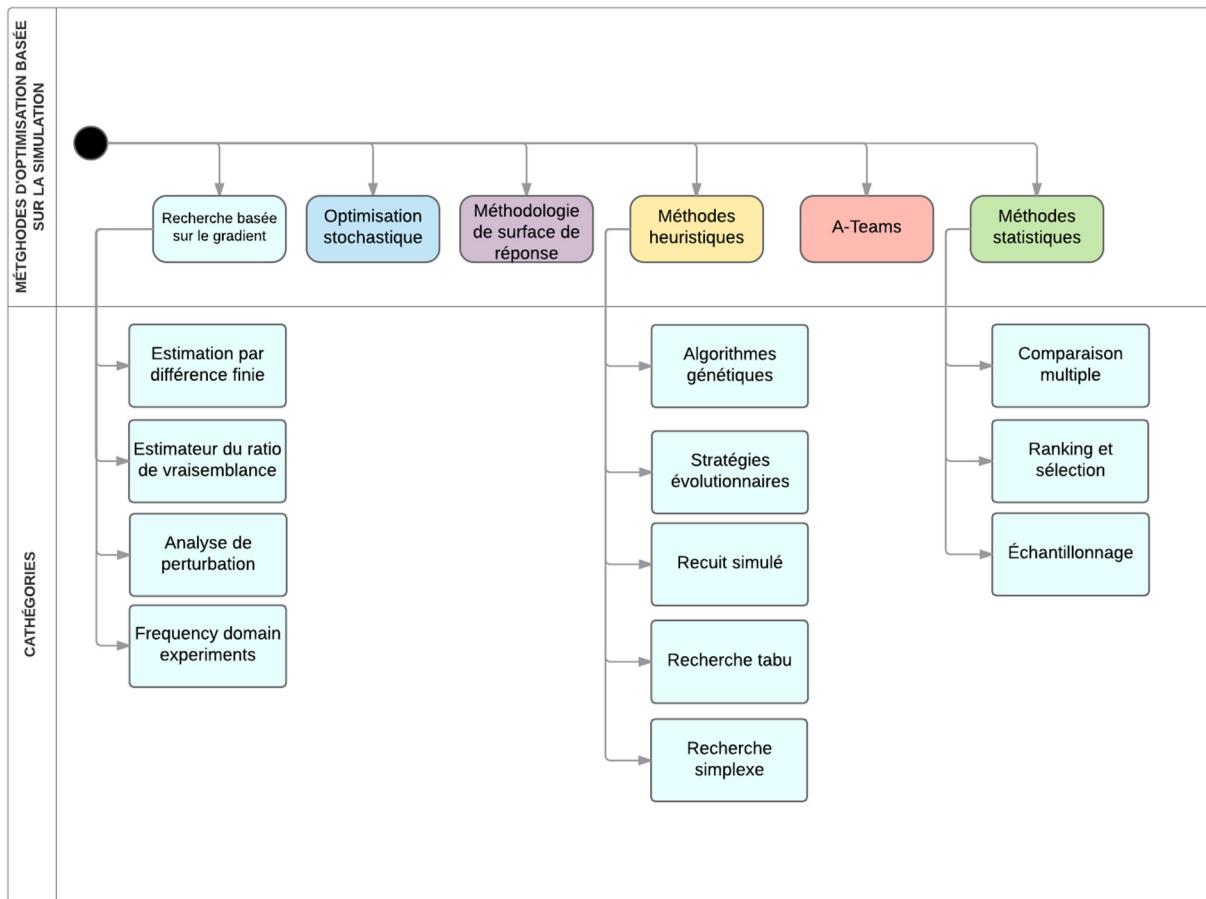


Figure 1.11 Méthodes d'optimisation basée sur la simulation

Par ailleurs, un survol des recommandations de la communauté scientifique permet de considérer trois (3) catégories de méthodes de simulation, à savoir 1 - les méthodes dérivatives (approximation du gradient), 2 - la méthodologie des surfaces de réponse (*Response surface methodology (RSM)*), et 3 - les méthodes heuristiques (Fu, 2002). Les méthodes dérivatives intègrent un ensemble de méthodes qui vise à estimer le gradient telles que les techniques d'approximation stochastique du gradient, ainsi que les méthodes d'analyse de perturbation infinitésimale (*Perturbation analysis methods*) (Azadivar et al., 1980; Ho, 1984). Les méthodes dérivatives comprennent aussi la méthode d'analyse du domaine de fréquence

(*Frequency domain analysis*), de même que l'estimation du ratio (*Likelihood ratio gradient estimation*) (Glynn, 1990) et la méthode des différences finies (Andradóttir, 1998a; 1998b).

Pour la résolution des problèmes de commande optimale, les techniques de conception expérimentale (*Design of experiment DOE*), d'analyse statistiques (*ANOVA*) et la méthodologie des surfaces de réponse (*RSM*) sont souvent utilisées, en combinaison avec la simulation, pour modéliser le comportement du système étudié et les interactions qui ont un impact sur ses performances. Au final, les performances du système sont exprimées par le biais de la régression. Ce faisant, les conditions d'optimum du système pourront être approximées en minimisant la fonction coût (équation de régression) ainsi obtenue. Les modèles de simulation d'événements discrets/continus sont utilisés pour obtenir l'estimation du coût de production en temps réel. L'optimisation basée sur la simulation rend la résolution de problèmes de commande optimale plus simple par rapport aux techniques classiques de recherche directe qui sont trop exigeantes en durée de calcul informatique. En effet, la recherche directe requiert beaucoup d'hypothèses simplificatrices à la résolution numérique des problèmes de commande par rapport aux modèles de simulation (Boulet et al., 2005). En outre, les techniques de simulation permettent d'obtenir une description détaillée du comportement dynamique du système manufacturier (Hlioui et al., 2015). Dans le même ordre d'idées, Azadivar et al. (1998) ont souligné que la sélection d'une politique optimale de maintenance, indépendamment des autres paramètres du système de production, ne permet pas souvent d'obtenir toutes les conditions d'optimalité au niveau opérationnel. En réponse à cette situation, ces auteurs ont recommandé la simulation comme approche d'optimisation pour le choix de politiques de maintenance. En effet, dans leurs travaux, ces derniers ont remarqué que les résultats tirés de l'expérience de la simulation indiquent les mêmes formes de surfaces de réponse que celles tirées des méthodes d'optimisation de recherche directe. Toutefois, le problème de ces méthodes classiques (*Direct search*) ne sont pas souvent faciles à résoudre et impliquent souvent beaucoup d'hypothèses simplificatrices, du fait que la performance du système dépend de la combinaison de variables quantitatives (espaces tampons admissibles) et qualitatives (choix de politiques de maintenance). Pour plus de détails sur ces aspects de performance, le lecteur est référé aux travaux de Azadivar et al. (1998).

En revanche, la simulation, en tant qu'outil d'aide à la décision, à elle seule, n'est pas en mesure d'effectuer directement les calculs de résolution des problèmes de commande de système de production (Hajji, 2004). Cependant, la simulation aide à faciliter l'analyse, l'interprétation et la compréhension du comportement du système de production. Donc il est nécessaire de combiner cette approche à d'autres techniques d'optimisation, en l'occurrence les méta-heuristiques et l'optimisation évolutionnaire, par exemple les algorithmes génétiques. Pour plus de détails concernant l'approche d'optimisation basée sur la simulation, le lecteur peut se référer au travaux de Kenné et al. (2001; 2004a) ; Azadivar et al. (1999) ; Azadivar et al. (1998) et leurs références bibliographiques.

1.7.5 Algorithmes génétiques

L'intelligence artificielle (IA) constitue une approche qui n'est pas nouvelle. Une analyse de la littérature permet de constater un élargissement du champ des publications au cours de la dernière décennie dans le domaine, parmi d'autres, de la logique floue, de l'algorithme génétique, ainsi que les réseaux de neurones. Au lieu de faire des développements complexes dans ce vaste domaine, il sera juste abordé dans cette section les aspects de la littérature qui touchent la problématique de recherche, en l'occurrence les algorithmes génétiques (AGs). Dans la suite de cette section, il sera exploré les avantages et les inconvénients de cette méthode d'optimisation de l'IA, afin de recueillir les différentes recommandations de la littérature scientifique en lien avec notre problématique de recherche. Pour plus de détails sur la programmation génétique, le lecteur est référé aux travaux de Holland (1975) et Goldberg et al. (1988), et Mitchell (1996).

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des méta-heuristiques inspirées des processus d'évolution darwinienne des espèces. Ils sont des algorithmes de recherche (*Search algorithms*) basés sur le mécanisme de la sélection et de la génétique naturelle. C'est un ensemble de procédures de recherche aléatoire. Le terme algorithme génétique est une émanation de l'analogie de l'évolution biologique des espèces. La structure et l'habileté d'un organisme à survivre dans son environnement dépend largement de son ADN (Azadivar et al.,

1999). Les pionniers dans ce domaine, Holland (1975) et Goldberg et al. (1988), ont esquissé les contours du processus fondamental des AGs appliqué à l'optimisation mathématique.

Pour faciliter la compréhension de la suite de cette section, un générique des terminologies utilisés est dressé ci-après :

Tableau 1.2 Terminologie des algorithmes génétiques

Terminologie	Signification
Population	Ensemble des solutions d'une itération donnée
Génération	Itération
Chromosome	Solution possible
Gène	Variable aléatoire
Allèle	Valeur d'une variable aléatoire
Fonction ' <i>fitness</i> '	Fonction d'adaptation qui définit la qualité d'une solution donnée

L'habileté d'un organisme à survivre est qualifiée de '*fitness*'. Dans la reproduction sexuée, les progénitures (*offspring*) sont une combinaison des deux ADN-parents. Le '*fitness*' de l'organisme est déterminé par la fonction '*fitness*' (*fitness function*). En effet, les AGs combinent les chromosomes les plus aptes à survivre, échangeant de manière stochastique des informations structurées et structurantes pour former un algorithme de recherche. Pour plus de développement, le lecteur est référé aux travaux de Davis (1991).

Les différentes phases du processus de mise en œuvre des AGs sont schématisées ci-après:

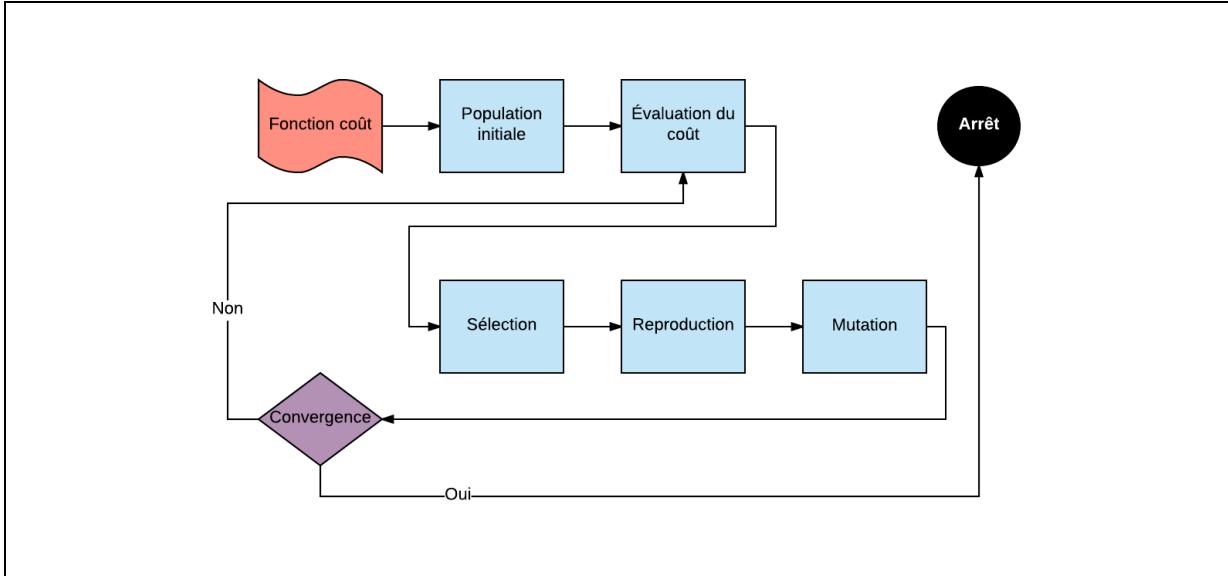


Figure 1.12 Processus de résolution des algorithmes génétiques

POPULATION INITIALE : le processus des AGs se réalise sur un ensemble de solutions initiales dénommées population initiale ou première génération. La population initiale est générée de manière stochastique à partir de méthodes heuristiques. Les itérations permettent de passer d'une génération à une autre à l'aide des opérateurs génétiques (sélection, reproduction, mutation). Il est crucial de souligner que le risque d'une convergence prématurée est intrinsèque à un ensemble de solutions non-optimales envahissant rapidement la population avec une forte adaptabilité ('fitness'). Pour cette raison, il est fondamental de définir une population initiale composée d'individus hétérogènes pour favoriser la convergence à un optimum global.

SELECTION : la sélection est une étape décisive du processus des AGs. Cette phase permet de déterminer les individus de la population qui survivront à la prochaine génération, en fonction des paramètres de la fonction-coût. Autrement dit, minimiser la fonction-coût d'un problème d'optimisation revient à choisir des chromosomes (solutions) parmi les individus de la population qui contribuent à l'évolution de la solution (*individus ayant un poids faible, et une probabilité de reproduction élevée*). Pour ce faire, l'évaluation des chromosomes de la génération se réalise à travers la fonction adaptabilité (*fitness function*). L'analyse des

recommandations de la littérature fait apparaître différentes méthodes de sélection, parmi elles, les méthodes déterministes et celles stochastiques. Les méthodes de sélection déterministes permettent à l'algorithme de considérer les chromosomes les mieux adaptés lors de chaque itération. Par exemple, la méthode de *l'élitisme* est une technique de sélection déterministe permettant de sélectionner les meilleurs chromosomes de la génération en fonction de leurs aptitudes à survivre à la prochaine itération. Les méthodes de sélection stochastiques effectuent la sélection de manière aléatoire en fonction de l'adaptabilité de l'individu (*fitness value*). En effet, les chromosomes avec une probabilité de sélection plus élevée ont plus de chance d'être sélectionnés. En guise d'exemple, la méthode de *la roulette de fortune* est une technique de sélection aléatoire permettant de déterminer les solutions de la fonction-coût qui seront évaluées à la prochaine itération. La roulette est subdivisée en secteurs proportionnels à la probabilité de sélection de l'ensemble des solutions de la population.

REPRODUCTION (CROISEMENT) : cette phase permet la recombinaison des gènes des parents pour former de nouveaux chromosomes (enfants) comportant un matériel génétique hérité de deux parents choisis aléatoirement dans la génération. Toutefois, dans certaines situations où le problème comporte plusieurs minima locaux, la phase de croisement risque de ne pas se réaliser. Ce faisant, l'algorithme risque de converger à un minimum local. La phase de reproduction se réalise en fonction de la probabilité de croisement. Cette probabilité de combinaison est souvent choisie dans l'intervalle [0.6, 1] (Chipperfield et al., 1995)

MUTATION : cette phase permet d'éviter à l'algorithme génétique de converger à un minimum local. Ce phénomène de mutation force le programme à aller explorer d'autres régions du champ des coûts, afin de localiser le minimum global du problème. L'opérateur de mutation choisit simplement, de manière sporadique et stochastique une position aléatoire dans la chaîne du chromosome (*string*), et change la valeur de l'allèle par une nouvelle valeur sélectionnée de manière aléatoire (*pour plus de développements, cf. (Azadivar et al., 1999)*). Ce faisant, la génération se diversifie conférant à l'algorithme la capacité de sortir des minima locaux. La probabilité de mutation est d'habitude très petite, environ moins de cinq pour cent (5%) (Chipperfield et al., 1995).

CRITÈRE D'ARRÊT : le survol de la littérature permet de constater un recours à une variété de critères d'arrêt. L'implémentation du critère d'arrêt incombe à la discréption du

développeur de l'algorithme qui fera le compromis entre temps de résolution et qualité de résultats. Il a le choix d'imposer l'arrêt du programme après un nombre N de générations (autrement dit, après un certain nombre d'itérations), ou après un temps T de fonctionnement. Le critère le plus utilisé est celui qui impose au programme d'arrêter lorsque la génération converge en un point où toutes les générations donnent pratiquement les mêmes solutions (Chipperfield et al., 1995).

Au cours de la dernière décennie, la communauté scientifique s'est beaucoup intéressée aux méthodes de recherche heuristiques dans des domaines variés. Le nombre des publications dans ce domaine a considérablement cru. Azadivar et al. (1999) ont formulé une méthodologie d'optimisation intégrant des variables de décision, aussi bien quantitatives que qualitatives. Dans ces travaux, ces auteurs ont développé une combinaison d'une heuristique de résolution basée sur les AGs et un modèle de simulation généré automatiquement par le canal de la programmation orientée-objet (*Object-oriented programming (OOP)*). En effet, dans leur approche, l'AG permet de définir les données d'entrées du modèle de simulation. Ainsi, à la suite de chaque itération, les résultats de la simulation sont retournés à l'AG pour être évalués. Ainsi, une nouvelle population est reconstituée à partir de cet échantillon en s'appuyant sur une règle de sélection basée sur le '*fitness*' de la valeur obtenue pour chaque point. Ce faisant, le processus continue en boucle jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante du système (critère d'arrêt). In fine, la performance de leur procédure est évaluée en faisant une comparaison de résultats de plusieurs '*problèmes tests*' de tailles variées afin de valider l'efficacité de cette approche de résolution.

Dans le même ordre d'idées, Bowden et al. (1995) ont eu recours à une approche combinant les AGs et la simulation pour définir les conditions d'optimum dans un environnement manufacturier. Par ailleurs, Legault (1995) indique que les approches de résolution exacte n'assurent pas toujours une solution optimale. Étant donné la complexité de résolution des modèles analytiques, il faut souvent recourir à des hypothèses simplificatrices afin d'aboutir à une solution. Par exemple, pour la résolution des équations HJB, il était nécessaire de passer par une modélisation analytique et une méthode de résolution numérique afin d'obtenir une solution des équations de HJB en discrétilisant la fonction valeur. En effet, les méthodes de résolution exactes requièrent un temps de calcul conséquent, d'où la nécessité

de recourir à des approches de résolution heuristique, notamment les AGs. L'avantage de ces dernières se trouve dans leur capacité de fournir une solution acceptable en un temps de calcul non-prohibitif. Il est bon de mentionner que la solution obtenue avec une approche heuristique n'est pas forcément la valeur optimale du problème à résoudre. Néanmoins, les techniques de résolution heuristiques permettent d'obtenir des optima globaux permettant la résolution du problème avec un temps de calcul réaliste (Chipperfield et al., 1995).

Plus de détails concernant la résolution des algorithmes génétiques sous Matlab sont présentés à l'annexe IV.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE, MÉTHODOLOGIE, CONTRIBUTION ET STRUCTURE DE LA RECHERCHE

2.1 Introduction

L'industrie manufacturière a toujours eu comme défi principal l'accroissement de ses profits. Son environnement est de plus en plus compétitif et incertain en raison d'une clientèle de plus en plus exigeante en ce qui concerne le prix, la qualité, les délais de livraison et les gammes de produits disponibles.

Par ailleurs, il y a déjà plus de dix ans que la CNSST implante des politiques de tolérance zéro au regard des zones dangereuses des machines. La consignation de la machine par la méthode du C/D est la mesure phare de réduction des risques d'accident au Québec. L'employeur à l'obligation de s'assurer que l'opérateur intervenant à la zone dangereuse d'une machine respecte les recommandations du RSST.

Aujourd'hui, la toile de fond des FMS est gouverné par des exigences d'agilité et de flexibilité qui constituent le leitmotiv des acteurs du domaine et les contraignent à adapter leurs modèles d'affaires à cette nouvelle réalité du secteur manufacturier. Toutefois, des écueils demeurent quant à l'utilisation des procédures de C/D dans les industries manufacturières. En outre, l'influence des défaillances (qui sont des phénomènes aléatoires des systèmes de production), l'impact des facteurs humains sous des termes de fiabilité ou d'EH, ainsi que l'accroissement de l'incertitude et de la complexité de l'environnement manufacturier sont autant de pierres d'achoppement qui aiguisent la curiosité des scientifiques dans le domaine de la commande des politiques de production et de maintenance.

Une vision d'optimisation est requise pour la commande de l'ensemble des maillons du système manufacturier. Ceci passera nécessairement par la maîtrise de l'ensemble des activités du système, soit la minimisation de la fonction-objectif du système qui est la fonction coût à tous les échelons de la chaîne de valeur, donc l'atteinte des objectifs de productivité.

Le champ des publications dans ce domaine s'élargit au cours de la dernière décennie témoignant de l'intérêt majeur des chercheurs à une quête sans fin de nouveaux modèles

repoussant les limites du savoir. Ceux-ci s'intéressent de plus en plus aux problématiques de santé et sécurité au travail (SST) par le canal de l'intégration des procédures de C/D.

2.2 Structure du mémoire

La première section introduit le travail effectué dans ce mémoire. Le chapitre 1 présente, à travers une revue critique et synthétique de littérature, les différentes recommandations scientifiques reliées au domaine de recherche, ainsi que l'objectif de la recherche. Plusieurs types de recherches dans des domaines variés ont été identifiés et passés en revue à travers une analyse minutieuse et exhaustive afin de disséquer l'état de l'art dans le domaine de la recherche.

Le chapitre 2 est consacré à la problématique et la méthodologie de recherche pour aboutir aux objectifs de la recherche. Ultimement, la contribution et les retombées scientifiques la structure générale du mémoire sont présentées au terme de ce chapitre.

In fine, le chapitre 3 présente l'article de journal (*Human error, optimal production control policies, corrective maintenance with lockout/tagout and random demand*) soumis à la revue IJPR (*International Journal of Production Research*) le 02 octobre 2017.

La dernière section du mémoire est consacrée à la conclusion générale du travail et les recommandations pour de futures études.

2.3 Objectifs et hypothèses de la recherche

Le problème de commande traité dans ce travail porte sur la définition d'une politique de commande de la planification de la production et de la maintenance intégrant le cadenassage/décadenassage (C/D) dans un environnement manufacturier flexible¹ (*FMS – Flexible Manufacturing System*). Le FMS étudié est constitué d'une machine produisant deux

¹ Nous parlons de flexibilité de la machine (*machine flexibility*) quand la machine et l'ordre d'exécution des opérations sont reconfigurables pour apporter les changements nécessaires pour fabriquer une variété de types de produits ou de composants donnés (flexibilité de produit, flexibilité de processus, flexibilité d'opération) – voir Browne et al., 1984. Dans le cas de notre étude, le temps de mise en course (Setup) est négligeable.

types de produits et évoluant dans un environnement manufacturier stochastique. Ce dernier est caractérisé par des phénomènes aléatoires tels que des pannes et des réparations, ainsi que l'influence de l'EH sur la durée des interventions.

La souplesse et la robustesse du modèle d'intégration des processus de C/D² et de maintenance à la planification des opérations de production est à l'essence même de ce projet de recherche. Ce faisant, le FMS sera en mesure de faire face aux aléas inhérents à l'incertitude d'un environnement peu fiable (défaillance de la machine, pénurie, surplus, défaillance de l'opérateur humain) et à l'exigence des clients au regard de la demande³, ainsi que le respect de la santé et de la sécurité des travailleurs.

Le schéma de principe du système étudié est représenté ci-après:

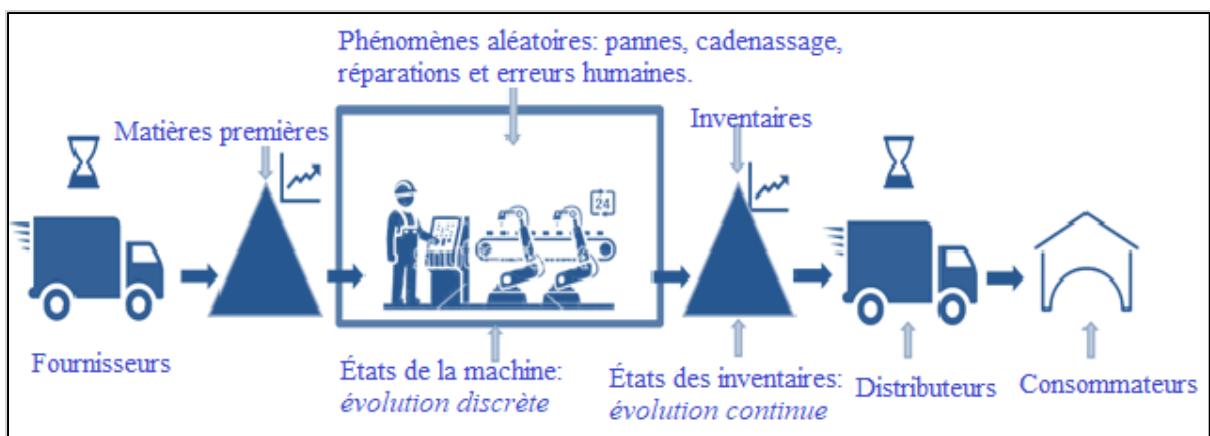


Figure 2.1 Système de production étudié

L'objectif ultime de cette recherche vise le développement d'une politique de commande optimale, robuste et souple, facilitant l'intégration du C/D à la planification de la production et de la maintenance au regard de la défaillance humaine. La finalité est d'amoindrir

² Rappel : Le cadenassage se définit comme « une mesure de prévention pour contrer les blessures causées par le dégagement intempestif d'une source d'énergie lors de l'installation, de l'entretien ou de la réparation d'une machine, d'un équipement ou d'un processus industriel » (cf. D. 1187-2015, a. 3)

³ Par essence, la demande des clients est variable. Toutefois, dans le cadre de cette étude, nous utilisons un taux de demande constant.

les coûts globaux de production intégrant les coûts d'inventaire et de pénurie, et d'inciter de manière durable l'employeur ainsi que le travailleur à rendre leurs lieux de travail sains et sécuritaires. À cet égard, la prise en considération du système de production dans un contexte incertain permettrait de mettre en exergue l'importance de l'EH à la gestion conjointe de la production et de la maintenance corrective intégrant le processus de C/D selon l'article 188.2 de la CNESST.

Les sous-problèmes spécifiques de recherche servent de véhicule pour la résolution de la problématique de recherche afin d'aboutir à l'objectif ultime de ce mémoire. Ainsi, les sous-problèmes spécifiques associés à chaque objectif spécifique sont traités successivement. Par conséquent, l'objectif général est subdivisé en trois (3) objectifs spécifiques plus faciles à gérer qui découlent de la résolution de chacun des sous-problèmes spécifiques :

- i. Dans la première phase, une politique de commande de la production et de la MC intégrant le C/D ainsi que l'influence de l'EH est développée par le biais d'une approche combinant un formalisme analytique et des méthodes numériques.
- ii. Dans la seconde phase de cette étude, il est développé une méthode expérimentale par le biais de la simulation d'évènements discrets, les plans d'expériences et l'analyse statistique, ainsi qu'une heuristique issue de l'intelligence artificielle (cf. Annexe V).
- iii. La phase finale de l'étude présente une illustration numérique et une analyse de sensibilité exprimant l'utilité et l'efficacité de l'approche proposée. In fine, il est déterminé le taux de production qui minimise les coûts escomptés d'inventaire et de pénurie dans un horizon de planification infinie. Cette approche permet de définir les processus de décision optimaux à moindre coût et réalistes d'intégration du C/D dans un FMS tout en prenant en compte l'influence de l'EH à la politique de commande de la production et de la maintenance.

Par ailleurs, un certain nombre d'hypothèses ont été fixées pour aboutir à l'objectif final. Celles-ci sont énumérées ci-après:

- Le FMS est sujet à des défaillances (pannes et erreurs humaines) et réparations stochastiques.
- Le FMS est modélisé selon une chaîne de Markov homogène (le taux de transition d'un état A à un état B est connu et constant).
- Le FMS est capable de produire qu'un seul type de demande à la fois.
- Le temps de mise en course (setup) est négligeable par rapport au temps de production d'un produit et au temps d'inter-arrivées des demandes (les demandes des clients sont stochastiques et arrivent selon une loi exponentielle).
- Le coût de mise-en-course est négligeable par rapport aux autres coûts (inventaire, pénurie, maintenance).
- Le coût unitaire de mise en inventaire des produits finis est connu.
- Le coût de maintenance de la machine lors de l'arrivée d'une défaillance est connu (les pannes et les temps de réparation sont également aléatoires et suivent une loi exponentielle).
- Le coût unitaire de pénurie de produit finis est aussi connu,
- Le coût unitaire de pénurie est supérieur au coût unitaire de mise en inventaire.
- La demande des clients est constante, mais l'arrivée d'une demande est aléatoire (les commandes des clients sont stochastiques et arrivent selon une loi exponentielle).
- La capacité théorique de la machine est connue.

2.4 Question de recherche

Comment peut-on faciliter l'intégration du C/D à la planification de la production et de la maintenance des systèmes manufacturiers flexibles tout en prenant en compte l'impact de l'EH durant l'intervention d'un technicien de maintenance ?

Pour ce faire, il sera nécessaire de déterminer le taux de production optimal qui minimise les coûts d'inventaire et de pénurie dans un horizon de planification infinie tout en respectant les procédures de C/D selon l'article 188.2 du RSST. Il sera mis en exergue

l'influence de l'EH sur les processus décisionnels de la planification de la production et de la maintenance corrective.

2.5 Méthodologie de recherche

Le cas étudié est un système de production flexible (FMS) constitué d'une machine produisant deux types de produits communément appelé M1P2. L'opérateur de maintenance intervient immédiatement sur la machine lors de l'arrivée d'une défaillance. Les pannes et les réparations sont stochastiques. De même, le processus de C/D et de maintenance corrective est fastidieux et sujet à l'aléa de l'EH. La cartographie de la méthodologie de recherche est fournie à la figure 2 2 ci-après.

Considérant la complexité de l'approche analytique des équations différentielles de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB), une démarche séquentielle de résolution intégrant une approche basée sur la combinaison d'une théorie de commande optimale stochastique et des méthodes de simulation et expérimentales sont utilisées.

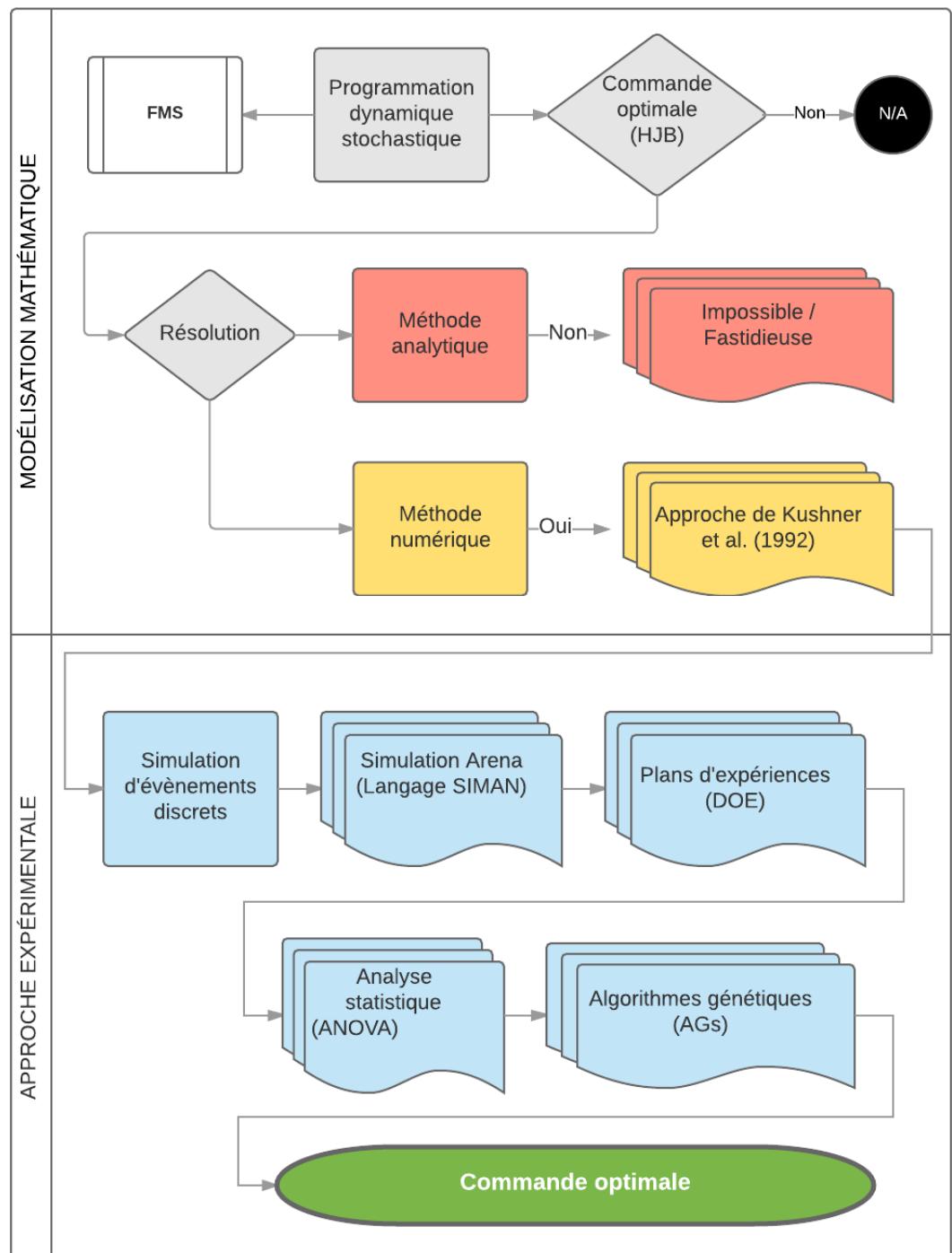


Figure 2.2 Cartographie de la méthodologie de recherche

Une politique de commande optimale de la planification stratégique et opérationnelle de la production et de la maintenance est suggérée par le biais d'une approche analytique combinée avec des méthodes numériques et expérimentales basées sur la simulation, les plans d'expériences, des outils statistiques, ainsi que les algorithmes génétiques.

Par ailleurs, pour exprimer l'efficacité et l'efficience de l'approche proposée, un exemple numérique et une analyse de sensibilité des coûts d'inventaire, de pénurie et de maintenance est réalisée pour confirmer la validité de l'évolution de chacun des paramètres traités.

In fine, il sera déterminé le taux de production optimal au regard des coûts escomptés d'inventaire, de pénurie et de maintenance dans un horizon de planification infinie. Cette approche permet de définir, à moindre coût et réalistes, la planification et la mise en production dans un FMS tout en prenant en compte la planification stratégique et les enjeux opérationnels. Ainsi, il sera défini un processus de décision optimal à moindre coût et réalistes d'intégration du C/D et la prise en compte de l'EH à la politique de commande de la production et de la maintenance dans FMS.

2.6 Contribution et retombées scientifique

Cette étude vise le développement d'une politique de commande de la production qui tient compte de l'impact de l'erreur humaine (EH) sur la planification de la production et de la maintenance en intégrant le C/D. Un formalisme analytique a été combiné avec une approche numérique afin de résoudre les équations de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) dans un FMS constitué d'une machine fabriquant deux types de produits différents. Les résultats suggèrent une politique de commande optimale de production à seuil critique basée sur les niveaux d'inventaire (Hedging-Point Policy (HPP)) afin de maintenir un niveau d'inventaire faisant face à la demande pendant les temps d'arrêt de la machine. La machine fonctionne à sa puissance maximale lorsque le niveau diminue (ou descend en dessous) du seuil (HPP) de l'un ou l'autre produit. La politique de commande optimale de production à seuil (HPP) a été décrite en détails ailleurs (Kenné et al., 1997; Hu et al., 1994). Afin d'obtenir un modèle plus réaliste dans un contexte de production flexible, le processeur SIMAN et le langage de simulation

Aréna ont été combinés avec les plans d'expériences (design of experiment (DOE)) et l'algorithme génétique de la boite à outils (Optimtool) de Matlab pour la réalisation de la simulation discrète. Cela a permis de disposer d'une politique de commande d'optimisation des coûts. Une analyse de sensibilité a ensuite été effectuée afin de vérifier l'utilité et l'efficacité ainsi que l'efficience de la politique de commande optimale du FMS dans un horizon de production infini. Il a ainsi été démontré qu'il est possible d'intégrer la maintenance corrective et C/D dans un FMS tout en optimisant les coûts totaux de gestion du modèle d'affaires, c'est-à-dire les coûts de production et de maintenance corrective intégrant le C/D. Cette politique de commande optimale de la production permet de prendre en compte l'influence de l'EH durant la phase d'intégration des procédures de C/D selon l'article 188.2 du CNESST et l'exécution de la maintenance corrective. La politique de commande optimale de commande de la production obtenue constitue une extension de la structure de la politique de production à seuil critique basée sur les niveaux d'inventaire (HPP). Les conclusions de l'étude permettent aux acteurs des systèmes manufacturiers d'être plus avertis de l'influence de l'EH dans un FMS. Le modèle ainsi développé permet de commander non seulement l'intégration du C/D à la planification de la production et de la maintenance, mais aussi l'influence de l'EH aux enjeux opérationnels dans un FMS. Les résultats ainsi obtenus constituent un ajout au corpus des connaissances au sujet de la commande optimale en environnement de production flexible et viennent ajouter une contribution aux modèles disponibles à la littérature scientifique. La principale contribution est l'introduction d'une nouvelle approche d'intégration du C/D aux politiques de commande de la production et de la maintenance tout en mettant l'emphase sur l'influence de l'EH sur les enjeux opérationnels. En effet, l'originalité de cette approche réside en la combinaison de la simulation d'événements discrets avec un algorithme génétique et les plans d'expériences afin d'aboutir à l'optimisation des seuils critiques issus de la structure de production HPP. L'étude ainsi développée montre clairement l'impact de l'EH dans un système de production flexible en termes de coût et de risque pour la santé et sécurité au travail lorsque la production et la maintenance corrective sont planifiées conjointement. L'EH lors des activités de maintenance peut compromettre certainement la sécurité des techniciens de maintenance et augmenter les coûts totaux de production. Un problème mineur dans un FMS peut conduire à des dégâts majeurs ainsi que d'énormes pertes économiques.

Par ailleurs, tel qu'indiqué dans des études antérieures (Abdoulaye et al., 2016; Emami-Mehrgani et al., 2015), le C/D doit être une partie intégrante de la planification de la production et de la maintenance plutôt que de le considérer comme un ajout à la maintenance. Cela permettrait aux gestionnaires des opérations de planifier leurs activités respectives de sorte que les travailleurs n'aient aucune excuse légitime pour ne pas se conformer aux procédures à l'article 188.2 du règlement en santé et sécurité au travail (CNESST, RSST 2017). Bien que le C/D augmente le coût d'intervention de l'opérateur de maintenance sur la machine, les gestionnaires devraient être en mesure de l'apprécier comme un investissement dans la réduction du risque à la source (accidents) plutôt que comme une activité sans valeur ajoutée. En tout état de cause, le C/D est maintenant une obligation légale en vertu de l'article 188.2 du RSST (CNESST). Par ailleurs, l'EH pendant les activités de maintenance doit être considérée pour maintenir la productivité et la SST dans un FMS. L'EH augmente les temps d'arrêt et d'intervention ; donc les coûts ainsi que les risques d'accidents (Emami-Mehrgani et al., 2014).

Cependant, le modèle proposé repose sur certaines hypothèses. Il pourrait être amélioré afin de vérifier sa faisabilité lorsqu'il est étendu à des systèmes plus complexes et réalistes. Par exemple, un système comprenant deux machines ou plus et répondant aux demandes de plusieurs clients pourra être particulièrement étudié. En outre, la probabilité d'EH est une contrainte sur l'efficacité et l'efficience du modèle. De ce fait, les facteurs humains, en termes d'erreur et de fiabilité humaine doivent également être adressés correctement dans le cadre des systèmes plus complexes. L'impact de certains facteurs tels que la fatigue et le stress doit également être étudiés, de même que les implications des capacités cognitives limitées des humains à effectuer des tâches répétitives sans erreur. En effet, la plupart des défaillances de machines résultent de la mauvaise utilisation par l'opérateur et de l'état de la machine (l'âge) (Njike et al. (2011)).

La contribution de ce mémoire a également été matérialisée par la soumission d'un article de revue avec comité de pairs (RAC), la participation à une conférence dans un congrès international avec comité de pairs (CAC) et des activités de vulgarisation par le biais d'une affiche dans un congrès national sans comité de pairs et la participation au concours de « Ma thèse en 180 secondes ».

CHAPITRE 3

HUMAN ERROR, OPTIMAL PRODUCTION CONTROL POLICIES, CORRECTIVE MAINTENANCE WITH LOCKOUT/TAGOUT AND RANDOM DEMAND

Issa Diop ^a, Sylvie Nadeau ^b, Behnam Emami-Mehrgani ^c

^a Automated production engineering department, École de technologie supérieure, Montreal (QC) Canada H3C 1K3

^b Mechanical engineering department, École de technologie supérieure, Montreal (QC) Canada H3C 1K3

^c Groupe Synetik, Joliette (QC) J6E 3P1

Article soumis pour publication à la revue International Journal Of Production Research, IJPR, le 02 octobre 2017.

3.1 Abstract

Lockout/tagout (LOTO) is practised in manufacturing facilities to ensure safety during machinery maintenance procedures. In flexible manufacturing systems, human error (HE) is a major source of accidents and process deviations. Special measures are needed to minimize occupational risk and increase operational efficiency. In this article, we study a production planning problem involving a failure-prone production system meeting two types of demand and we discuss the associated decision-making process. The aim is to develop an optimal, robust and flexible control strategy that facilitates the integration of LOTO into corrective maintenance (CM) and ultimately into production. The influence of HE on flexible manufacturing systems (FMS) is viewed in terms of production and maintenance planning. The frequency of machine repair depends largely on HE. The intrinsic costs of shortage, inventory and CM are optimised over an unbounded planning horizon. Analytical formalism is combined with discrete events simulation, as well as design of experiments (DOE) and a genetic algorithm (GAs) to identify the optimal planning of production and CM with

mandatory LOTO. An illustration and sensitivity analysis are proposed to express, in quantitative terms, the usefulness and efficiency of the proposed approach.

Keywords: Optimal production control, corrective maintenance, lockout/tagout, human error.

3.2 Introduction

Quebec regulation on occupational health and safety (RSST) states that maintenance technicians who service hazardous equipment must apply lockout/tagout (LOTO) procedures (cf. *art. 188.2*). This regulation sets forth safety precautions to follow before undertaking any maintenance activity, repair or unlocking operation involving such equipment. LOTO is defined as a preventive measure taken to avoid injuries caused by premature release of energy during installation, maintenance or repair of industrial machinery, equipment or process devices (D. 1187-2015, a. 3.). In other words, LOTO is a set of procedures and good practices intended to control all of the energy sources of a system during servicing. Only the person authorized to carry out the LOTO procedure on the system is authorized to remove the lock or tag. Inappropriate maintenance activities due to HE increase the total duration and intrinsic cost of servicing (Dhillon, 2014a) and possibly the occupational health and safety risk.

According to Quebec standards, equity, health and work safety commission (CNESST) statistics for the year 2014, a work-related accident costs the life of a worker in Quebec approximately every six days (63 for the year). More than 80,000 accidents occur each year in the workplace. Machinery is involved in 10–15% of these. The injuries caused by machines are often severe, causing on average 20 fatalities, 295 amputations and 1,125 permanent scars per year. The risk of accident generally increases throughout the machine lifecycle. Particular attention must be paid to risks associated with the production, adjustment and maintenance phases (Poyard, 2016).

In September of 2015, the CNESST endorsed a draft proposing stricter occupational health and safety guidelines. The RSST includes now more specific regulations with regard to LOTO and hazardous energy control methods. These new regulations will spell out the duties

of each actor and encourage workers and employers to stay mindful of health and safety in the workplace. Nevertheless, the use of LOTO in procedural form alone is an imperfect solution to the problem of accidents involving machinery (Matsuoka et al., 2001). A mechanism is needed for monitoring and follow-up of LOTO procedures. Such a mechanism has been proposed (Burlet-Vienney et al., 2014).

3.3 Literature review

Maintenance technicians frequently need to enter hazardous spaces near or even within machinery or processing equipment since these devices break down repeatedly during their lifespan. In recent decades, hundreds of workers have been victims of accidents or incidents while performing routine maintenance on machinery or repairing damaged equipment in manufacturing facilities (Bulzacchelli et al., 2008; Bulzacchelli et al., 2007). The high level of risk inherent in machine maintenance has been confirmed repeatedly (Grusenmeyer, 2000; 2005; Lind, 2008; 2009; Väyrynen, 1984). The Quebec health and safety work act (LSST (*art. 51*)) stipulates that among their obligations, employers are required (1) to ensure that employee working conditions are safe and not unhealthy, (2) to control health and safety risks associated with tasks, (3) to inform workers about these risks, and (4) to train workers to detect and avoid hazards. Furthermore, article 59 provides guidance and recommendations for eliminating risks at the source. On the other hand, workers must help to ensure occupational health and safety (*art. 49*). One of their principal duties in this respect is to comply with LOTO policies as set forth in occupational health and safety legislation. This is one way to avoid risks associated with equipment maintenance and repair (Matsuoka et al., 2001). Researchers point out that the legislation in its current form is of limited effectiveness, its principal shortcomings including inadequate provisions regarding training, inappropriate use of tags or locks, process design weaknesses and others (Chinniah et al., 2013). In addition, many managers continue to regard LOTO as a time-consuming unproductive activity (Emami-Mehrgani et al., 2011).

Recent studies show the numerous conditions that must be satisfied simultaneously for compliance with the recommendations of RSST regarding access to hazardous areas around machinery (Chinniah et al., 2015). This includes alternative access to these areas when LOTO

cannot be carried out, for example detection and diagnosis of malfunctions requiring observation of the machine in operation. On the other hand, LOTO is not mandatory when the machine ON/OFF switch is close to and under the exclusive control of the operator. A machine must have only one energy source, and any residual energy remaining after switching the machine off represents a hazard and must be released safely before any examination. It is the duty of the employer to specify these procedures and to ensure compliance with them in accordance with the RSST, in other words to inform and properly educate all workers having access to the hazardous areas with regard to the applicable preventive measures (LSST (1979, c. 63, a. 50)). These measures must indicate procedures to follow when shifts change, when LOTO is forgotten or when more than one employer (e.g. subcontractors) will be present. The LOTO program must guide managers as well as workers, and should cover (Burlet-Vienney et al., 2009) (1) what hazardous energy is, (2) what types of tools or devices are required for isolating or de-energizing hazardous devices, (3) who is responsible for the tasks, (4) the steps for turning on and off and de-energizing machinery, (5) what steps for locking/tagging the system to put in writing, (6) what training is required, (7) what aspects must be covered by audits. The implementation criteria of these occupational health and safety regulations are described in detail in Canadian standard CSA-Z460 2013 - Control of hazardous energy - Lockout and other methods. However, it should be noted that a LOTO system is not an end in itself and must not be viewed as just a padlock (Mario, 2012b). The system must be monitored after its implementation. The documentation and bill of material coding are as crucial as the LOTO mechanism. The documentation must contain the LOTO files and procedures. Software is needed for the audit management, as well as training and reporting. Whereas the success of a LOTO program lies in the quality of daily monitoring (i.e. of reports and audits) (Mario, 2012a).

Venkatraman (2012) has pondered the connection between safety and maintenance effectiveness. These questions have been of interest to manufacturers for decades, and have led to significant progress in understanding of workplace safety (Ben-Daya et al., 2009a). The CSA Z1000 standard indicates that a LOTO system must be integrated into occupational health and safety policies.

We have noted the existence of three categories of study in this subject area: (1) optimising production planning and maintenance strategies (Assid et al., 2015b; Ben-Salem et al., 2014; Ouaret et al., 2015; Rivera-Gómez et al., 2016), (2) taking LOTO into account in maintenance activities (Badiane et al., 2016; Charlot et al., 2007; Emami-Mehrgani et al., 2012; Emami-Mehrgani et al., 2011) and (3) taking human factors and human error (HE) into account (Emami-Mehrgani et al., 2014; Emami-Mehrgani et al., 2015). The number of studies in this third category is small.

In production scheduling, there is considerable leeway for varying the frequency of machine maintenance. A planner might prefer to stop a machine when its performance has dropped below some threshold or run it to breakdown. In the latter case, the machine may be repaired immediately, or repair may be deferred. Some authors have suggested that manufacturing system performance improves when maintenance task and production activities are scheduled at the same time (Lee et al., 2001). A policy based on a stochastic approach to planning production and preventive maintenance activities in an FMS had been developed more than a decade earlier (Boukas et al., 1990). This strategy incorporated periodic maintenance with the increase in the likelihood of failure depending on machine age. Not long after, the optimality conditions of the hedging point policy were studied (Hu et al., 1994). It was thus shown that this policy is optimal when the failure rate does not depend on the production rate; the linearity of the breakdown rate function is sufficient to show that a hedging point policy is optimal. An extension of these models was then proposed, in which maintenance activity scheduling is based on inventory level (Kenné et al., 1997). This was then expanded to production systems comprising several machines producing several parts (Kenné et al., 2003; Kenné et al., 2004a). The gains achieved under this policy are measurable in terms of downtime. The problem of planning production and preventive maintenance for a manufacturing operation involving several machines was then treated using analytical formalism combined with simulation and response surface methodology to develop an approximation of optimal control policies (Gharbi et al., 2005). These authors provide an illustration and sensitivity analysis to quantify production and preventive maintenance rates that minimize the production costs and the frequency of maintenance and repair.

Production and maintenance planning have been optimised in conjunction with LOTO policies based on consideration of two types of corrective maintenance (CM): (1) routine failure associated with machine age, in which the mean time between failures decreases with machine deterioration and no LOTO procedure is required, and (2) major failure, with a constant mean time between failures and LOTO is required for repair (Charlot et al., 2007). In view of the effectiveness of such planning, the study was expanded to include the elimination of possibilities of circumventing LOTO (Badiane et al., 2016). Considering lockout as a separate and integral machine state while performing maintenance activities is suggested as means of achieving this, and optimal planning for modern manufacturing systems subject to stochastic breakdowns is proposed. This raised the question of the existence of an optimal cost, taking into account reductions in the risk of accidents. Based on numerical illustration and sensitivity analysis, it has been shown that controlling LOTO rather than setting it at a fixed frequency offers more optimal planning (Badiane et al., 2016). However, the complexity of the problem increases rapidly with the number of machines.

Nowadays, human factors, particularly HE and human reliability, are receiving much attention. In manufacturing settings, HE occurs at a significant rate during equipment maintenance activities (Dhillon et al., 2006) and is involved in most of the accidents or incidents that occur during maintenance activities in conjunction with LOTO. Although contributing to more than 25% of the breakdowns that process plant machines undergo during their lifespan, human factors are still not given sufficient consideration (Venkatraman, 2012). HE or control failures are often behind undesirable events that happen due to unforeseen releases of hazardous energy (Kelley, 2001). For example, most of the deviations ($> 80\%$) in quality and productivity in pharmaceutical production appear to be due to HE (Collazo, 2010). Despite technological control of risks inherent in equipment, the probability of HE in machine maintenance remains high, as does production equipment downtime (Whittingham, 2004). The findings of more recent studies on the role of HE in risk analysis have been applied to pre-maintenance and post-maintenance procedures (Noroozi et al., 2013). These authors later estimated HE probabilities for several possible failure scenarios associated with the maintenance procedures for a pump (Noroozi et al., 2014). Using HEART (human error assessment and reduction technique, developed in 1988 by J.C. Williams to evaluate the

probability of HE occurring while performing a particular task, a reliable technique used in safety analyses), they calculated acceptable levels of risk (based on the level of error recovery) beyond which actions should be taken through risk management strategies to raise the level of safety of the maintenance procedure. Other studies show that HE lengthens repair time and increases production costs, inventory costs and shortage as well as the risk of workplace accidents (Emami-Mehrgani et al., 2014). An optimal policy has been defined to minimize production cost, emphasizing the impact of human on inventory shortage and system capacity (Tchiehe et al., 2017). The authors examined occupational health and safety risk acceptability from eight perspectives: economic, personal, cultural, political, social, ethical, psychological, and risk characteristics. These parameters influence the acceptability mechanism and its pervasiveness in workplace safety.

Two approaches appear predominant in system failure research (Reason, 2000). The first focuses on humans (inattention, forgetfulness and so on) whereas the second focuses on the system (work conditions). Accidents happening to individuals are more recurrent and catastrophic compared to organizational accidents and have adverse side effects in terms of harm, loss of quality of life or of life itself (Reason, 2016). Studies show the typical limitations on human perception, cognition and physical performance (Harris et al., 2016). Factors such as fatigue and stress influence human performance to the point that no amount of effort can eliminate HE (Givi et al., 2015; Grosse et al., 2015; Jaber et al., 2013; Neumann et al., 2010). To deal adequately with this reality, Harris et al. (2016) recommend keeping two specific goals in mind: (1) reducing HE by implementing a systematic approach and a design methodology focused on human operators, (2) quick identification and correction of sources of malfunction, on the assumption that human error will occur inevitably.

Many authors have militated in favour of flexible manufacturing systems and emphasized their importance in productivity and quality in many manufacturing industries (Chan et al., 2007; 2008). Indeed, human intervention is less important in such systems compared to those based on conventional material handling. In the latter, the human operator is constantly involved in the transportation of materials between sites, whereas in a flexible manufacturing system, this function is supported fully, for example by automated guided vehicles and material handling systems. This subject has been reviewed (Raouf et al., 1995).

Human intervention is nevertheless required in flexible systems during start-up of operations, as well as in programming, repair activities or loading and unloading of materials and parts. There is a need to take into consideration the system/human mutual impact in terms of HE during these phases.

The purpose of this paper is to develop a production and CM plan with LOTO to improve the safety of a flexible manufacturing system consisting of a failure-prone machine meeting two types of demand. The main contribution of this study is a control strategy that facilitates the integration of LOTO into production and considers the impact of HE during maintenance. Optimal costs of shortage, inventory build-up and CM are identified over an unbounded planning horizon.

Notations and assumptions are presented in section 3. The FMS under study is presented in section 4. A numerical illustration is developed in section 5. A discussion is provided in section 6. Section 7 is devoted to the conclusion and proposal of future studies.

3.4 Notations and assumptions

3.4.1 Notations

The notations used in this study are as follows:

$x(\cdot)$	Inventory/shortage level	$J(\cdot)$	Total cost function
d_1	Product 1 demand rate	z_j	Optimal inventory level of product type j
d_2	Product 2 demand rate	c^+	Inventory cost
$u_1(\cdot)$	Production rate for demand 1	c^-	Shortage cost
$u_2(\cdot)$	Production rate for demand 2	c_r	CM cost
U_{\max}	Maximal production rate	c_{LOTO}	LOTO cost
$\alpha(\cdot)$	Time continuous and finite state Markov process	c^α	Operation cost under CM at state $\alpha(\cdot)$
$\Theta(\cdot)$	System state	$q_{\alpha\beta}$	Rate of transition from state α to β
$\xi(\cdot)$	Stochastic process of machine states	r_{21}	CM rate without human error (CM - WOHE) with demand d_1
Ω	Set of system modes	r_{31}	CM rate with human error (CM - WHE) with demand d_1
$B(\cdot)$	Set of admissible production capacities for each	r_{54}	CM rate without human error (CM - WOHE) with demand d_2

$Q(\cdot)$	Transition matrix	r_{64}	CM rate with human error (CM - WHE) with demand d_2
$\pi(\cdot)$	Probability limit	h_x	Increment of the variable x
ρ	Discount rate	$v_x(\cdot)$	Value function of inventory x
$g(\cdot)$	Instantaneous cost	$v^h(\cdot)$	Approximation of the value function for h_x increment

3.4.2 Assumptions

The following assumptions are considered:

- › CM is performed with LOTO;
- › CM may be completed with HE;
- › Repairing time with HE is longer than it is without HE;
- › CM activities restore the system performance to a new one (as good as new).

3.5 Problem statement

The subject of this paper is a decision-making problem in an FMS consisting of one failure-prone machine meeting two types of demand. Machine availability is enhanced through CM activities. The decision variables are the frequencies of machine repair with human error (WHE) or without human error (WOHE), which influence the system capacity and the inventory level. HE is considered as an inappropriate action that results in increased CM duration and costs (Dhillon, 2014b). We are investigating the impact of HE that occurs during CM activities in conjunction with LOTO. We determine an optimal total cost associated with shortage, inventory and CM over an unbound planning horizon. Analytical modeling and numerical resolution approaches were used with discrete events simulation. DOE and a GA were then used to define the optimal plan. Figure 3.1 summarizes the methodological approach.

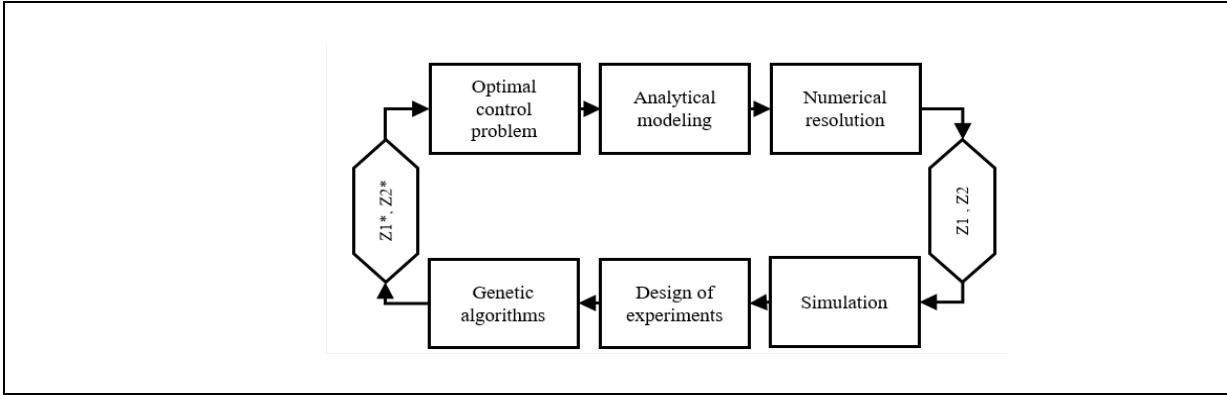


Figure 3.1 Methodological approach

Many researchers (Badiane et al., 2016; Charlot et al., 2007; Emami-Mehrgani et al., 2012; Emami-Mehrgani et al., 2011) use in their studies the same approach based on analytical modeling and numerical resolution. To achieve this, they used assumptions that do not take into account phenomena such as the impact of human factors. In response to this situation, a sequential optimization approach combining a numerical method, simulation, experimental designs, genetic algorithm is promising for dealing with optimal control problems. Moreover, Andradóttir (1998a) notes that, in practice, optimization approach by direct search methods has been limited when the system becomes more complex; where the need to use more flexible and robust methods with modeling tools less tedious. For example, GAs are simple and fast optimization methods for a global exploration and allows to obtain a solution in an interesting time.

Optimization based on simulation makes the resolution of optimal control problems simpler compared to conventional direct search techniques which are too demanding in computing time. Indeed, direct research requires many hypotheses for numerical resolution of control problems compared to simulation models (Boulet et al., 2005). In addition, simulation techniques provide a detailed description of the dynamic behavior of the manufacturing system (Hlioui et al., 2015). Azadivar et al. (1998) recommend simulation as an optimization approach for choosing maintenance strategies. Indeed, in their work, they noticed that the results from the simulation experiment indicate the same forms of response surfaces as those derived from direct search optimization methods. However, the problem of these classical methods (direct search) are not often easy to solve and often involve many assumptions, because the

performance of the system depends on the combination of quantitative variables and qualitative variables (choice of maintenance strategy). For more details on these aspects of performance, the reader is referred to Azadivar et al. (1998). A combined approach, which is based on a combination of analytical formalism, simulation modelling, design of experiments and a genetic algorithm presents a more realistic model for industries.

Treating this task as a stochastic dynamic programming problem, we developed a continuous-time Markov chain model integrating possibilities of HE during maintenance activities with mandatory LOTO by human operators over an unbounded planning horizon. Three variables characterise the system in any given state: the stock level $x(\cdot)$, the stochastic process of machine states $\xi(\cdot)$ and the demand type $d(\alpha) = (d_1, d_2)'$. Raw material is always available (Figure 3.2).

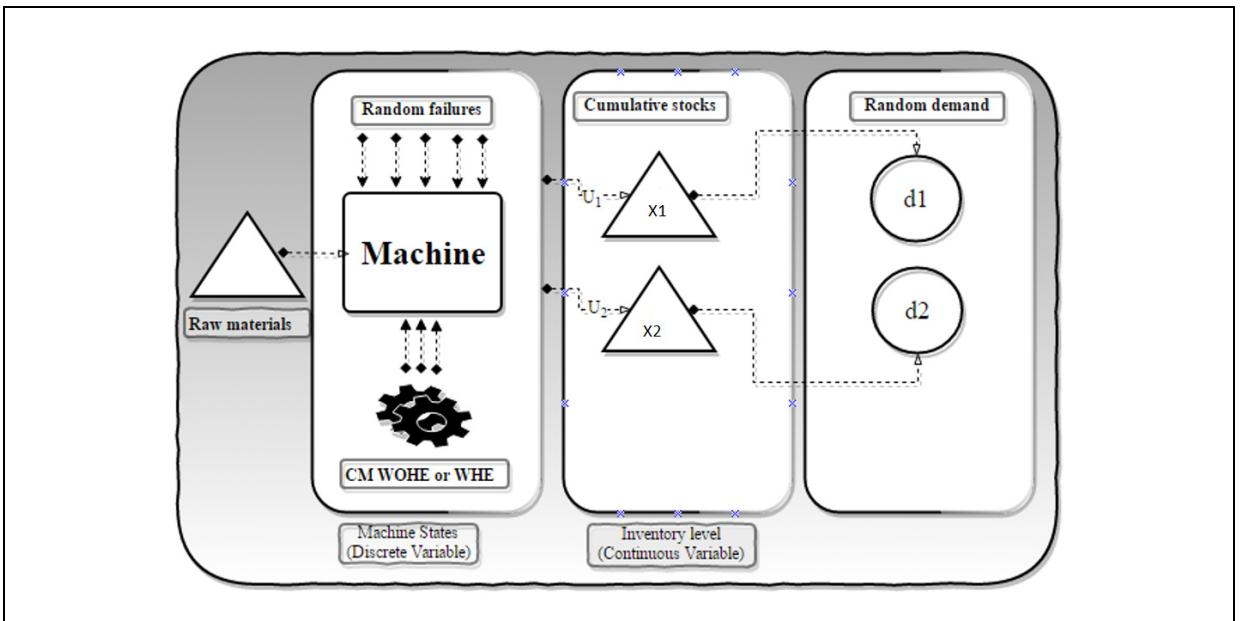


Figure 3.2 The flexible manufacturing system under study

The dynamics of such a system include continuous and discrete variables. The continuous variable $x(\cdot)$ represents the cumulative inventory/shortage vector, which can be positive (stock build-up) or negative (shortage). The dynamics of $x(\cdot)$ are presented by the differential equation below:

$$\frac{dx(\cdot)}{dt} = u(\cdot) - d(\alpha) \quad (3.1)$$

Where: $x(0) = x$ initial stock level); $u(\cdot) = (u_1, u_2)'$; $d(\alpha) = (d_1, d_2)'$;
 $\alpha(\cdot) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

The discrete variable $\xi(\cdot)$ defines machine status (six possible status):

$$\Omega \in \left\{ \begin{array}{l} \xi(t) = 1 : \text{The FMS is working on demand } d_1 \\ \xi(t) = 2 : \text{The FMS is shut down for CM without Human Error (WOHE) with demand } d_1 \\ \xi(t) = 3 : \text{The FMS is shut down for CM with Human Error (WHE) with demand } d_1 \\ \xi(t) = 4 : \text{The FMS is working on demand } d_2 \\ \xi(t) = 5 : \text{The FMS is shut down for CM without Human Error (WOHE) with demand } d_2 \\ \xi(t) = 6 : \text{The FMS is shut down for CM with Human Error (WHE) with demand } d_2 \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Its representation as a continuous-time Markov chain (CTMC) is shown in Figure 3.3:

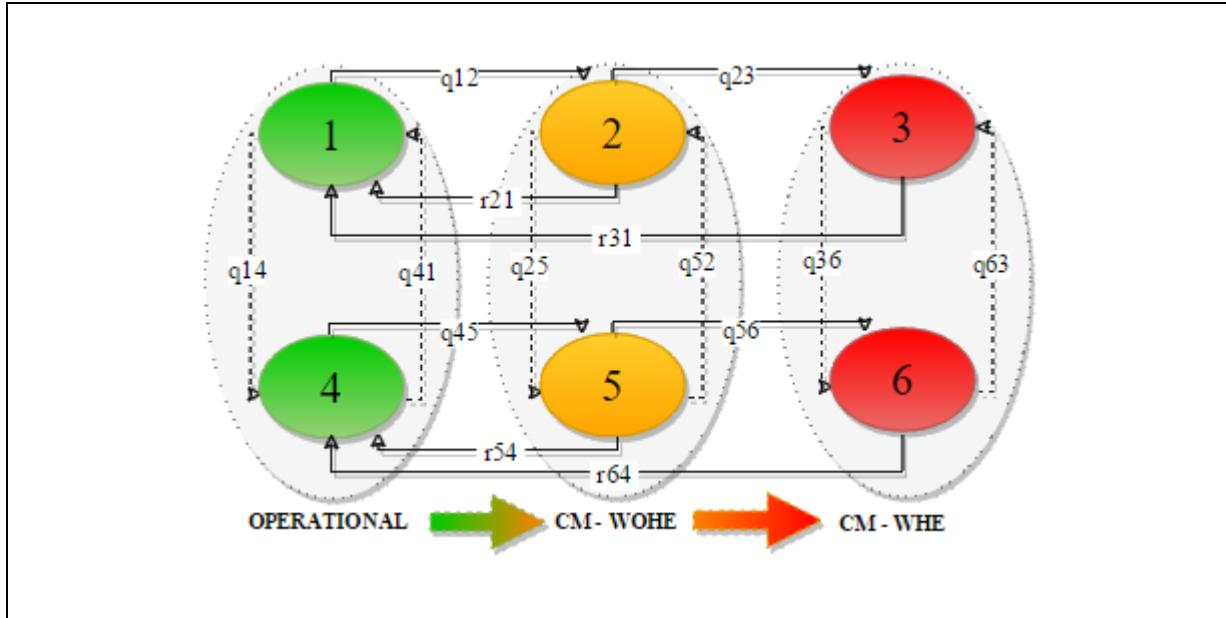


Figure 3.3 Transition diagram of machine states

The mathematical model of the continuous-time stochastic process takes values in the finite state space $\Omega(1, 2, 3, 4, 5, 6)$.

The transition probabilities from state $\alpha \in \Omega(1, 2, 3, 4, 5, 6)$ to state $\beta \in \Omega(1, 2, 3, 4, 5, 6)$ at time t are given by the following equations:

$$P(\xi(t + \delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha) = \begin{cases} q_{\alpha\beta} \delta t + o(\delta t) & \text{if } \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\beta} \delta t + o(\delta t) & \text{if } \alpha = \beta \end{cases} \quad (3.3)$$

The transition rate is given by the following equations:

$$q_{\alpha\beta} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} [P(\xi(t + \delta t) = \beta | \xi(t) = \alpha) / \delta t] \quad (3.4)$$

knowing that $\alpha \neq \beta$, $\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{o(\delta t)}{\delta t} \right) = 0 \quad \forall \alpha, \beta \in \Omega$

The transition rates matrix $Q(\cdot)$ of the continuous-time Markov process ($\xi(t)$) is defined such that it meets conditions (3.5) and (3.6) below:

$$Q = |q_{\alpha\beta}| \quad (3.5)$$

where $q_{\alpha\beta} \geq 0 \text{ if } \alpha \neq \beta$

$$q_{\alpha\alpha} = - \sum_{\beta \neq \alpha} q_{\alpha\beta} \quad (3.6)$$

where $\alpha, \beta \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

The transitions rates matrix $Q = |q_{\alpha\beta}|$ describes the stochastic process:

$$Q(\bullet) = \begin{vmatrix} -(q_{12} + q_{14}) & q_{12} & 0 & q_{14} & 0 & 0 \\ r_{21} & -(r_{21} + q_{23} + q_{25}) & q_{23} & 0 & q_{25} & 0 \\ r_{31} & 0 & -(r_{31} + q_{36}) & 0 & 0 & q_{36} \\ q_{41} & 0 & 0 & -(q_{41} + q_{45}) & q_{45} & 0 \\ 0 & q_{52} & 0 & r_{54} & -(q_{52} + r_{54} + q_{56}) & q_{56} \\ 0 & 0 & q_{63} & r_{64} & 0 & -(q_{63} + r_{64}) \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

The admissible production decisions set $B(\cdot)$ and control variables at state $\alpha \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ are defined as follows:

$$B(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} [u(\cdot), r_{21}, (\cdot), r_{31}, (\cdot), r_{54}, (\cdot), r_{64}, (\cdot)] \in \mathbb{I}^5 \\ 0 \leq \|u(\cdot)\|_\infty \leq u^{\max} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

The total cost function $J(\cdot)$ is given in Equation 3.9. The total cost function $J(\cdot)$ is convex and non-negative. Our goal is to control the production rate $u(\cdot)$ as demand varies, to minimize the total production cost.

$$J(\cdot) = E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} g(\cdot) dt \mid x(0) = x, \xi(0) = \alpha \right\} \quad (3.9)$$

$E\{\cdot\}$ is the mathematical expectation. $g(\cdot)$ is the instantaneous cost over an unbound planning horizon. The instantaneous cost is given as follows:

$$g(\cdot) = c_1^+ x_1^+ + c_1^- x_1^- + c_2^+ x_2^+ + c_2^- x_2^- + c^\alpha \quad (3.10)$$

Knowing that $x^+ = \max(0, x)$ $x^- = \max(-x, 0)$

$$c^\alpha = \left\{ \begin{array}{l} (c_r + c_{LOTO}) Ind(\alpha=2) + (c_r + c_{LOTO}) Ind(\alpha=5) \\ + \gamma(c_r + c_{LOTO}) Ind(\alpha=3) + \gamma(c_r + c_{LOTO}) Ind(\alpha=6) \end{array} \right\}$$

$$Ind\langle \Theta(\cdot) \rangle = \begin{cases} 1 & \text{if } \Theta(\cdot) \text{ is true} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

c^+ is the inventory cost per unit; x^+ is the inventory level; c^- is the shortage cost per unit; x^- is the shortage level; c^α is the operation cost during breakdown mode; γ is the cost index ($\gamma \neq 1$).

$$\Theta \text{ is the system state } (\alpha \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}), \text{ i.e. :} \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 2 \rightarrow Ind(\alpha=2) = 1 \rightarrow c^\alpha = c_r + c_{LOTO} \\ \alpha = 5 \rightarrow Ind(\alpha=5) = 1 \rightarrow c^\alpha = c_r + c_{LOTO} \\ \alpha = 3 \rightarrow Ind(\alpha=3) = 1 \rightarrow c^\alpha = \gamma(c_r + c_{LOTO}) \\ \alpha = 6 \rightarrow Ind(\alpha=6) = 1 \rightarrow c^\alpha = \gamma(c_r + c_{LOTO}) \end{array} \right\}$$

The mathematical value function $v_x^\vartheta(\cdot)$ is given in Eq. 3.11. The value function should satisfy a set of specific properties represented by the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) partial differential equations.

$$\vartheta(\cdot) = \min_{(u, r) \in \Gamma(\alpha)} J(x, \alpha, u, r) \quad \forall \alpha \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (3.11)$$

The HJB equations characterise the optimality conditions (cf. Appendix 3.11.1) for the FMS. The discount rate ρ appears in the HJB equation below:

$$\rho \vartheta(x, \alpha) = \min_{(u, r) \in \Gamma(\alpha)} \left\{ \begin{aligned} & \left[u(\alpha) - d(\alpha) \right] \frac{\partial}{\partial x} \vartheta(x, \alpha) \\ & + \left(g(x, \alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} q_{\alpha\beta} \vartheta(x, \beta) \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

$$\forall \alpha, \beta \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

where,

$$\begin{cases} u(\alpha) = \begin{cases} u_1 & \text{if } \alpha = 1 \\ u_2 & \text{if } \alpha = 4 \end{cases} \\ d(\alpha) = \begin{cases} d_1 & \text{if } \alpha = 1, 2, 3 \\ d_2 & \text{if } \alpha = 4, 5, 6 \end{cases} \end{cases}$$

The optimal control policy stands for minimizing the HJB partial differential equations over the set of admissible production capacity $\Gamma(\alpha)$ for each $\alpha(\cdot) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. A numerical method for stochastic control problems based on the Kushner and Dupuis method (Kushner et al., 1992) is used to solve the optimality conditions of the HJB equations. Let $h_j, j=1..n$, designate the increment of the finite difference interval of the variable x_j . Emami-

Mehrgani et al. (2011) provide a demonstration showing that the value function $\vartheta_i(\cdot)$ can be approximated by $\vartheta_i^h(\cdot)$ and the partial derivative of the value function $(\vartheta_i^h)_{x_j}(\cdot)$ for a small increment of h_x :

$$(\vartheta_i^h)_{x_j}(\cdot) = \begin{cases} \frac{1}{h_j} [\vartheta_i^h(x_1, \dots, x_j + h_j, \dots, x_n) - \vartheta_i^h(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)] & \text{if } u_j - d_j \geq 0 \\ \frac{1}{h_j} [\vartheta_i^h(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) - \vartheta_i^h(x_1, \dots, x_j - h_j, \dots, x_n)] & \text{if } u_j - d_j \leq 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

From Equation 3.14 we derive Equation 3.15:

$$[u(\alpha) - d(\alpha)] \vartheta(x, \alpha) = \begin{cases} \frac{|u(\alpha) - d(\alpha)|}{h_x} [\vartheta^h(x+h_x, \alpha) - \vartheta^h(x, \alpha)] & \text{if } u(\alpha) - d(\alpha) \geq 0 \\ \frac{|u(\alpha) - d(\alpha)|}{h_x} [\vartheta^h(x, \alpha) - \vartheta^h(x-h_x, \alpha)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.14)$$

The dynamic programming equation resulting from the HJB equations therefore can be presented as shown below (cf. Boukas et al. (1990) and Kenné et al. (2003)):

$$\vartheta^h(x, \alpha) = \min_{(u, r) \in \Gamma^h(\alpha)} \left\{ \left(\rho + |q_{\alpha\alpha}| + \frac{|u(\alpha) - d(\alpha)|}{h_x} \right)^{-1} \left\langle \begin{array}{l} \frac{|u(\alpha) - d(\alpha)|}{h_x} (\Xi) \\ + \begin{pmatrix} g(x, \alpha) \\ + Q \cdot \vartheta^h(x, \alpha) \end{pmatrix} \end{array} \right\rangle \right\}$$

with, $\Xi = \begin{pmatrix} \vartheta^h(x+h_x, \alpha) K^+ \\ + \vartheta^h(x-h_x, \alpha) K^- \end{pmatrix}$

$$\begin{cases} K^+ = \begin{cases} 1 & \text{if } [u(\alpha) - d(\alpha)] \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ K^- = \begin{cases} 1 & \text{if } [u(\alpha) - d(\alpha)] \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}$$

3.6 Numerical example

A numerical approach (Kushner et al., 1992) is used to solve the HJB equations for the system under study. It is described in details in appendix 3.11.2. The system is feasible if inequation 3.16 is satisfied:

$$\sum \pi_i(\alpha) U_i^{\max}(\alpha) \geq d(\alpha) \quad (3.16)$$

where,

$$\begin{cases} \pi_i \text{ is the probability limit at the state } \alpha, \\ U_i^{\max} : \text{the maximum production rate at state } \alpha \end{cases} \quad \left\{ \begin{bmatrix} \pi_1 U_1^{\max} \text{Ind}(\alpha=1) \\ + \pi_4 U_4^{\max} \text{Ind}(\alpha=4) \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} d_1 \text{Ind}(\alpha=1) \\ + d_2 \text{Ind}(\alpha=4) \end{bmatrix} \right\}$$

The feasibility inequation is structured so that it satisfies a set of specific properties called probability limits, the details of which are provided below:

$$\pi_i(\alpha)Q(\alpha)=0 \quad (3.17)$$

where, Q is the matrix of transition rates

$$\begin{cases} \pi_i(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} \pi_1 Ind(\alpha=1) + \pi_2 Ind(\alpha=2) + \pi_3 Ind(\alpha=3) \\ + \pi_4 Ind(\alpha=4) + \pi_5 Ind(\alpha=5) + \pi_6 Ind(\alpha=6) \end{array} \right\} \\ \sum_{i=1}^6 \pi_i(\alpha) = 1 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \left| \begin{matrix} \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \pi_5 & \pi_6 \end{matrix} \right| \\ \hline \begin{matrix} -(q_{12} + q_{14}) & q_{12} & 0 & q_{14} & 0 & 0 \\ r_{21} & -(r_{21} + q_{23} + q_{25}) & q_{23} & 0 & q_{25} & 0 \\ r_{31} & 0 & -(r_{31} + q_{36}) & 0 & 0 & q_{36} \\ q_{41} & 0 & 0 & -(q_{41} + q_{43}) & q_{43} & 0 \\ 0 & q_{52} & 0 & r_{54} & -(q_{52} + r_{54} + q_{56}) & q_{56} \\ 0 & 0 & q_{63} & r_{64} & 0 & -(q_{63} + r_{64}) \end{matrix} \right| \\ \hline \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 = 1 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

A policy improvement approach is used to determine an approximate solution. The search algorithm is presented below:

Step 1:

$$n=1$$

$$\delta \in \mathbb{I}^+$$

$$(\vartheta^h(\cdot))^n := 0$$

$$\forall \alpha(t) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

For a given production control policy $u_n(\cdot)$, where n is the number of iterations and h is a given finite difference interval,

let $\varpi_{u_n(\cdot)}$ and $\varpi_{u_n(\cdot)}^*$ be defined by $\varpi_{u_n(\cdot)}(\vartheta^h(\cdot)) = \vartheta^h(\cdot)$;

$$\varpi_{u_n(\cdot)}^*(\vartheta^h(\cdot)) = \min_{u_n(\cdot) \in \Gamma(\cdot)} \{\varpi_{u_n(\cdot)}(\vartheta^h(\cdot))\}$$

$\delta \in \mathbb{I}^+$ a given accuracy and $\vartheta^h(\cdot)$ the value function.

Step 2:

$$(\vartheta^h(\cdot))^{n-1} := (\vartheta^h(\cdot))^n$$

$$\forall \alpha(t) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Compute the new value of the value function at rank n and compare it with the old value in memory.

Step 3:

$$\boldsymbol{\varpi}_{u_{n(\cdot)}} (\vartheta^h(\cdot))^{n-1} := (\vartheta^h(\cdot))^n := \boldsymbol{\varpi}_{u_{n(\cdot)}}^* (\vartheta^h(\cdot))^{n-1} \quad \begin{array}{l} \text{Determine the production control} \\ \text{policy } u_n(\cdot) \end{array}$$

$$\forall \alpha(t) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Step 4

$$\mathcal{E}_{\inf} := \min_{\substack{\alpha \in M \\ z_i}} \left\{ (\vartheta^h(\cdot))^n - (\vartheta^h(\cdot))^{n-1} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{Compute the convergence tests and repeat the above} \\ \text{steps until a fixed point } \delta \text{ precision is found.} \end{array}$$

$$\mathcal{E}_{\sup} := \max_{\substack{\alpha \in M \\ z_i}} \left\{ (\vartheta^h(\cdot))^n - (\vartheta^h(\cdot))^{n-1} \right\}$$

$$\mathcal{E}_{\min} := \frac{\rho}{1-\rho} \mathcal{E}_{\inf} \quad \mathcal{E}_{\max} := \frac{\rho}{1-\rho} \mathcal{E}_{\sup}$$

$$if \quad |\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_{\min}| \leq \delta \rightarrow \begin{cases} Stop \\ u^*(\cdot) := u_n(\cdot) \\ u_1 := u_1^*, \quad u_2 := u_2^* \end{cases} \quad else, \rightarrow \begin{cases} (\vartheta^h(\cdot))^n := \boldsymbol{\varpi}_{u_{n(\cdot)}} (\vartheta^h(\cdot))^n \\ n := n + 1 \end{cases}$$

The system capacity is described as a Markov process with six states $\alpha(t) \in \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. The system is subject to random failure requiring repair. Machine availability is enhanced through CM activities. The frequencies of machine repair with or without HE influences system capacity and output, which determine the inventory levels and are the decision variables. Table 3.1 indicates the computational parameters used to run the numerical model.

Table 3.1 Values of the numerical parameters

Parameters	r_{21}	r_{31}	r_{54}	r_{64}	u_{\max}^j	c_{CM}	c_{LOTO}	c_j^+	c_j^-	ρ	d_1	d_2
Values	0.15	0.10	0.15	0.10	0.80	5.00	2.00	2.00	250	0.01	0.78	0.65

The following mesh grid is defined to perform the computational domain $D = \{x \in \mathbb{R} / -5 \leq x \leq 50\}$.

3.6.1 Production policy structure

The policy outcomes for the manufacturing control variables $u_i(\cdot)$ are shown in Figures 3.4 and 3.5.

Since HJB differential equations cannot be solved analytically, a finite-difference (discretization) method (Kushner et al., 1992) was used to obtain approximate numerical solutions. The resulting value functions are the solutions of the optimality conditions. They represent the cost of operating the production system. Figures 3.4 and 3.5 respectively show the outputs of products 1 and 2. These outcomes show that there is no manufacturing urgency for either product (inventory level is adequate). The control policy advises keeping the machine idle in an energy-conserving mode to save power. However, when the inventory drops below a specific threshold, the production control policy recommends setting the machine at its maximal output. Otherwise, its operation is adjusted to meet customer demand.

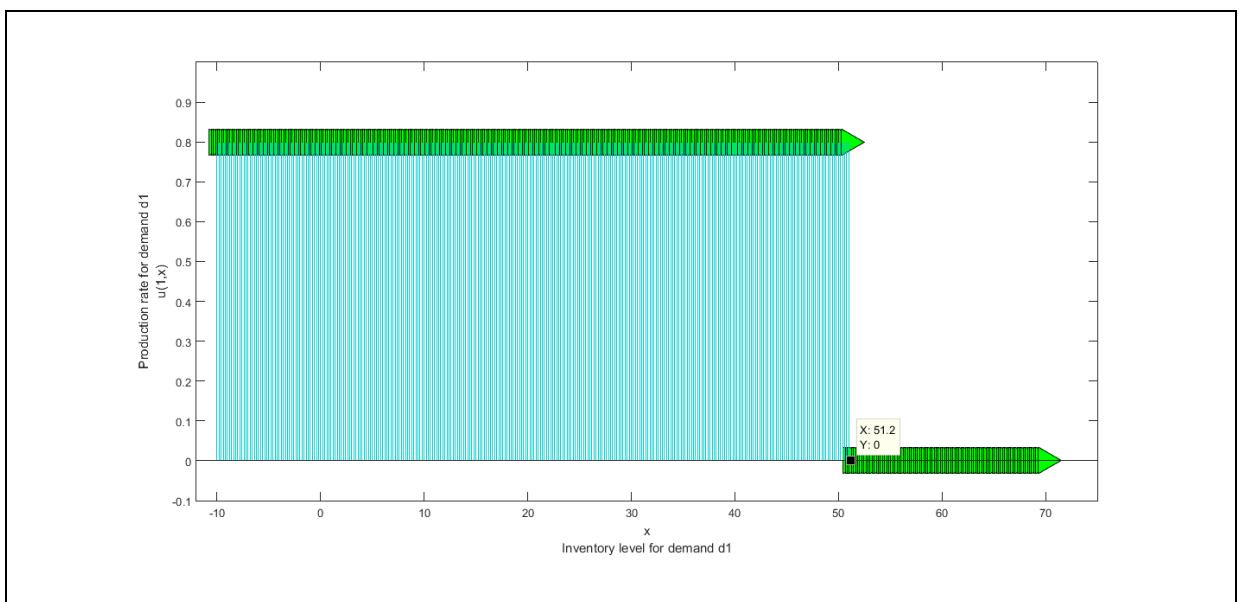


Figure 3.4 FMS production rate for product 1

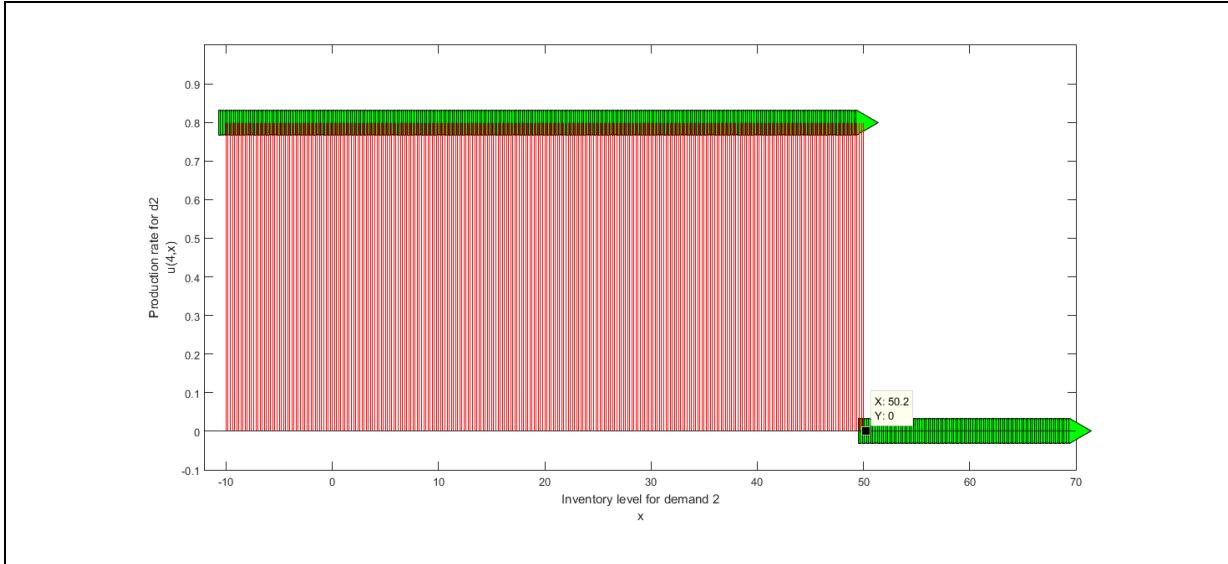


Figure 3.5 FMS production rate for product 2

Based on the results above, the policy illustrated can be summarized as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(x_1, x_2, 1) = \begin{cases} u_1^{\max} & \text{if } x_1 \geq z_1 \\ d_1 & \text{if } x_1 = z_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ u_2(x_1, x_2, 4) = \begin{cases} u_2^{\max} & \text{if } x_2 \geq z_2 \\ d_2 & \text{if } x_2 = z_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.19)$$

$$\text{where: } \begin{cases} z_1 = 51.2 \\ d_1 = .775 \end{cases} \quad \begin{cases} z_2 = 50.2 \\ d_2 = .65 \end{cases}$$

The above policy is based on the optimal rates of production $u_i(\cdot)$ that depend on Z_i . It is known as the hedging-point policy, as described previously (Akella et al., 1986; Kenné et al., 2003). The following sections describe optimisation of Z_i using a simulation approach and DOE combined with a GA.

3.6.2 Simulation model

For solving optimal control problems, DOE, statistical analysis, and response surface methodology (RSM) are often used, in combination with simulation, to model the behavior of the studied system and the interactions that have an impact on its performance (Assid et al., 2015a; 2015b; Hlioui et al., 2015). At the end, system performance is expressed through linear regression. In doing so, the optimum conditions of the system can be approximated by minimizing the cost function (regression equation) thus obtained. Discrete / continuous event simulation models are used to obtain the real-time production cost.

The simulation software (Arena) and SIMAN language were chosen to perform the discrete simulation. Figure 3.6 shows the simulation model. The control policy characterized above is used as the simulation model input.

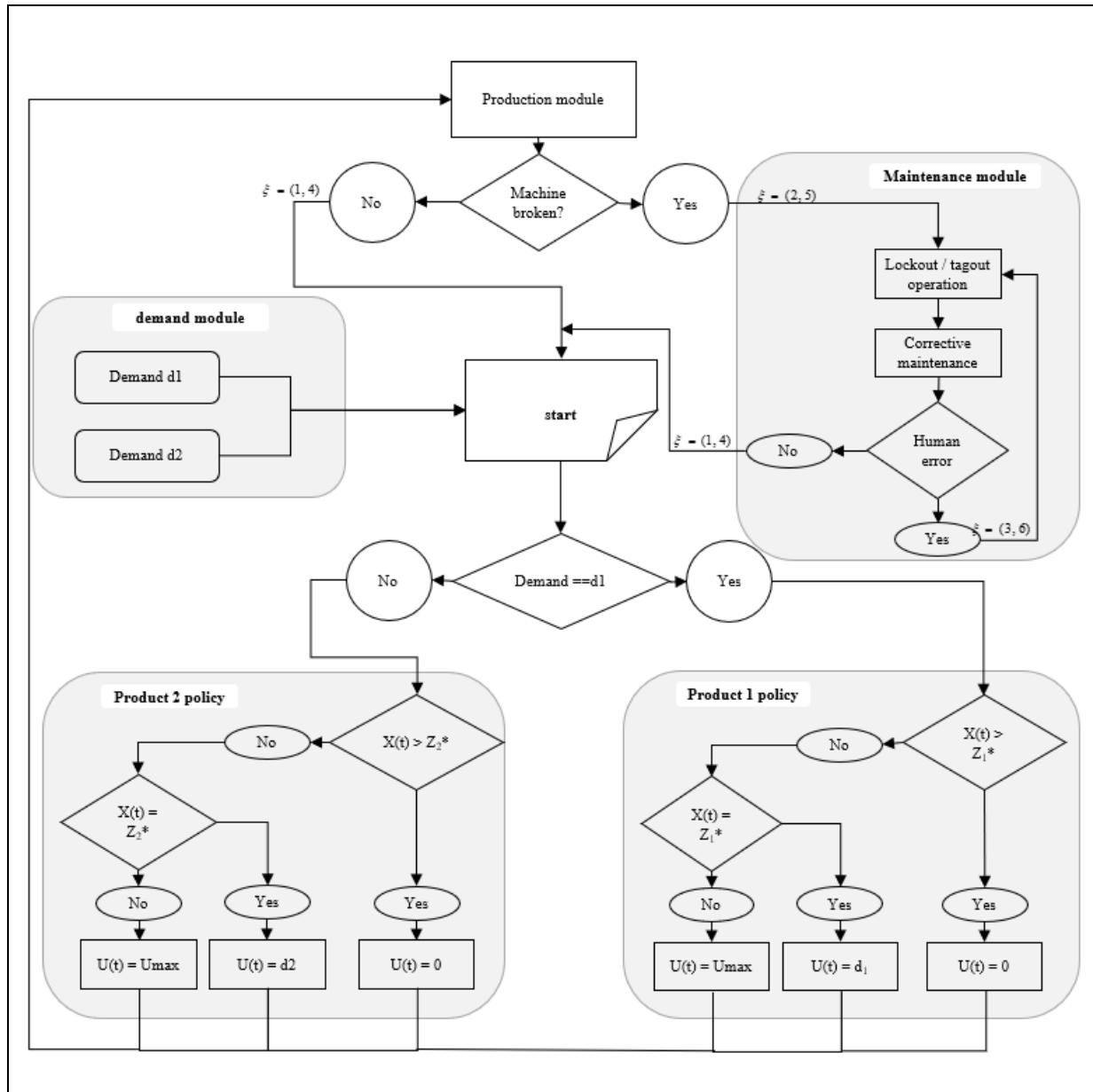


Figure 3.6 Simulation model

The inventory trajectories and the time elapsed in the system for products 1 and 2 are presented below in Figures 3.7 and 3.8:

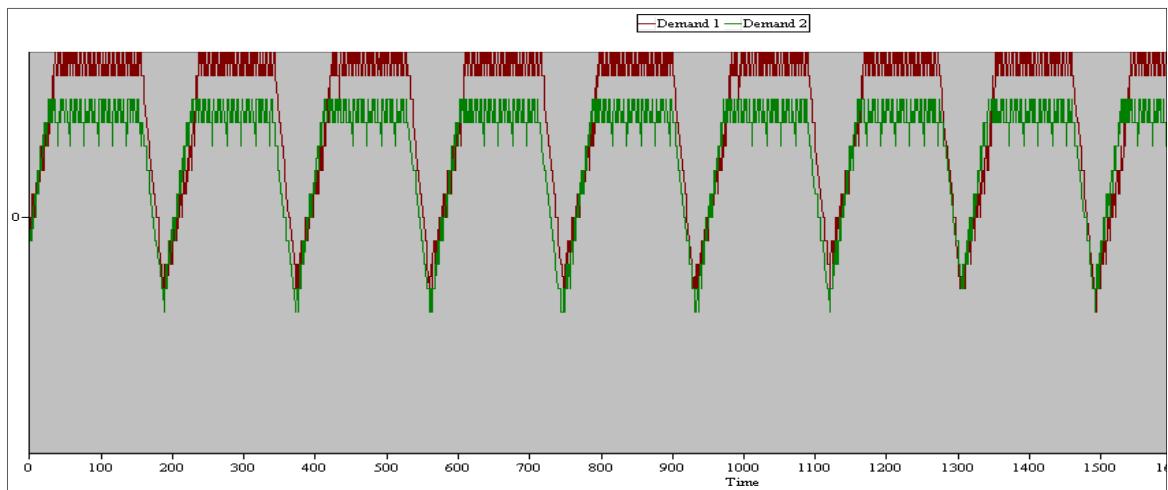


Figure 3.7 Average inventory level

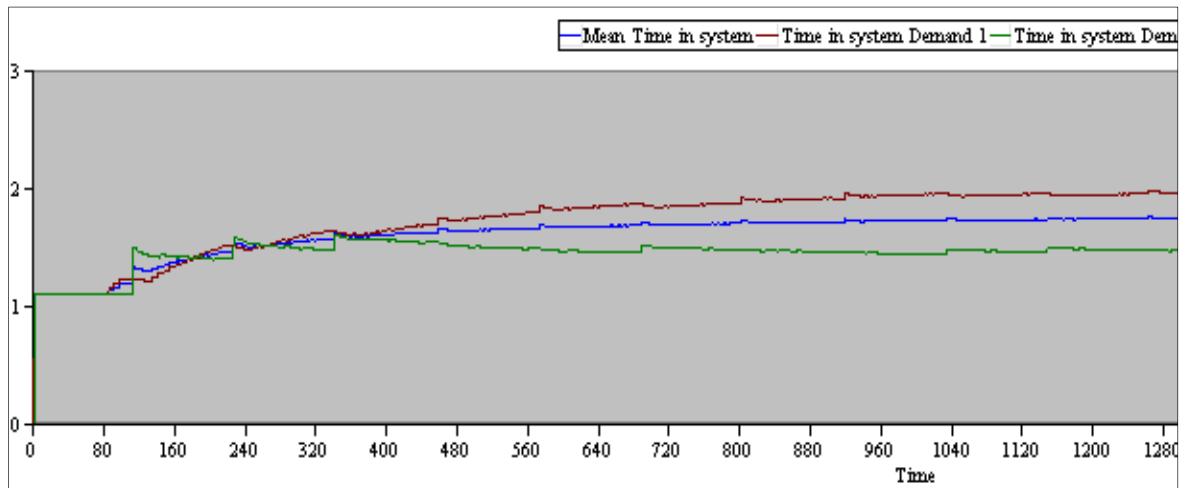


Figure 3.8 Average time in system

The graph of average inventory has a repeating trapezoidal profile because of the limit on the machine output. The stock level increases to this maximum, remains there and then decreases during corrective maintenance (CM) activities. When the machine breaks down, a stock shortage occurs (x drops below zero). After the machine is repaired, the stock begins to increase again and the cycle repeats. This strategy recommends building up inventory while the machine is available at its full capacity to meet demand while production capacity is nil due to CM activities with LOTO. However, this requires accelerating production or paying the workers for overtime, which carry a risk of HE and accidents. These observations are predictable and reflect reality. The curves of the time spent in the system show that the products are produced at the same pace. We note an initial phase where the time varies considerably, representing the transitional regime, and then varies very little around an average value representing the steady state. The difference in values comes from the fact that each part type has its own distinctive processing time.

3.6.3 Design of experiment and genetic algorithm methodologies

The numerical approach enabled us to solve the HJB equations and thereby obtain a first draft of the optimal production control policy, which is a threshold policy (HPP). The simulation software (Arena) and SIMAN language were then used to perform the discrete event simulation.

Simulation, on the other hand, as a decision support tool alone, is not able to directly perform the solving calculations of production system control problems (Hajji, 2004). However, simulation helps to facilitate the analysis, interpretation and understanding of the behavior of the production system. So, it is necessary to combine this approach with other optimization techniques, in this case meta-heuristics and evolutionary optimization, for example the genetic algorithms. For more details on the simulation-based optimization approach, the reader can refer to the work of Kenné et al. (2001; 2004b); Azadivar et al. (1999); Azadivar et al. (1998) and their bibliographic references.

In the same vein, Bowden et al. (1995) used an approach combining GA and simulation to define optimum conditions in a manufacturing environment. Moreover, Legault (1995)

indicates that exact resolution approaches do not always provide an optimal solution. The advantage of heuristic resolution approaches, including GA, lies in their ability to provide an acceptable solution in a record time of non-prohibitive calculation. It is worth mentioning that the solution obtained with a heuristic approach is not necessarily the optimal value of the problem to be solved. Nevertheless, the heuristic resolution techniques allow to obtain global optima, allowing the resolution of the problem with a realistic computation time (Chipperfield et al., 1995).

In this section, the DOE approach and a GA were combined. The DOE model characterised the variation of the control factors to identify the main factor effects (and those of their interactions) on the average cost. The independent variables ranged from a low of 1 to a high of 100.

Table 3.2 Levels on input factors

Factor	Low	Mid	High	Description
Z ₁	1	50	100	Inventory level threshold for d1
Z ₂	1	50	100	Inventory level threshold for d2

One response variable and two experimental factors were specified, allowing an experimental design with 27 runs, one sample taken per run (for a complete plan, this leads us to perform 3² tests. For better accuracy, we will perform 3 replications, which leads to a total of 27 tests). The default model is quadratic with 6 coefficients (cf. Montgomery, 2005). P values below 0.05 indicate a probability of less than 5% that the fit with the model is due to chance, while the R² statistic indicates the percentage of the variation in the response that is explained by the fitted model. In this case, five effects have P values less than 0.05, indicating that it is at least 95% certain that their effects are real (not due to chance), while the model as fitted explains 94.47% (adjusted R²) of the variability in cost. The average cost is a function of Z₁ and Z₂. In fact, there is a close correlation between the use of DOE and the regression analysis (Robinson, 2008). The regression equation that was fitted to the data is shown below (Eq. 3.20). The regression coefficients for the cost function are given in Table 3.3.

$$\text{cost} = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i Z_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \geq i}}^2 \beta_{ij} Z_i Z_j \quad (3.20)$$

Table 3.3 Polynomial coefficients and cost function

Coefficients	β_0	β_1	β_2	β_{11}	β_{12}	β_{22}
Estimate	201.046	-0.965064	-0.43045	0.00753563	0.00186971	0.00496752

$$\text{Cost function: cost} = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_{11} z_1^2 + \beta_{12} z_1 z_2 + \beta_{22} z_2^2$$

The MATLAB Genetic Algorithm Toolbox was used to estimate the cost function minimum. Table 3.4 shows the parameters that the GA uses for the computation (Chipperfield et al., 1995) :

Table 3.4 MATLAB parameters for the GA

Parameters	LIND	NVAR	NIND	MAXGEN	GGAP	XOV	MUR
Values Description	15 Length of individual variables	2 Number of decision variables	40 Number of individuals	30 Number of generations	0.9 gap between Generation	0.7 Crossover rate	0.0175 Mutation rate

The optimal cost (166.87) was found at $z_1^* = 51.7375$ and $z_2^* = 49.015$ where z_1^* and z_2^* are the optima of independent variables Z_1 and Z_2 . This policy constitutes an expansion of the hedging-point policy approach in a flexible manufacturing system where the cost function is minimized using GA. Controlled in this manner, the system is able to respond efficiently to customer demand with an infinite planning horizon.

3.7 Sensitivity analysis

We now provide a sensitivity analysis to validate the usefulness and efficiency of the manufacturing control policy.

Table 3.5 reveals that the production threshold z_i increases for product 1 as well as for product 2 while the cost of their shortages increases. However, while the inventory costs for both products increase, the production thresholds z_i drop to adjust to the new condition.

Table 3.5 Sensitive analysis outcomes

	Backlog cost	holding inventory cost	LOTO and CM duration	hedging point z1	hedging point z2	Backlog cost	holding inventory cost	LOTO and CM duration	hedging point z1	hedging point z2	Backlog cost	holding inventory cost	LOTO and CM duration	hedging point z1	hedging point z2
30	2	10	37,8	32,0	250	2	10	51,2	50,2	250	2	1	6,4	4,2	
40	2	10	39,6	34,2	250	6	10	43,8	40,6	250	2	2	14,0	10,2	
50	2	10	41,0	36,0	250	10	10	40,6	36,6	250	2	3	26,6	22,0	
100	2	10	45,4	41,6	250	14	10	38,4	34,0	250	2	4	36,2	35,6	
150	2	10	48,0	45,0	250	18	10	36,8	32,0	250	2	5	41,3	40,4	
200	2	10	49,8	47,8	250	22	10	35,6	30,6	250	2	6	45,0	44,2	
250	2	10	51,2	50,2	250	26	10	34,6	29,4	250	2	7	47,6	46,8	
300	2	10	52,4	52,6	250	30	10	33,8	28,4	250	2	8	49,2	47,2	
350	2	10	53,6	54,0	250	34	10	33,0	27,6	250	2	9	50,8	49,8	
400	2	10	54,4	55,0	250	38	10	32,4	26,8	250	2	10	51,2	50,2	
450	2	10	55,2	56,0	250	42	10	31,8	26,0	250	2	11	51,8	51,6	
500	2	10	56,0	57,0	250	46	10	31,4	25,4	250	2	12	52,6	51,8	

The effect of the cost of shortages on production hedging point values is shown in Figure 3.9. Increases in this cost increase the threshold level while all other costs related to production (inventory, repair, and lockout) remain constant. This reflects industrial reality. Indeed, when shortages cause major losses of profit for the company, they are avoided at all

costs. The production policy therefore suggests keeping a large inventory to meet demand in case of machine breakdown.

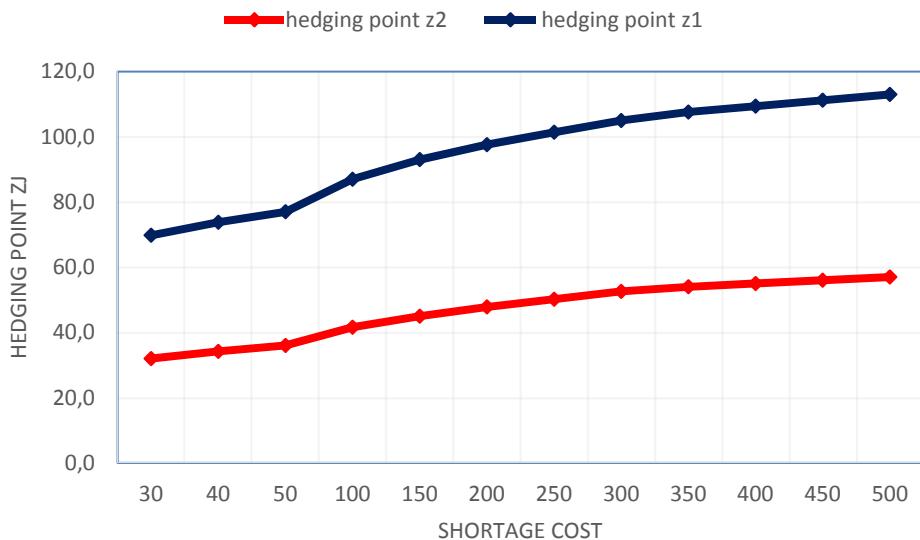


Figure 3.9 Changes in the production threshold as a function of the cost of product shortage

Figure 3.10 shows the production threshold as a function of inventory holding cost. Increases and decreases in inventory costs both have a direct and significant impact on the threshold. This shows the sensitivity of the inventory cost to the hedging point. Increases in this cost (while other production costs remain constant) accompany decreases in the threshold. At threshold production, the cost of maintaining inventory is closely related to the threshold. Smaller inventory costs less to maintain. However, the production manager must seek the optimal compromise, bearing in mind that a small inventory can easily lead to a shortage in the event of a sudden increase in demand, of machine breakdown or other randomness in production. The outcomes of this analysis suggest increasing inventory to allow for CM and LOTO activities, in spite of the costs associated with accelerated production and the increased risk of HE and accidents.

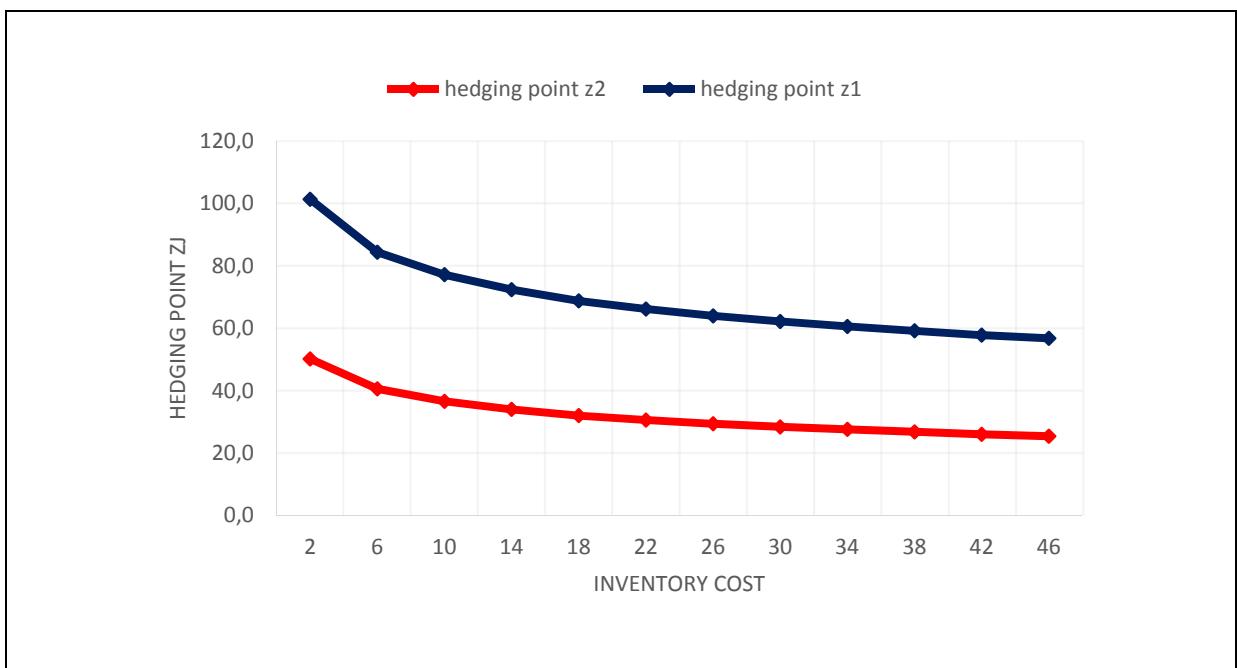


Figure 3.10 Change in the production threshold
as a function of inventory cost

Figure 3.11 shows the production threshold as a function of the cost of CM with LOTO. Increases in this cost result have the effect of increasing the threshold while all other production costs (inventory, shortage, repair) remain constant. This reflects industrial reality. When the cost of CM and LOTO is very high, machine breakdown cuts into the profit margin of the company.

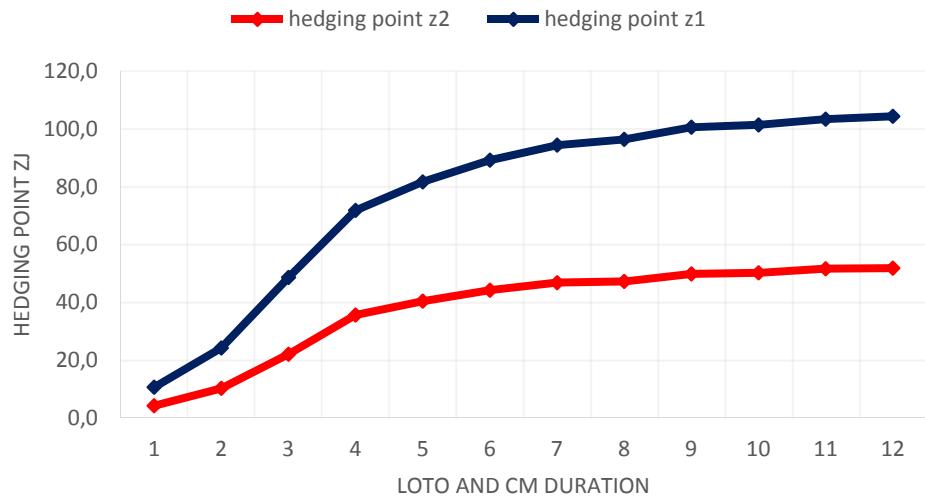


Figure 3.11 Change in the production threshold as a function of the CM and LOTO duration

3.8 Discussion

The aim of this study is to improve OHS in a flexible manufacturing system (FMS) by developing a policy of production control that withstands human error (HE) in the practice of lockout/tagout. Analytical formalism was combined with a numerical approach to solve Hamilton-Jacobi-Bellman equations for a system comprising a machine used to manufacture two different products. The outcomes suggest a hedging-point policy (a threshold policy based on stock levels) to maintain a level of inventory that meets demand during machine downtime. The machine is thus set to operate at its maximal output when the level decreases to (or drops below) the threshold for either product. Hedging-point policies have been described in detail elsewhere (Hu et al., 1994; Kenné et al., 1997). To obtain a model more realistic for flexible systems, the SIMAN processor and simulation language was combined with DOE and a GA to perform a discrete simulation. This yielded a cost optimisation policy. A sensitivity analysis was then performed to verify the usefulness and the efficiency of the control policy over an infinite production horizon. It was thus shown that it is possible to integrate CM with LOTO into production in an FMS while optimizing the costs of LOTO, shortage and inventory.

The main contribution is the introduction of a new approach to integrating LOTO into production and CM policies while emphasizing the influence of HE on operational issues. Indeed, the originality of this approach lies in the combination of the simulation of discrete events with a GAs and DOEs in order to lead to the optimization of the critical thresholds resulting from the HPP production structure. The study thus developed clearly shows the impact of HE in a flexible production system in terms of cost and OHS risk when production and CM are jointly planned.

The control method constitutes an extension of the HPP structure. Its outcomes suggest ways for managers to facilitate the integration of occupational health and safety (OHS) into FMS. However, the proposed model is based on certain simplifying assumptions. It could be improved to allow investigation of systems comprising two or more machines and meeting the demands of several customers. In addition, the likelihood of human error is a constraint on the effectiveness of the model and needs to be addressed properly. The impact of factors such as fatigue and stress also need to be investigated, as do the implications of the limited capacities of humans to perform repetitive tasks without error. Most machinery breakdowns are a result of operator performance and machinery age (Njike et al., 2011).

As noted in previous studies (Badiane et al., 2016; Emami-Mehrgani et al., 2015), LOTO should be included in system planning as a whole rather than treated as an add-on to maintenance. This would allow managers of operations and maintenance to plan their respective activities such that workers have no legitimate excuse for non-compliance with LOTO procedures. Although LOTO does increase the cost of CM, managers should be able to appreciate it as an investment in the reduction of risk (of accidents) rather than as non-value-adding activity. In any case, LOTO is now required by law according to article 188.2 of Quebec OHS legislation (D. 1187-2015, a. 3).

According to CNESST reports for the years 1999 to 2003, machinery was involved in more than 63,000 accidents and more than 100 deaths (Chinniah et al., 2008). HE during maintenance activities must be considered to maintain both productivity and OHS in a flexible manufacturing system. It increases downtime and hence cost as well as the risk of accidents (Emami-Mehrgani et al., 2014). HE probabilities in maintenance procedures can be estimated for each possible failure case using the HEART approach (Noroozi et al., 2014). Although a

systematic approach focused on human factors does help reduce the likelihood of HE during maintenance activities, error is inevitable and there will be no substitute for awareness and quick adjustment. The fundamental human nature of workers cannot be modified no matter how their working conditions might be (Reason, 2000).

This study shows clearly the impact of HE on a flexible manufacturing system in terms of cost and OHS when production and CM are planned conjointly. HE during CM activities certainly compromises the safety of maintenance technicians while raising production costs. A seemingly minor flaw in a flexible manufacturing system can lead to economic losses and threaten lives.

3.9 Conclusion

The aim of this study was to develop a way of planning production and CM with LOTO procedures that increases safety in a flexible manufacturing system. A system comprising a single machine meeting two types of customer demand and prone to failure was examined. Numerical methods based on finite-difference methods were used to solve Hamilton-Jacobi-Bellman differential equations. An iterative approach was used to improve the manufacturing control policy. A hedging-point policy was thus obtained, and the SIMAN processor and simulation language (Arena software) were then used to carry out the discrete simulation. Finally, DOE and a GA were combined to obtain a more realistic model for industries and to optimise the cost structure.

Our principal contribution is a control strategy that facilitates the integration of LOTO into production and CM and takes into account the impact of HE. The costs of shortage, inventory build-up and CM can thus be optimised over an unbounded planning horizon. This study clearly illustrates the impact of HE on a flexible manufacturing system in terms of production cost and OHS. The implications for corrective maintenance planning are clear: HE in CM activities compromises the safety of maintenance technicians and increases production cost. A seemingly minor flaw in a flexible manufacturing man-machine system can lead to economic losses and threaten lives.

Inventory must be sufficient to satisfy customer demand during CM. Integrating preventive measures such as LOTO into a flexible manufacturing system can result in a remarkable improvement in OHS. LOTO helps prevent contact with hazardous spaces during maintenance operations, inadvertent release of hazardous energy and unforeseen start-up of machinery. All activities at risk of HE in a flexible manufacturing system must be identified. This risk can be reduced substantially by paying particular attention to critical maintenance tasks. Accident prevention is a crucial aspect of modern manufacturing systems.

The model is based on certain assumptions and could be improved through study of flexible manufacturing systems comprising a plurality of machines and customers with different demand types. Factors such as fatigue and stress need to be investigated to determine their influence on human performance in such systems.

3.10 Acknowledgments

We gratefully acknowledge Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada and Association Québécoise pour l'Hygiène, la Santé et la Sécurité au travail. The authors also thank the anonymous reviewers, whose critique and suggestions increased the quality of this manuscript.

3.11 Appendices

3.11.1 Optimality conditions

The value functions and the HJB partial differential equations have properties called optimality conditions. Let $\chi(x)$ be a function where $x \in \mathbb{R}^n$. $\chi(x)$ has a derivative

$$\chi'_l(x) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\chi(x + \delta_l) - \chi(x)}{\delta} \quad \text{along the direction } l \in \mathbb{R}^n. \quad \chi'_l(x) \text{ for every } l \text{ and}$$

$\chi'_l(x) = (\nabla \chi(x), l)$ if $\chi(x)$ is differentiable at x , where $\nabla \chi(x)$ is the gradient of $\chi(x)$.

Moreover, if $\chi(x)$ is convex and continuous on a domain ψ , then $\chi(x)$ is differentiable and

admit a derivative at any point and along direction \mathbf{l} such that $x + \delta\mathbf{l} \in \psi$ for some $\delta \neq 0$. See Emami-Mehrgani et al. (2012) for more in depth details regarding the optimality conditions. Let $\{A\vartheta(u_1 u_2) \in B(\cdot)\}$ be the admissible directions at x regarding the optimality condition. The HJB equations can be written as follows:

$$\rho\vartheta(x, \alpha) = \min_{u \in B(x, \alpha)} \left\{ \vartheta'_{A\vartheta}(x, \alpha) + g(x, \alpha, \cdot) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} [\vartheta(x, \beta) - \vartheta(x, \alpha)] \right\}, \quad \forall \alpha, \beta \in M \quad (3.21)$$

where,

$$\begin{cases} \rho\vartheta(x, \alpha) = \min_{u \in B(x, \alpha)} \left\{ +g(x, \alpha, \cdot) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} [\vartheta(x, \beta) - \vartheta(x, \alpha)] \right\} \\ \vartheta'_{A\vartheta}(x, \alpha) = (\vartheta'_0 - \vartheta'_4) \vartheta'_{x_1}(x, \alpha) + (\vartheta'_0 - \vartheta'_4) \cdot \vartheta'_{x_2}(x, \alpha) \end{cases}$$

with, $\vartheta'_0 = u_1 t_1^\alpha + u_4 t_4^\alpha$, $t_1^\alpha = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$, $t_4^\alpha = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

The system is considered feasible if:

$$\sum \pi_i(\alpha) U_i^{\max}(\alpha) \geq d(\alpha) \quad (3.22)$$

where,

$$\begin{cases} \pi_i \text{ is the probability limit at the state } \alpha, \\ U_i^{\max} : \text{the maximum production rate at state } \alpha \end{cases} \quad \begin{bmatrix} \pi_1 U_1^{\max} \text{Ind}(\alpha=1) \\ + \pi_4 U_4^{\max} \text{Ind}(\alpha=4) \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} d_1 \text{Ind}(\alpha=1) \\ + d_2 \text{Ind}(\alpha=4) \end{bmatrix}$$

The feasibility inequation 3.22 is formulated to satisfy a set of specific properties called probability limits, defined in more detail in equation 23:

$$\begin{cases} \pi_i(\alpha) Q(\alpha) = 0, \text{ where } Q \text{ is the matrix of transition rates.} \\ \pi_i(\alpha) = \{\pi_1 \text{Ind}(\alpha=1) + \pi_2 \text{Ind}(\alpha=2) + \pi_3 \text{Ind}(\alpha=3) + \pi_4 \text{Ind}(\alpha=4) + \pi_5 \text{Ind}(\alpha=5) + \pi_6 \text{Ind}(\alpha=6)\} \\ \sum_{i=1}^6 \pi_i(\alpha) = 1, \text{ limiting probabilities} \end{cases} \quad (3.23)$$

Let $\delta\varphi$ designate the horizon of φ , $x \in \delta\varphi$ if $x_i = 0$ exists. Let $\vartheta(x, \alpha)$ of $\delta\varphi$ be differentiable at an x_0 . There is a vector $\nabla\vartheta(x_0, \alpha)$ such that $\vartheta'_l(x_0, \alpha) = \langle \nabla\vartheta(x_0, \alpha), \mathbf{l} \rangle$ for any acceptable direction at x_0 . The horizon condition from the continuity on the value function $\vartheta(x, \alpha)$ can be presented as below:

$$\begin{aligned}
& \min_{u \in B(x_0, \alpha)} \left\{ (\nabla \vartheta(x_0, \alpha), A \vartheta) + g(x_0, \alpha, \cdot) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} [\vartheta(x_0, \beta) - \vartheta(x_0, \alpha)] \right\} \\
&= \min_{u \in B(\alpha)} \left\{ (\nabla \vartheta(x_0, \alpha), A \vartheta) + g(x_0, \alpha, \cdot) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} [\vartheta(x_0, \beta) - \vartheta(x_0, \alpha)] \right\}, \forall \alpha, \beta \in M
\end{aligned} \tag{3.24}$$

The flexible manufacturing system optimal policy designates a reduction of the value function over the set of admissible production capacities. It is practically impossible to solve the HJB equations analytically. Finite difference methods, based on a numerical approach to stochastic control problems (Kushner et al., 1992), are used to solve the optimality conditions of the HJB equations.

3.11.2 Numerical method

In this section , we develop the dynamic programming for an FMS composed of one machine manufacturing two product types to meet two types of demand:

- Value function at mode 1

$$\vartheta^h(x, \alpha, 1) = \min_{(u, r) \in \Gamma^h(1)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +q_{12} \\ +q_{14} \\ +\frac{|u_1 - d_1|}{h_{x_1}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} |u_1 - d_1| \left(\vartheta^h(x + h_{x_1}, \alpha, 1) K^+ \right) \\ h_{x_1} \left(+\vartheta^h(x - h_{x_1}, \alpha, 1) K^- \right) \\ g(x, \alpha, 1) \\ + \begin{pmatrix} +q_{12} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 2) \\ +q_{14} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 4) \end{pmatrix} \end{pmatrix} \right\} \quad (3.25)$$

where,

$$g(x, \alpha, 1) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$c^\alpha = 0 \text{ (state 1)}$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

- Value function at mode 2

$$\vartheta^h(x, \alpha, 2) = \min_{(u, r) \in \Gamma^h(2)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +r_{21} \\ +q_{25} \\ +q_{23} \\ +\frac{|0 - d_1|}{h_{x_1}} \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{|0 - d_1|}{h_{x_1}} \left(\begin{array}{l} \vartheta^h(x + h_{x_1}, \alpha, 2) K^+ \\ +\vartheta^h(x - h_{x_1}, \alpha, 2) K^- \end{array} \right) \\ + \begin{pmatrix} g(x, \alpha, 2) \\ +r_{21} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 1) \\ +q_{25} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 5) \\ +q_{23} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 3) \end{pmatrix} \end{array} \right\} \right\} \quad (3.26)$$

where,

$$g(x, \alpha, 2) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

$$c^\alpha = (c_r + c_{LOTO}), (\text{CM-WOHE})$$

- Value function at mode 3

$$\vartheta^h(x, \alpha, 3) = \min_{(u, r) \in \Gamma^h(3)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +r_{31} \\ +q_{36} \\ +\frac{|u_1 - d_1|}{h_{x_1}} \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{|0 - d_1|}{h_{x_1}} \left(\begin{array}{l} \vartheta^h(x + h_{x_1}, \alpha, 3) K^+ \\ +\vartheta^h(x - h_{x_1}, \alpha, 3) K^- \end{array} \right) \\ + \begin{pmatrix} g(x, \alpha, 3) \\ +r_{31} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 1) \\ +q_{36} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 6) \end{pmatrix} \end{array} \right\} \right\} \quad (3.27)$$

where,

$$g(x, \alpha, 3) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

$$c^\alpha = \gamma(c_r + c_{LOTO}), (\text{CM-WHE})$$

- Value function at mode 4

$$\vartheta^h(x, \alpha, 4) = \min_{(u, r) \in \Gamma^h(4)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +r_{41} \\ +q_{45} \\ +\frac{|u_2 - d_2|}{h_{x_2}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{|u_2 - d_2|}{h_{x_2}} \left(\begin{array}{l} \vartheta^h(x + h_{x_2}, \alpha, 4) K^+ \\ + \vartheta^h(x - h_{x_2}, \alpha, 4) K^- \end{array} \right) \\ g(x, \alpha, 4) \\ +r_{41} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 1) \\ +q_{45} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 5) \end{pmatrix} \right\} \quad (3.28)$$

where,

$$g(x, \alpha, 4) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

$$c^\alpha = 0$$

- Value function at mode 5

$$\vartheta^h(x, \alpha, 5) = \min_{(u, r) \in \Gamma^+(5)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +r_{54} \\ +q_{52} \\ +q_{56} \\ +\frac{|0-d_2|}{h_{x_2}} \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{|0-d_2|}{h_{x_2}} \left(\begin{array}{l} \vartheta^h(x+h_{x_2}, \alpha, 5) K^+ \\ +\vartheta^h(x-h_{x_2}, \alpha, 5) K^- \end{array} \right) \\ + \begin{pmatrix} g(x, \alpha, 5) \\ +r_{54} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 4) \\ +q_{52} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 2) \\ +q_{56} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 6) \end{pmatrix} \end{array} \right\} \right\} \quad (3.29)$$

where,

$$g(x, \alpha, 5) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

$$c^\alpha = (c_r + c_{LOTO}), (CM - WOHE)$$

- Value function at mode 6

$$\vartheta^h(x, \alpha, 6) = \min_{(u, r) \in \Gamma^+(6)} \left\{ \begin{pmatrix} \rho \\ +q_{63} \\ +r_{64} \\ +\frac{|0-d_2|}{h_{x_1}} \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{|0-d_2|}{h_{x_1}} \left(\begin{array}{l} \vartheta^h(x+h_{x_1}, \alpha, 6) K^+ \\ +\vartheta^h(x-h_{x_1}, \alpha, 6) K^- \end{array} \right) \\ + \begin{pmatrix} g(x, \alpha, 6) \\ +q_{63} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 3) \\ +r_{64} \cdot \vartheta^h(x, \alpha, 4) \end{pmatrix} \end{array} \right\} \right\} \quad (3.30)$$

where,

$$g(x, \alpha, 6) = c_j^+ x_j^+ + c_j^- x_j^- + c^\alpha$$

$$x_j^+ = \max(0, x_j)$$

$$x_j^- = \max(-x_j, 0)$$

$$c^\alpha = \gamma(c_r + c_{LOTO}), (CM - WHE)$$

3.11.3 Experimental design

We have specified one response variable and two experimental factors. The selected experimental design consists of 27 runs, with one sample to be taken during each run. The default model is quadratic with 6 coefficients.

Table 3.6 Experimental design wizard

Step	Description	Step	Description
1	Define the response variables to be measured (Average cost. Analyze mean. Goal: minimize)	7	Save the experiment
2	Define the experimental factors to be varied (Z1 & Z2, continuous, controllable)	8	Analyze the experimental results
3	Select the experimental design (Multilevel factorial, 3 replications, 27 runs, 1 samples per run)	9	Optimize responses
4	Specify the initial model to be fit to the experimental results (model quadratic)	10	Save results
5	Select an optimal subset of the runs (27 runs selected)	11	Augment design
6	Select tables and graphs to evaluate the selected runs	12	Extrapolate

REFERENCES

- Akella, R., et P. Kumar. 1986. « Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 31, n° 2, p. 116-126.
- Assid, M., A. Gharbi et A. Hajji. 2015a. « Joint production, setup and preventive maintenance policies of unreliable two-product manufacturing systems ». *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 15, p. 4668-4683.
- Assid, M., A. Gharbi et A. Hajji. 2015b. « Production Planning and Opportunistic Preventive Maintenance for Unreliable One-Machine Two-Products Manufacturing Systems ». In *IFAC-PapersOnLine*. (//) Vol. 48, p. 478-483.
- Badiane , A., S. Nadeau, J-P. Kenné et V. Polotski. 2016. « Optimizing production while reducing machinery lockout/tagout circumvention possibilities ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 22, n° 2, p. 188-201.
- Ben-Daya, M., S-O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic et D. Ait-Kadi. 2009. *Human Error Handbook of Maintenance Management*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 741 p.
- Ben-Salem, A., A. Gharbi et A. Hajji. 2014. « Production planning and emission control for an unreliable manufacturing system with subcontracting strategy to achieve environmental objectives ». MScA. École de technologies supérieure, ÉTS, Montreal, 201 p.
- Boukas, E-K., et A. Haurie. 1990. « Manufacturing flow control and preventing maintenance: a stochastic control approach ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 35, n° 9, p. 1024-1031.
- Bulzacchelli, M-T., J-S. Vernick, G-S. Sorock, D-W. Webster et P. Lees. 2008. « Circumstances of fatal lockout/tagout-related injuries in manufacturing ». *American journal of industrial medicine*, vol. 51, n° 10, p. 728-734.

- Bulzacchelli, M-T., J-S. Vernick, D-W. Webster et P. Lees. 2007. « Effects of the Occupational Safety and Health Administration's control of hazardous energy (lockout/tagout) standard on rates of machinery-related fatal occupational injury ». *Injury prevention*, vol. 13, n° 5, p. 334-338.
- Burlet-Vienney, D., Y. Chinniah et A. Pizarro-Chong. 2014. « Design of an Intelligent Tool for the Observation and Follow-Up of Lockout Procedures during Maintenance Activities on Industrial Machines ». *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 2014.
- Burlet-Vienney, D., S. Jocelyn, Y. Chinniah, R. Daigle et S. Massé. 2009. *Vérification du contenu d'un programme de cadenassage*. Coll. « Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Guide RF-617 ».
- Chan, F., R. Bhagwat et S. Wadhwa. 2007. « Taguchi's method analysis of an FMS under review-period-based operational controls: identification of control periodicity ». *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 37, n° 2, p. 212-225.
- Chan, F., R. Bhagwat et S. Wadhwa. 2008. « Comparative performance analysis of a flexible manufacturing system (FMS): a review-period-based control ». *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 1, p. 1-24.
- Charlot, E., J-P. Kenné et S. Nadeau. 2007. « Optimal production, maintenance and lockout/tagout control policies in manufacturing systems ». *International Journal of Production Economics*, vol. 107, n° 2, p. 435-450.
- Chinniah, Y., B. Aucourt et R. Bourbonnière. 2015. *Prévention des risques mécaniques et physiques: Étude sur la sécurité des machines lors des interventions en mode de vitesse ou d'efforts réduits*. RAPPORT R-888. Montreal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).
- Chinniah, Y., et D. Burlet-Vienney. 2013. « Study on lockout procedures for the safety of workers intervening on equipment in the municipal sector in Quebec ». *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 19, n° 4, p. 495-511.

- Chinniah, Y., M. Champoux et D. Burlet-Vienney. 2008. *Comparative analysis of lockout programs and procedures applied to industrial machines*. REPORT R-575. Montreal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).
- Chipperfield, A. J., et P. J. Fleming. 1995. « The Matlab genetic algorithm toolbox ». In *Applied Control Techniques Using Matlab, IEE Colloquium on*. (26 Jan 1995), p. 10/1-10/4.
- Collazo, G-M. 2010. « Reducing Human Error on the Manufacturing Floor ». < http://www.mastercontrol.com/newsletter/pharmaceutical/reducing_human_error_manufacturing_floor_0310.html >. Consulté le 2016/04/26.
- Dhillon, B-S. 2014a. « Basic Human Factors, Reliability, and Error Concepts ». In *Human Reliability, Error, and Human Factors in Power Generation*. p. 27-47. Coll. « Springer Series in Reliability Engineering »: Springer International Publishing. < http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-04019-6_3 >.
- Dhillon, B-S. 2014b. *Human Reliability, Error, and Human Factors in Power Generation*. USA: Springer Series in Reliability Engineering, Pringer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 188 p.
- Dhillon, B-S., et Y. Liu. 2006. « Human error in maintenance: a review ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 12, n° 1, p. 21-36.
- Emami-Mehrgani, B., J-P. Kenné et S. Nadeau. 2012. « Lockout/tagout and optimal production control policies in failure-prone non-homogenous transfer lines with passive redundancy ». *International Journal of Production Research*, vol. 51, n° 4, p. 1006-1023.
- Emami-Mehrgani, B., S. Nadeau et J-P. Kenné. 2011. « Lockout/tagout and operational risks in the production control of manufacturing systems with passive redundancy ». *International Journal of Production Economics*, vol. 132, n° 2, p. 165-173.
- Emami-Mehrgani, B., S. Nadeau et 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, n° 4, p. 453-470.

Emami-Mehrgani, B., W-P. Neumann, S. Nadeau et M. Bazrafshan. 2015. « Considering human error in optimizing production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems ». *Applied Mathematical Modelling*.

Gharbi, A., et J-P. Kenné. 2005. « Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems ». *Computers & industrial engineering*, vol. 48, n° 4, p. 693-707.

Givi, Z-S., M-Y. Jaber et W-P. Neumann. 2015. « Modelling worker reliability with learning and fatigue ». *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, n° 17, p. 5186-5199.

Grosse, E., C. Glock, M. Jaber et W-P. Neumann. 2015. « Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities ». *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 3, p. 695-717.

Grusenmeyer, C. 2000. *Interactions maintenance-exploitation et sécurité. Etude bibliographique. 1. Les tâches de maintenance: définitions et caractéristiques contribuant à leur criticité*. INRS_188.

Grusenmeyer, C. 2005. *Les accidents liés à la maintenance. Etude bibliographique*. INRS-NS_248: INRS.

Harris, S., et B. Simpson. 2016. « Human Error and the International Space Station: Challenges and Triumphs in Science Operations ». In *14th International Conference on Space Operations*. p. 2406.

Hlioui, R., A. Gharbi et A. Hajji. 2015. « Replenishment, production and quality control strategies in three-stage supply chain ». *International Journal of Production Economics*, vol. 166, p. 90-102.

Hu, J-Q, P. Vakili et G-X. Yu. 1994. « Optimality of hedging point policies in the production control of failure prone manufacturing systems ». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, n° 9, p. 1875-1880.

- Jaber, M-Y., Z-S. Givi et W-P. Neumann. 2013. « Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process ». *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, n° 12-13, p. 7287-7299.
- Kelley, S-M. 2001. *Lockout/tagout: A practical approach*. American Society of Safety Engineers, 208 p.
- Kenné, J-P., et E-K Boukas. 1997. « Maintenance and production control of manufacturing systems with setups ». In *Lectures in Applied Mathematics-American Mathematical Society*. Vol. 33, p. 55-70.
- Kenné, J-P., et E-K. Boukas. 2003. « Hierarchical control of production and maintenance rates in manufacturing systems ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 9, n° 1, p. 66-82.
- Kenné, J-P., et A. Gharbi. 2004. « Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance ». *Computers & industrial engineering*, vol. 46, n° 4, p. 865-875.
- Kushner, H, et P Dupuis. 1992. « Numerical methods for stochastic control problems in continuous time ». *Applications of Mathematics*, vol. 24.
- Lee, C-Y., et C-S. Lin. 2001. « Single-machine scheduling with maintenance and repair rate-modifying activities ». *European Journal of Operational Research*, vol. 135, n° 3, p. 493-513.
- Lind, S. 2008. « Types and sources of fatal and severe non-fatal accidents in industrial maintenance ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, n° 11-12, p. 927-933.
- Lind, S. 2009. « Accident sources in Industrial maintenance operations proposals for identification, modelling and management of accident risks ». *VTT Publications*, n° 710, p. 1-123.
- Mario, S. 2012a. « L'après-implantation d'un système de cadenassage – Partie 2_ L'audit et le suivi de performance ». Message envoyé à *Blogue du Groupe ID*

Mario, S. 2012b. « le suivi après l'implémentation d'un système de cadenassage: Partie 1: Quelles sont mes obligations? ». Message envoyé à *Blog du Groupe ID*.

Matsuoka, S., et M. Muraki. 2001. « Computer-aided planning for lockout/tagout program ». *Process Safety Progress*, vol. 20, n° 2, p. 130-135.

Neumann, W-P., et J. Dul. 2010. « Human factors: spanning the gap between OM and HRM ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 30, n° 9, p. 923-950.

Njike, A-N., R. Pellerin et J-P. Kenné. 2011. « Maintenance/production planning with interactive feedback of product quality ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 17, n° 3, p. 281-98.

Noroozi, A., N. Khakzad, F. Khan, S. MacKinnon et R. Abbassi. 2013. « The role of human error in risk analysis: Application to pre- and post-maintenance procedures of process facilities ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 119, n° 0, p. 251-258.

Noroozi, A., F. Khan, S. MacKinnon, P. Amyotte et T. Deacon. 2014. « Determination of human error probabilities in maintenance procedures of a pump ». *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, n° 2, p. 131-141.

Ouaret, S., J-P Kenné, A. Gharbi et V. Polotski. 2015. « Age-dependent production and replacement strategies in failure-prone manufacturing systems ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*.

Poyard, J-L. 2016. « De la conception au recyclage d'une machine, la sécurité avant tout ». *Revue Hygiène et sécurité du travail*, vol. INRS-DO 15, n° NRS-DO 15, p. 5.

Raouf, A., et M. Ben-Daya. 1995. *Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments*, Vol. 23. Elsevier, 316 p.

Reason, J. 2000. « Human error: models and management ». *Western Journal of Medicine*, vol. 172, n° 6, p. 393.

- Reason, J. 2016. *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.
- Rivera-Gómez, H., A. Gharbi, J-P. Kenné, O. Montaño-Arango et E. Hernandez-Gress. 2016.
« Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system ». *International Journal of Production Economics*, vol. 171, Part 1, p. 134-150.
- Robinson, T. 2008. « Design and analysis of industrial experiments ». *Statistical Practice in Business and Industry*, p. 137-161.
- Tchiehe, D-N., et F. Gauthier. 2017. « Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety ». *Safety science*, vol. 92, p. 138-147.
- Väyrynen, S. 1984. « Safety and ergonomics in the maintenance of heavy forest machinery ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 16, n° 2, p. 115-122.
- Venkatraman, N. 2012. « Business performance and maintenance: How are safety, quality, reliability, productivity and maintenance related? ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 18, n° 2, p. 183-195.
- Whittingham, R-B. 2004. *The blame machine - Why human error causes accidents*. Routledge, Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 288 p.

CONCLUSION

Cette recherche a porté sur un problème de commande de la planification de la production et de la maintenance intégrant le cadenassage/décadenassage (C/D) pour un système de production flexible (*FMS – Flexible Manufacturing System*). Le FMS étudié est constitué d'une machine produisant deux types de produits habituellement appelé M1P2. Le système n'est capable de produire qu'un seul type de demande à la fois. L'environnement de production est stochastique, caractérisé par des phénomènes aléatoires tels que des pannes et des réparations, ainsi que l'influence de l'EH sur la durée des interventions. Le technicien de maintenance intervient immédiatement sur la machine suite à l'arrivée d'une défaillance.

L'objectif visé dans ce travail a été de faciliter l'intégration du C/D à la planification de la production et de la maintenance dans un FMS tout en prenant en compte l'impact de l'EH durant l'intervention d'un technicien de maintenance. Pour ce faire, considérant la complexité de l'approche analytique, une démarche séquentielle de résolution intégrant une approche basée sur la combinaison d'une théorie de commande (méthodes numériques) et des méthodes expérimentales (simulation, DOE, outils statistiques, AG) ont été utilisées. In fine, un exemple numérique et une analyse de sensibilité ont été proposés afin de confirmer la validité ainsi que l'efficacité et l'efficience de la politique de commande optimale du FMS dans un horizon de planification infini.

Ainsi, il a été déterminé le taux de production optimal qui minimise les coûts d'inventaire, de pénurie et de maintenance dans un horizon de planification infinie tout en respectant les procédures de C/D selon l'article 188.2 du règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST/CNSST). De même, la politique suggérée permet de planifier un temps de C/D et de MC essentiel afin de réduire les déviations de mécanismes de consignation et de verrouillage et des dispositifs de protection. Les inventaires doivent être suffisants afin de satisfaire la demande des clients lors de la MC. L'intégration de mesures préventives telles que le C/D dans un FMS peut entraîner une amélioration remarquable de la SST. Il a été également mis en exergue l'influence de l'EH à la planification de la production et de la maintenance corrective (MC). Les implications à la planification de la MC sont claires: l'EH dans les activités de MC peut compromettre la sécurité du technicien de maintenance et augmenter les

coûts de production. Toutes les activités à risque d'erreur humaine dans un FMS doivent être identifiées. Ces risques peuvent être considérablement réduits en accordant une attention particulière aux tâches de maintenance critique. Dans cette étude, l'influence de l'EH est considérée en termes de temps additionnel à la planification de la production et de la maintenance. La fréquence de réparation de la machine dépend largement de HE. Les coûts intrinsèques de pénurie, d'inventaire et de maintenance sont optimisés dans un horizon de planification illimité. La probabilité d'apparition d'une erreur durant l'application des procédures de C/D et de MC peuvent être évaluée en utilisant l'approche Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) (Noroozi et al. (2014)). Bien qu'une approche systématique axée sur les facteurs humains contribue à réduire la probabilité d'erreur humaine durant les activités de maintenance et de C/D, l'erreur humaine est inévitable à 100% et il n'y aura aucun substitut à la sensibilisation et à la récupération du geste. La nature humaine fondamentale des travailleurs ne peut être modifiée, peu importe la façon dont leurs conditions de travail pourraient être modifiées (Reason, 2000). Par ailleurs, il est bon de noter et de prendre en considération l'importance de récolter des données réelles issues d'un FMS afin de vérifier la performance de la politique de commande optimale proposée.

La politique de commande optimale de la production ainsi obtenue constitue une extension de la structure de la politique de production à seuil critique basée sur les niveaux d'inventaire (HPP). Cependant, le modèle proposé repose sur certaines hypothèses. Il pourrait être amélioré afin de vérifier sa faisabilité lorsqu'il est étendu à des systèmes plus complexes et réalistes. Par exemple, un système comprenant deux machines ou plus et répondant aux demandes de plusieurs clients pourra être étudié. En outre, la probabilité d'erreur humaine est une contrainte sur l'efficacité et l'efficience du modèle. De ce fait, les facteurs humains, en termes d'erreur et de fiabilité humaine doivent également être adressés correctement dans le cadre des systèmes plus complexes. L'impact de certains facteurs tels que la fatigue et le stress doit également être étudié, de même que les implications de capacités cognitives limitées des humains à effectuer des tâches sans erreur. En effet, la plupart des défaillances de machines résultent de la compétence de l'opérateur et de l'état de la machine (l'âge) (Njike et al., 2011).

Il est également recommandé de prendre en considération la politique du corridor de couverture (Hedging Corridor Policy, HCP) (cf. Hajji et al., 2003) à la formulation et la

modélisation du problème afin de mieux commander les seuils critiques de production. La politique du corridor de couverture (HCP) est également décrite dans Bai et al. (1997). Ces derniers ont développé une programmation dynamique combinée avec une résolution numérique du problème dans un système produisant deux types de produits afin de commander la production. La politique de commutation (switch) est de type corridors de couverture. Cette politique définit une trajectoire définissant des seuils d'inventaire positif afin de se prémunir des pénuries provoquées par les défaillances et l'EH. Dans le même ordre d'idée, Gharbi et al. (2006) ont développé une extension de la politique HCP afin de déterminer une meilleure séquence de mise en course (setup).

ANNEXE I

LISTE DES PUBLICATIONS

L'article de journal est référencé par :

Diop, I. and Nadeau, S. and Emami-Mehrgani, B. « Human error, optimal production control policies, corrective maintenance with lockout/tagout and random demand ». Under Review, submitted on October 2, 2017. International Journal of Production Research (IJPR).

L'article de conférence est référencé par :

Diop, I. and Nadeau, S. and Emami-Mehrgani, B. 2017. « Human error, optimal production control policies and corrective maintenance with Lockout-Tagout », International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, AHFE 2017 (Los Angeles, California, USA, July 17-21, 2017).

L'affiche avec comité de pairs est référencée par :

Diop, I. and Nadeau, S. and Emami-Mehrgani, B. 2016. « Intégration du cadenassage à la planification de la production et de la maintenance ». Affiche présentée au 38e congrès de l'AQHSST : comportements sécuritaires, les tiens, les miens, les nôtres (Shawinigan, QC, Canada, 18-20 mai 2016).

L'activité de vulgarisation sans comité de pairs est référencée par :

Diop, I., « Intégration du cadenassage à la planification de la production et de la maintenance ». Ma thèse en 180 secondes, finale de la 5e édition à l'École de technologie supérieure, ÉTS, 2016.

ANNEXE II

RÉSUMÉ INFORMATIF PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'AHFE 2017

8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS (AHFE 2017) AND THE AFFILIATED CONFERENCES. THE WESTIN BONAVENTURE HOTEL, LOS ANGELES, CALIFORNIA, USA JULY 17-21, 2017.

ABSTRACT

INTRODUCTION - Lockout-tagout (LOTO) has become a legal obligation according to article 188.2 of Quebec's occupational health and safety regulation (RSST). LOTO is conducted in flexible manufacturing systems (FMS) to ensure that the maintenance technicians interventions are safe. Nevertheless, Human error (HE) in maintenance procedures constitutes a serious issue in FMS. HE is responsible for a great deal of accidents and process deviations in FMS environments. Consequently, knowledge about human factor such as HE, should be taken in consideration. Since HE is an important issue in FMS, smart selected policies and strategies should be implemented toward minimizing occupational risk and rising operational efficiency. Besides, the Health and safety work act (LSST, CNESST (art. 51)) stipulates that employers have, inter alia, obligations to: 1 - ensure that employee working conditions are safe and healthy; 2 - acquire complete knowledge and skill in health and safety risks related to the work execution; 3 - inform workers about these risks; 4 - train workers to prevent these hazards.

METHODS - We discussed a problem of decision-making in FMS. We considered a production control problem with a failure-prone machine producing one type of product to meet two types of demand. The machine availability was enhanced through corrective maintenance activities (CM). The machine repair rates with Human Error (HE) or without Human Error (WOHE) that influence the FMS capacity and the production rate which impact the inventory levels were the decision variables. A combined approach is presented which was based on a combination of analytical formalism, discrete events simulation, design of

experiments (DOE) and genetic algorithms (GAs) to optimise an FMS. A numerical example and a sensitivity analysis were proposed to illustrate the usefulness and efficiency of the proposed approach.

RESULTS - This research clearly illustrates the impact of HE in FMS in terms of cost, accidents and injuries of maintenance personnel linked to machinery. Production cadence and effective worker training can reduce HE and the total production cost. HE is one of the most critical concerns in FMS. Accordingly, it can lead in the loss of hundred million of dollars and human lives (Park, 2014)

DISCUSSION - The foremost target was to develop an optimal robust and flexible control strategy in order to illustrate the importance of LOTO integration into production and maintenance planning. Accordingly, the influence of HE in FMS was examined. Hence, we identified an optimal cost inherent to shortage, inventory and maintenance costs over an infinite planning horizon. Errors can be minimized by providing constant vigilance to LOTO procedure to reduce HE in FMS by eliminating the risk of error (Burlet-Vienney et al., 2014). Furthermore, new strategy to reduce HE during LOTO application in FMS seems to be essential. Prevention should be carried out against HE, however, it is not possible to prevent all HE from appearing.

KEYWORDS Production Control, Corrective Maintenance, Lockout/tagout, Human error, Simulation, Flexible manufacturing system

ANNEXE III

AFFICHE DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE AVEC COMITÉ DE PAIRS PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'AQHSST

**38^{IE}ME CONGRES DE LA FONDATION DE L'ASSOCIATION QUEBECOISE
POUR L'HYGIENE, LA SANTE ET LA SECURITE DU TRAVAIL (AQHSST), SUR LE
THEME « COMPORTEMENTS SECURITAIRES, LES TIENS, LES MIENS, LES
NOTRES » À SHAWINIGAN, QC, CANADA (DU 18 AU 20 MAI 2016)**




ÉREST
Equipe de recherche
en sécurité du travail

INTEGRATION DU CADENASSAGE A LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE

Issé Chook, Nivie Naddeo, Bahman Emami-Moraghi

Département de génie et de génier industriel, École de technologie supérieure, Montréal, Québec H3C 2B2, Canada



Association québécoise
pour la qualité et la sécurité du travail

1. RÉSUMÉ

Ce projet traite un problème de processus d'entretien des systèmes de production.

L'objectif principal est de développer une stratégie intégrée de planification de la production et de la maintenance (PPM) et de cadenassage (lockout/tagout) pour la prévention de l'accident dans les systèmes de production.

Le résultat doit se montrer les trois critères de production (rapport des unités d'entretien et de production), de sécurité (réduction des risques et de l'incidence) et d'efficacité (réduction des coûts et de l'absentéisme).

En effet, le processus de planification du système de production et de l'entretien doivent être intégrés en amont (éergonomie de l'entretien humain à la planification de la production) et en aval (planification de la production qui intègre les procédures de CTO).

2. PROBLÉMATIQUE ET SYNTHÈSE DE LITTÉRATURE

Statistiques de la CHEMTech (30 septembre 2015) (IC 200-1040-22)

- Plus de 80 000 accidents du travail,
- 60 morts,
- Plus de 200 blessés tous les jours.

2007

- Théorie de condition pour déterminer la date de la commande qui fournit les taux de production, d'envoi en CTO, et de réparation (Chen et al. 2007).
- Optimiser production, maintenance et lockout/tagout control policies in manufacturing systems (Chen et al. 2007).

2010

- Identification stratégique de maintenance pour la gestion opérationnelle des systèmes manufacturiers (Scheuer et al. 2010).
- Nécessité immédiate de concevoir l'étape IC comme une activité à part entière (Scheuer et al. 2010).

2015

- Lockout/tagout and optimization tools in the production control of manufacturing system with passive redundancy (Emami-Moraghi et al. 2015).
- Lockout/tagout and optimal production planning policies for failure-time-dependent preventive maintenance times with passive redundancy (Emami-Moraghi et al. 2015).
- Optimal lockout/tagout, preventive maintenance, human error and production policies of manufacturing systems with passive redundancy (Emami-Moraghi et al. 2015).
- Considering human error in optimal production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems (Emami-Moraghi et al. 2015).

3. SYSTÈME ÉTUĐÉ

Production passif journalier régulière

Stocks : MP, P

Entrepôt → Stock MP → Stock P → Distributeur → Consommateur

Frais de stock journalier d'entrepôt : $E_1 = \frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2$

Frais de stock journalier de stock : $E_2 = \frac{1}{2} \cdot x_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

Équation d'énergie : $x_1 + x_2 = \frac{1}{A} \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \frac{1}{B} \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

Minimisation : $U(x_1, x_2) = \frac{1}{A} \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \frac{1}{B} \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

2016

Le système manufacturier étudié est un FMS (Flexible Manufacturing System) constitué d'une machine produisant un seul type de produit.

Ce système est suivi à des périodes et des réinterventions périodiques.

Le système de production et de maintenance doivent collaborer pour assurer l'efficacité d'exploitation et d'intervention sur la machine selon les recommandations de l'autorité 196 de l'ANSWER (ANSWER).

4. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Deux approches de résolution du problème de commande sont considérées:

Approche de simulation :

Production : $\text{Produit}_1 = \frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot x_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

Calendrier : $x_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2 + x_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

Maintenances : $x_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1)^2 + x_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2)^2$

Approche de modélisation :

Simulations, Plans d'entretien, Algorithmes génétiques

5. RÉSULTATS ET RETOMBÉES

Résultat pour un temps total de calendrage :

MP	PV1*	PV2*	PV3*	COUT*
0,4	125,1	211,7	204,2	106,4
B2	99,8	183,3	179,0	95,4

*MP = seul critique de l'inventaire ; *PV1* = fonction valeur du mode production.

B1 = le temps de production minimum.

B2 = le temps de production maximum.

B3 = le temps de production moyen.

B4 = le temps de l'ensemble des produits finis.

La politique de contrôle des inventaires est considérée comme étant optimale lorsque l'ensemble des niveaux d'inventaires est supérieur à ce seuil.

Résultat pour un temps total de calendrage :

MP	PV1*	PV2*	PV3*	COUT*
0,4	125,1	211,7	204,2	106,4
B2	99,8	183,3	179,0	95,4

PV1* = fonction valeur au mode calendrage ; PV3* = fonction valeur au mode réparation.

A VENIR :

- Simulations, Plans d'entretien, Algorithmes génétiques

ANNEXE IV

RÉSOLUTION DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES SOUS MATLAB

Tels que mentionné précédemment, les AGs résolvent des problèmes d'optimisation en imitant les principes d'évolution biologique. Du fait de sa nature stochastique, l'algorithme génétique améliore, à chaque itération, la chance de trouver une solution globale. La boîte à outils des AGs sur Matlab (*Matlab toolbox*) permet de résoudre des problèmes d'optimisation sans contraintes (*unconstrained*) ou avec des contraintes bornées (*bound constrained*). Elle permet aussi la résolution de problèmes d'optimisation générale. L'avantage de cette méthode de résolution heuristique réside dans sa capacité de résolution ne nécessitant pas la différentiation ou la continuité de la fonction-objectif. Cette situation milite en sa faveur par rapport à un choix de recherche directe (*direct search*) qui exigerait beaucoup d'hypothèses simplificatrices. Dans la suite de cette section, il sera considéré l'approche de Chipperfield et al. (1995); Chipperfield et al. (1994).

Les données sous la *toolbox* des GAs de Matlab sont sauvegardées dans quatre (4) types de matrices dont chaque ligne correspond à un individu particulier de la population. Le tableau A.IV.1 ci-après récapitule les termes utilisés pour la représentation de ces matrices.

Tableau A.IV 1 Paramètres des matrices de l'algorithme génétique

<i>Paramètre</i>	<i>Signification</i>
N_{ind}	Nombre d'individus de la génération
L_{ind}	Longueur de la structure des chromosomes
N_{var}	Nombre de variables de décision
N_{obj}	Nombre de fonction-objectifs

Une matrice de taille $N_{ind} \times L_{ind}$, permet de stocker l'ensemble des individus d'une génération.

Une matrice de taille $N_{ind} \times N_{var}$ permet de sauvegarder les phénotypes i.e. l'ensemble des variables de décision. Une matrice de taille $N_{ind} \times N_{obj}$ permet de sauvegarder l'ensemble des

fonction-objectifs. Une matrice-vecteur de longueur N_{ind} permet de sauvegarder la valeur finale de la fonction-objectif (*fitness value*).

Le mécanisme de la *toolbox* de Matlab utilise ces matrices pour l'implémentation de l'algorithme.

Pour ce faire, la première génération est initialisée à l'aide des commandes *CRTBP* ou *CRTRP*. Ces dernières sont des fonctions intégrées dans Matlab (*built-function*). La commande *CRTBP* utilise un codage binaire et entier pour générer une population initiale. Quant à la commande *CRTRP*, elle s'appuie sur un codage réel pour initialiser la première génération. Le décodage des solutions binaires en valeurs réelles est réalisé à l'aide de la commande *BS2RV* (*Binary solution to real value*). La méthode '*LINEAR RANKING*' ou *SCALING* peut être utilisée pour l'affectation des valeurs de la fonction adaptabilité (*fitness assignment*) (Goldberg, 1989).

Par la suite, le programme procède à l'opération de sélection des individus les mieux adaptés, par exemple, par le biais de la commande *RWS* (*Roulette wheel selection*) ou bien la commande *SUS* (*Stochastic universal sampling*). Pour plus de développement, le lecteur peut se référer aux travaux de Goldberg (1989); Goldberg et al. (1988) et de Baker (1987).

Suite à l'opération de sélection, les chromosomes se recombinent par paires par le biais de la fonction de croisement afin de générer une nouvelle progéniture (*offspring*). Plusieurs méthodes sont disponibles dans les recommandations de la littérature scientifique (Baker, 1987). Par exemple, l'opérateur *XOVSP* (*single-point crossover*) permet la recombinaison en un seul point, alors que l'opérateur *XOVDP* (*double-point crossover*) effectue le croisement en deux points de contact des chromosomes.

Enfin, l'opération de mutation est effectuée par le biais de la commande *MUT* (*mutation binaire et entier*).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Stevenson, WJ., C. Benedetti et H. Bourenane. 2006. *La gestion des opérations: produits et services. Guide de l'étudiant.* Chenelière/McGraw-Hill.
- Akella, P., M. Peshkin, Ed Colgate, W. Wannasuphprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson et B. Peacock. 1999. « Cobots for the automobile assembly line ». In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on.* (1999) Vol. 1, p. 728-733 vol.1.
- Akella, R., et P. Kumar. 1986. « Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 31, n° 2, p. 116-126.
- Andradóttir, S. 1998a. « A review of simulation optimization techniques ». In *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation.* p. 151-158. IEEE Computer Society Press.
- Andradóttir, S. 1998b. *Simulation optimization.* John Wiley.
- Aoudjit, H. 2010. « Planification de la maintenance d'un parc de turbines-alternateurs par programmation mathématique ». École Polytechnique de Montréal.
- April, J., F. Glover, J-P. Kelly et M. Laguna. 2003. « Practical introduction to simulation optimization ». In *Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter.* Vol. 1, p. 71-78. IEEE.
- Assid, M., A. Gharbi et A. Hajji. 2015a. « Joint production, setup and preventive maintenance policies of unreliable two-product manufacturing systems ». *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 15, p. 4668-4683.
- Assid, M., A. Gharbi et A. Hajji. 2015b. « Production Planning and Opportunistic Preventive Maintenance for Unreliable One-Machine Two-Products Manufacturing Systems ». In *IFAC-PapersOnLine.* (//) Vol. 48, p. 478-483.

Azadivar, F. 1999. « Simulation optimization methodologies ». In *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation-a bridge to the future-Volume 1*. p. 93-100. ACM.

Azadivar, F., et J-V. Shu. 1998. « Use of simulation in optimization of maintenance policies ». In *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*. p. 1061-1068. IEEE Computer Society Press.

Azadivar, F., et J. Talavage. 1980. « Optimization of stochastic simulation models ». *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 22, n° 3, p. 231-241.

Azadivar, F., et G. Tompkins. 1999. « Simulation optimization with qualitative variables and structural model changes: A genetic algorithm approach ». *European Journal of Operational Research*, vol. 113, n° 1, p. 169-182.

Badiane, A. 2010. « L'intégration des stratégie de maintenance à la gestion des opérations des systèmes manufacturiers ». MScA. École de technologie supérieure, Université du Québec.

Badiane , A., S. Nadeau, J-P. Kenné et V. Polotski. 2016. « Optimizing production while reducing machinery lockout/tagout circumvention possibilities ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 22, n° 2, p. 188-201.

Badri, A., A. Gbodossou et S. Nadeau. 2012. « Occupational health and safety risks: Towards the integration into project management ». *Safety science*, vol. 50, n° 2, p. 190-198.

Bai, Sherman X., et Mohsen Elhafsi. 1997. « Scheduling of an unreliable manufacturing system with nonresumable setups ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 32, no 4, p. 909-925.

Baker, J-E. 1987. « Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm ». In *Proceedings of the second international conference on genetic algorithms*. p. 14-21.

Ben-Daya, M., S-O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic et D. Ait-Kadi. 2009a. *Human Error Handbook of Maintenance Management*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 741 p.

- Ben-Salem, A., A. Gharbi et A. Hajji. 2014. « Production planning and emission control for an unreliable manufacturing system with subcontracting strategy to achieve environmental objectives ». MScA. École de technologies supérieure, ÉTS, Montreal, 201 p.
- Berk, Joseph. 2010. *Cost reduction and optimization for manufacturing and industrial companies*, 2. John Wiley & Sons.
- Bi, Z-M., S. Lang, W. Shen et L. Wang. 2008. « Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art ». *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 4, p. 967-992.
- Boukas, E-K., et A. Haurie. 1990. « Manufacturing flow control and preventing maintenance: a stochastic control approach ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 35, n° 9, p. 1024-1031.
- Boulet, J-F., A. Gharbe et J-P. Kenné. 2005. « Production and corrective maintenance rate policy improvement in an unreliable failure-prone manufacturing system ». Montréal, 38 p.
- Bowden, R-O., et J-D. Hall. 1998. « Simulation optimization research and development ». In *Simulation Conference Proceedings, 1998. Winter*. Vol. 2, p. 1693-1698. IEEE.
- Bowden, R., R. Neppalli et A. Calvert. 1995. « A robust method for determining good combinations of queue priority rules ». In *Proceedings of the 4th International Industrial Engineering Research Conference*. p. 874-880. Institute of Industrial Engineers.
- Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, Suresh P. Sethi et K-E. Stecke. 1984. « Classification of flexible manufacturing systems ». *The FMS magazine*, vol. 2, n° 2, p. 114-117.
- Bulzacchelli, M-T., J-S. Vernick, G-S. Sorock, D-W. Webster et P. Lees. 2008. « Circumstances of fatal lockout/tagout-related injuries in manufacturing ». *American journal of industrial medicine*, vol. 51, n° 10, p. 728-734.

- Bulzacchelli, M-T., J-S. Vernick, D-W. Webster et P. Lees. 2007. « Effects of the Occupational Safety and Health Administration's control of hazardous energy (lockout/tagout) standard on rates of machinery-related fatal occupational injury ». *Injury prevention*, vol. 13, n° 5, p. 334-338.
- Burlet-Vienney, D., Y. Chinniah et A. Pizarro-Chong. 2014. « Design of an Intelligent Tool for the Observation and Follow-Up of Lockout Procedures during Maintenance Activities on Industrial Machines ». *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 2014.
- Burlet-Vienney, D., S. Jocelyn, Y. Chinniah, R. Daigle et S. Massé. 2009. *Vérification du contenu d'un programme de cadenassage*. Coll. « Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Guide RF-617 ».
- Buzacott, J-A. 1982. « "Optimal" operating rules for automated manufacturing systems ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 27, n° 1, p. 80-86.
- Carson, Y., et A. Maria. 1997. « Simulation optimization: methods and applications ». In *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*. p. 118-126. IEEE Computer Society.
- Chan, F., R. Bhagwat et S. Wadhwa. 2007. « Taguchi's method analysis of an FMS under review-period-based operational controls: identification of control periodicity ». *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 37, n° 2, p. 212-225.
- Chan, F., R. Bhagwat et S. Wadhwa. 2008. « Comparative performance analysis of a flexible manufacturing system (FMS): a review-period-based control ». *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 1, p. 1-24.
- Charlot, E., J-P. Kenné et S. Nadeau. 2007. « Optimal production, maintenance and lockout/tagout control policies in manufacturing systems ». *International Journal of Production Economics*, vol. 107, n° 2, p. 435-450.
- Chelsom, J-V., A-C. Payne et L-P Reavill. 2005. *Management for engineers, scientists, and technologists*. John Wiley & Sons.

- Chinniah, Y., B. Aucourt et R. Bourbonnière. 2015. *Prévention des risques mécaniques et physiques: Étude sur la sécurité des machines lors des interventions en mode de vitesse ou d'efforts réduits*. RAPPORT R-888. Montreal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).
- Chinniah, Y., et D. Burlet-Vienney. 2013. « Study on lockout procedures for the safety of workers intervening on equipment in the municipal sector in Quebec ». *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 19, n° 4, p. 495-511.
- Chinniah, Y., M. Champoux et D. Burlet-Vienney. 2008. *Comparative analysis of lockout programs and procedures applied to industrial machines*. REPORT R-575. Montreal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).
- Chipperfield, A., et P. Fleming. 1995. « The Matlab genetic algorithm toolbox ». In *Applied Control Techniques Using Matlab, IEE Colloquium on*. (26 Jan 1995), p. 10/1-10/4.
- Chipperfield, A., P. Fleming, H. Pohlheim et C. Fonseca. 1994. « Genetic algorithm toolbox for use with MATLAB ».
- Colgate, J Edward, J Edward, Michael A Peshkin et Witaya Wannasuphoprasit. 1996. « Cobots: Robots for collaboration with human operators ».
- Collazo, G-M. 2010. « Reducing Human Error on the Manufacturing Floor ». < http://www.mastercontrol.com/newsletter/pharmaceutical/reducing_human_error_manufacturing_floor_0310.html >. Consulté le 2016/04/26.
- Davis, L. 1991. « Handbook of genetic algorithms ».
- Dekker, R. 1996. « Applications of maintenance optimization models: a review and analysis ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 51, n° 3, p. 229-240.
- Dhillon, B-S. 2002. *Engineering maintenance: a modern approach*. CRC Press.
- Dhillon, B-S. 2014a. « Basic Human Factors, Reliability, and Error Concepts ». In *Human Reliability, Error, and Human Factors in Power Generation*. p. 27-47. Coll. «

Springer Series in Reliability Engineering »: Springer International Publishing. < http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-04019-6_3 >.

Dhillon, B-S. 2014b. *Human Reliability, Error, and Human Factors in Power Generation*. USA: Springer Series in Reliability Engineering, Pringer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 188 p.

Dhillon, B-S., et Y. Liu. 2006. « Human error in maintenance: a review ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 12, n° 1, p. 21-36.

Duchaine, V., et C-M. Gosselin. 2007. « General Model of Human-Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control ». In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*. (22-24 March 2007), p. 446-451.

Duffuaa, S-O., A. Raouf et J-D. Campbell. 1999. *Planning and control of maintenance systems: modeling and analysis*. John Wiley & Sons.

Duguay, C-R., S. Landry et F. Pasin. 1997. « From mass production to flexible/agile production ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 17, n° 12, p. 1183-1195.

Emami-Mehrgani, B., J-P. Kenné et S. Nadeau. 2012. « Lockout/tagout and optimal production control policies in failure-prone non-homogenous transfer lines with passive redundancy ». *International Journal of Production Research*, vol. 51, n° 4, p. 1006-1023.

Emami-Mehrgani, B., S. Nadeau et J-P. Kenné. 2011. « Lockout/tagout and operational risks in the production control of manufacturing systems with passive redundancy ». *International Journal of Production Economics*, vol. 132, n° 2, p. 165-173.

Emami-Mehrgani, B., S. Nadeau et 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, n° 4, p. 453-470.

- Emami-Mehrgani, B., W-P. Neumann, S. Nadeau et M. Bazrafshan. 2015. « Considering human error in optimizing production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems ». *Applied Mathematical Modelling*.
- Faber, M., J. Bützler et C. Schlick. 2015. « Adaptive assembly sequence planning with respect to ergonomic work conditions ». In *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA*. Vol. 9, p. 14.
- Fu, C-M. 2002. « Optimization for simulation: Theory vs. practice ». *INFORMS Journal on Computing*, vol. 14, n° 3, p. 192-215.
- Fu, M-C., S. Andradóttir, J-S. Carson, F. Glover, C-R. Harrell, Y-C. Ho, J-P. Kelly et S-M. Robinson. 2000. « Integrating optimization and simulation: research and practice ». In *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*. p. 610-616. Society for Computer Simulation International.
- Géhan, M., B. Castanier et D. Lemoine. 2014. « Integration of Maintenance in the Tactical Production Planning Process under Feasibility Constraint ». In *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*. p. 467-474. Springer.
- Gershwin, S-B. 2002. *Manufacturing Systems Engineering*. Cambridge , Massachussetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Gershwin, S., et J. Kimemia. 1984. *An algorithm for computer control of a flexible manufacturing system, Laboratory for Information and Decision Systems*. M.I.T. Laboratory for Information and Decision Systems with support extended by the National Science Foundation Grant D'MR78-17826.
- Gharbi, A., et J-P. Kenné. 2005. « Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems ». *Computers & industrial engineering*, vol. 48, n° 4, p. 693-707.
- Givi, Z-S., M-Y. Jaber et W-P. Neumann. 2015. « Modelling worker reliability with learning and fatigue ». *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, n° 17, p. 5186-5199.

- Glock, C-H. 2012. « The joint economic lot size problem: A review ». *International Journal of Production Economics*, vol. 135, n° 2, p. 671-686.
- Glynn, P-W. 1990. « Likelihood ratio gradient estimation for stochastic systems ». *Communications of the ACM*, vol. 33, n° 10, p. 75-84.
- Goldberg, D., et J-H. Holland. 1988. « Genetic algorithms and machine learning ». *Machine learning*, vol. 3, n° 2, p. 95-99.
- Grosse, E., C. Glock, M. Jaber et W-P. Neumann. 2015. « Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities ». *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 3, p. 695-717.
- Grusenmeyer, C. 2000. *Interactions maintenance-exploitation et sécurité. Etude bibliographique. 1. Les tâches de maintenance: définitions et caractéristiques contribuant à leur criticité*. INRS_188.
- Grusenmeyer, C. 2005. *Les accidents liés à la maintenance. Etude bibliographique*. INRS-NS_248: INRS.
- Hajji, A. 2004. « Stratégies optimales de production des systèmes manufacturiers en présence de setup ».
- Hajji, A. 2007. « Stratégies de production manufacturière dans un environnement de chaîne d'approvisionnement: approche dynamique stochastique ». École de technologie supérieure.
- Harris, S., et B. Simpson. 2016. « Human Error and the International Space Station: Challenges and Triumphs in Science Operations ». In *14th International Conference on Space Operations*. p. 2406.
- Hlioui, R., A. Gharbi et A. Hajji. 2015. « Replenishment, production and quality control strategies in three-stage supply chain ». *International Journal of Production Economics*, vol. 166, p. 90-102.

- Ho, YC. 1984. « Perturbation analysis methods for discrete event dynamical systems and simulations ». In *Proceedings of the 16th conference on Winter simulation*. p. 170-173. IEEE Press.
- Holland, J-H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Hu, J-Q, P. Vakili et G-X. Yu. 1994. « Optimality of hedging point policies in the production control of failure prone manufacturing systems ». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, n° 9, p. 1875-1880.
- Jaber, M-Y., Z-S. Givi et W-P. Neumann. 2013. « Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process ». *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, n° 12-13, p. 7287-7299.
- Jocelyn, S., D. Burlet-Vienney, L. Giraud et A. Sghaier. 2017. *Robotique collaborative - évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec*. R-974. Montréal: IRSST.
- Kelley, S-M. 2001. *Lockout/tagout: A practical approach*. American Society of Safety Engineers, 208 p.
- Kenné, J-P., et E-K Boukas. 1997. « Maintenance and production control of manufacturing systems with setups ». In *Lectures in Applied Mathematics-American Mathematical Society*. Vol. 33, p. 55-70.
- Kenné, J-P., et E-K. Boukas. 2003. « Hierarchical control of production and maintenance rates in manufacturing systems ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 9, n° 1, p. 66-82.
- Kenné, J-P., et A. Gharbi. 2001. « A simulation optimization approach in production planning of failure prone manufacturing systems ». *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 12, n° 5-6, p. 421-431.
- Kenné, J-P., et A. Gharbi. 2004a. « Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance ». *Computers & industrial engineering*, vol. 46, n° 4, p. 865-875.

- Kenné, J. P., et A. Gharbi. 2004b. « Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 46, n° 4, p. 865-875.
- Khan, F-I., et M. Haddara. 2003. « Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning ». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, n° 6, p. 561-573.
- Kimemia, J., et S-B. Gershwin. 1983. « An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system ». *AIEE Transactions*, vol. 15, n° 4, p. 353-362.
- Kimemia, J., et S-B. Gershwin. 1985. « Flow optimization in flexible manufacturing systems ». *International Journal of Production Research*, vol. 23, n° 1, p. 81-96.
- Kuselman, I. 2015. « RISK OF HUMAN ERROR IN CHEMICAL ANALYSIS ». In *II-я Международная научная конференция «Стандартные образцы в измерениях и технологиях»: Сборник трудов. Часть «Ru». Екатеринбург, Россия: ФГУП «Уральский научно-исследовательский институт метрологии»*, 2015., p. 48.
- Kushner, H, et P Dupuis. 1992. « Numerical methods for stochastic control problems in continuous time ». *Applications of Mathematics*, vol. 24.
- Lee, C-Y., et C-S. Lin. 2001. « Single-machine scheduling with maintenance and repair rate-modifying activities ». *European Journal of Operational Research*, vol. 135, n° 3, p. 493-513.
- Legault, G. 1995. « Un algorithme génétique pour la conception topologique de réseaux téléinformatiques à commutation de paquets ». Universite du Quebec a Montreal.
- Lind, S. 2008. « Types and sources of fatal and severe non-fatal accidents in industrial maintenance ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, n° 11-12, p. 927-933.
- Lind, S. 2009. « Accident sources in Industrial maintenance operations proposals for identification, modelling and management of accident risks ». *VTT Publications*, n° 710, p. 1-123.

Mario, S. 2012a. « L'après-implantation d'un système de cadenassage – Partie 2_ L'audit et le suivi de performance ». Message envoyé à *Blogue du Groupe ID*

Mario, S. 2012b. « le suivi après l'implémentation d'un système de cadenassage: Partie 1: Quelles sont mes obligations? ». Message envoyé à *Blog du Groupe ID*.

Matsuoka, S., et M. Muraki. 2001. « Computer-aided planning for lockout/tagout program ». *Process Safety Progress*, vol. 20, n° 2, p. 130-135.

Mehrabi, M. G., A. G. Ulsoy et Y. Koren. 2000. « Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing ». *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, n° 4, p. 403-419.

MESI. 2016. *Plan d'action en économie numérique- Feuille de route - Industrie 4.0 - Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI)*. Montréal (QC), 40 p.

Molina, A., C-A. Rodriguez, H. Ahuett, J-A. Cortes, M. Ramírez, G. Jiménez et S. Martinez. 2005. « Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 18, n° 7, p. 525-536.

Nakagawa, T., K. Nishi et K. Yasui. 1984. « OPTIMUM PREVENTIVE MAINTENANCE POLICIES FOR A COMPUTER SYSTEM WITH RESTART ». *IEEE Transactions on Reliability*, vol. R-33, n° 4, p. 272-276.

Neumann, W-P., et J. Dul. 2010. « Human factors: spanning the gap between OM and HRM ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 30, n° 9, p. 923-950.

Njike, A-N., R. Pellerin et J-P. Kenné. 2011. « Maintenance/production planning with interactive feedback of product quality ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 17, n° 3, p. 281-98.

- Noroozi, A., N. Khakzad, F. Khan, S. MacKinnon et R. Abbassi. 2013. « The role of human error in risk analysis: Application to pre- and post-maintenance procedures of process facilities ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 119, n° 0, p. 251-258.
- Noroozi, A., F. Khan, S. MacKinnon, P. Amyotte et T. Deacon. 2014. « Determination of human error probabilities in maintenance procedures of a pump ». *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, n° 2, p. 131-141.
- Olsder, GJ, et R Suri. 1980. « Time-optimal control of parts-routing in a manufacturing system with failure-prone machines ». In *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on*. p. 722-727. IEEE.
- Ouaret, S., J-P Kenné, A. Gharbi et V. Polotski. 2015. « Age-dependent production and replacement strategies in failure-prone manufacturing systems ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*.
- Park, K-S. 2014. *Human reliability: Analysis, prediction, and prevention of human errors*. Elsevier.
- Pintelon, L. M., et L. F. Gelders. 1992. « Maintenance management decision making ». *European Journal of Operational Research*, vol. 58, n° 3, p. 301-317.
- Poyard, J-L. 2016. « De la conception au recyclage d'une machine, la sécurité avant tout ». *Revue Hygiène et sécurité du travail*, vol. INRS-DO 15, n° NRS-DO 15, p. 5.
- Raj, T, R Shankar et M Suhaib. 2008. « An ISM approach for modelling the enablers of flexible manufacturing system: the case for India ». *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 24, p. 6883-6912.
- Raouf, A., et M. Ben-Daya. 1995. *Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments*, Vol. 23. Elsevier, 316 p.
- Rasmussen, J. 1983. « Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models ». *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, n° 3, p. 257-266.

Reason, J. 2000. « Human error: models and management ». *Western Journal of Medicine*, vol. 172, n° 6, p. 393.

Reason, J. 2016. *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.

Rettino-Parazelli, K. 2017. « Technologies numériques. Le Québec en tête de liste. Près d'une entreprise sur deux a entamé ou complété le virage, plus que dans le reste du Canada ». (Montreal). < <http://www.ledevoir.com/economie/actualites-economiques/499952/technologies-numeriques-le-quebec-en-tete-de-liste> >.

Rishel, R. 1975. « Dynamic programming and minimum principles for systems with jump Markov disturbances ». *SIAM Journal on Control*, vol. 13, n° 2, p. 338-371.

Rivera-Gómez, H., A. Gharbi, J-P. Kenné, O. Montaño-Arango et E. Hernandez-Gress. 2016. « Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system ». *International Journal of Production Economics*, vol. 171, Part 1, p. 134-150.

Robinson, T. 2008. « Design and analysis of industrial experiments ». *Statistical Practice in Business and Industry*, p. 137-161.

Saucier, M. 2012. « Le suivi après l'implantation d'un système de cadenassage ». In *Conférence présentée au congrès de l'AQHSST*. (Gatineau), sous la dir. de ID, Blogue du Groupe. Blogue du Groupe ID.

Sethi, A-K., et S-P. Sethi. 1990. « Flexibility in manufacturing: a survey ». *International journal of flexible manufacturing systems*, vol. 2, n° 4, p. 289-328.

Tchiehe, D-N., et F. Gauthier. 2017. « Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety ». *Safety science*, vol. 92, p. 138-147.

U.S. Army Material Command, Department of the Army, Washington, D.C., . 1972. *AMCP 706-134, Maintainability Guide for Design*.

- Valdez-Flores, C., et R-M. Feldman. 1989. « A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems ». *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 36, n° 4, p. 419-446.
- Väyrynen, S. 1984. « Safety and ergonomics in the maintenance of heavy forest machinery ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 16, n° 2, p. 115-122.
- Venkatraman, N. 2012. « Business performance and maintenance: How are safety, quality, reliability, productivity and maintenance related? ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 18, n° 2, p. 183-195.
- Wang, H. 2002. « A survey of maintenance policies of deteriorating systems ». *European Journal of Operational Research*, vol. 139, n° 3, p. 469-489.
- Whittingham, R-B. 2004. *The blame machine - Why human error causes accidents*. Routledge, Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 288 p.