

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Eng.

PAR
PHILIPPE LAVOIE

OPTIMISATION DE LA COMMANDE DES LIGNES DE PRODUCTION
HOMOGÈNES SUJETTES À DES PANNES DES MACHINES

MONTRÉAL, LE 7 AVRIL 2006

CE MEMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Pierre Kenné, directeur de mémoire

Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ali Gharbi, codirecteur de mémoire

Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Hakim Artiba, président du jury

Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, professeur

Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 28 FÉVRIER 2006

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

OPTIMISATION DU CONTRÔLE DES LIGNES DE PRODUCTION HOMOGENES SUJETTES A DES PANNES DES MACHINES

Philippe Lavoie

SOMMAIRE

Nous considérons le problème de commande du taux de production de machines sujettes à des pannes composant une ligne de production en tandem. L'objectif est de trouver la loi de commande qui permettra de minimiser le coût moyen de détention et de rupture. Il est montré que la complexité du problème ne permet pas une résolution à l'aide de l'approche analytique. Suite à ce constat, une structure de loi de commande est obtenue analytiquement pour des systèmes dont la solution analytique est possible. Cette structure de loi de commande paramétrée est étendue à la commande de la ligne de production. Une approche combinant la simulation combinée discrète/continue, les plans d'expériences et les surfaces de réponses est ensuite appliquée pour optimiser cette loi de commande en fonction de l'indicateur du coût. Il est montré que la modélisation combinée discrète/continue permet de faire des gains de temps considérables par rapport à la simulation par événements discrets.

Constatant les limites de l'approche proposée pour les lignes de production de grande taille, une heuristique basée sur un profil paramétré permettant de réduire le problème d'optimisation des lignes longues est proposée. Cette heuristique a permis d'optimiser une ligne à 20 machines, qui aurait été impossible à accomplir avec l'approche initiale proposée.

Finalement, une étude comparative de différentes heuristiques de contrôle de la production (mécanismes de contrôle) en fonction des coûts de détention (inventaire et stockage) est effectuée. Nous concluons que le mécanisme hybride est le plus performant lorsque le coût de stockage est considéré explicitement mais qu'il est équivalent au mécanisme CONWIP lorsque les coûts de stockage sont agrégés aux coûts d'inventaire. Il est également montré que le mécanisme kanban est plus performant que le mécanisme CONWIP lorsque les coûts de stockage sont non négligeables et la ligne relativement longue.

OPTIMAL CONTROL OF HOMOGENOUS PRODUCTION LINES WITH MACHINES SUBJECT TO FAILURES

Philippe Lavoie

ABSTRACT

We consider the problem of controlling the production rates of failure prone machines composing homogenous transfer lines. The objective of the problem is to find the control strategy that minimizes the average holding and backlog costs. It is shown that the complexity of the problem makes it impossible to solve analytically. Following this observation, the structure of a control policy is obtained by solving the control problem for simpler systems. This parameterized structure is then extended to the production line problem. An experimental approach composed of combined discrete/continuous simulation modelling, design of experiments and response surface methodology is used to optimize the proposed control policy in relation with the average cost. It is shown that the combined discrete/continuous simulation modelling allows important reductions in computational time compared to discrete event simulation modelling.

Observing the limitations of the proposed approach for long lines, a heuristic method based on a parameterized profile is proposed. This heuristic reduces the complexity of the optimization problem by reducing the number of variables, allowing the optimization of a 20 machine line example that would have been impossible to solve using the initial approach.

Finally, a comparative study of the minimum total holding (inventory and storage) and backlog cost for different production control heuristics (control mechanisms) is proposed. We conclude that the hybrid mechanism yields the best results when the storage costs are considered explicitly. We also show that the hybrid mechanism is equivalent to the CONWIP mechanism when storage costs are aggregated to the inventory costs, both outperforming kanban. Furthermore, the kanban mechanism is shown to outperform CONWIP when storage costs increase and the line is relatively long.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les professeurs Jean-Pierre Kenné et Ali Gharbi de l'École de technologie supérieure (ÉTS) pour leur direction de ce travail, leur soutien autant technique que financier et la grande confiance dont ils ont fait preuve à mon égard. La grande liberté d'action qu'ils m'ont accordée m'a permis de développer grandement mon sens de l'autonomie, d'autocritique et de gestion du temps. Ils ont su me laisser tracer mon chemin tout en posant les balises nécessaires à ce que je ne m'égare pas dans les dédales de la recherche industrielle.

J'aimerais également remercier l'ÉTS pour son soutien financier via le programme des bourses d'incitation qui m'a permis de passer ces deux années en me concentrant sur mes travaux plutôt que des questions financières. Je voudrais également souligner la grande collaboration et le dévouement du Bureau des relations internationales (BRI) de l'ÉTS dans la réalisation des échanges étudiants internationaux et le programme des Bourses d'aide à la mobilité du Ministère de l'éducation du Québec.

Ces deux années n'auraient sûrement pas été aussi agréables sans la présence de Florence, qui a toujours compris l'importance pour moi de ce projet de recherche et l'investissement en temps que son aboutissement demandait. Je suis également reconnaissant envers ma famille qui m'a toujours encouragé et soutenu dans mes démarches et m'a transmis le goût du travail bien fait.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABBRÉVIATIONS ET DES SIGLES	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 COMMANDE DES LIGNES DE PRODUCTION	2
1.1 Techniques analytiques	5
1.2 Mécanismes de contrôle des flux de production	6
1.3 Techniques de décomposition	7
1.4 Méthodes d'optimisation en simulation	9
1.5 Sujets de recherche abordés	10
CHAPITRE 2 OPTIMISATION DE LA PRODUCTION ET MODÈLE DE SIMULATION COMBINÉ DISCRET/CONTINU.....	12
2.1 Introduction	12
2.2 Énoncé du problème.....	16
2.3 Approche proposée.....	20
2.4 Modèle de simulation combinée discrète/continue	25
2.5 Validation du modèle de simulation.....	29
2.6 Comparaison des approches de modélisation pour la simulation	31
2.7 Résultats d'optimisation et analyse	34
2.8 Conclusion.....	41
CHAPITRE 3 OPTIMISATION DES MÉCANISMES DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION DES LIGNES LONGUES	42
3.1 Introduction	42
3.2 Formulation du problème	45
3.3 Approche expérimentale	48
3.4 Modèle de simulation.....	51
3.5 Plans d'expériences et surfaces de réponse.....	52
3.6 Exemples numériques et analyse des résultats.....	54
3.7 Distribution de l'espace de stockage en fonction du profil observé	59
3.8 Conclusion.....	63

CHAPITRE 4	ÉTUDE COMPARATIVE DE MÉCANISMES DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION À FLUX TIRÉS	64
4.1	Introduction	64
4.2	Mécanismes et critère de performance.....	69
4.2.1	Kanban	69
4.2.2	CONWIP	71
4.2.3	Hybride kanban/CONWIP	73
4.3	Mesure de performance.....	74
4.4	Approche proposée et modèles de simulation.....	76
4.5	Analyse des résultats	77
4.5.1	Analyse des résultats pour l'exemple avec kanban	77
4.5.2	Analyse des résultats pour l'exemple avec CONWIP.....	80
4.5.3	Analyse des résultats pour l'exemple avec hybride	80
4.6	Analyse de sensibilité.....	84
4.7	Discussion	89
4.8	Conclusion.....	90
	CONCLUSION	92
	ANNEXE 1 Modèle de simulation combiné discret/continu	93
	ANNEXE 2 Explication détaillée des modèles de simulation	106
	BIBLIOGRAPHIE	129

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Résultats de validation pour le taux de production asymptotique. 31
Tableau II	Paramètres des machines pour les cas présentés..... 32
Tableau III	Comparaison des coûts et résultats de chronométrage..... 33
Tableau IV	ANOVA pour les résultats de l'inventaire..... 37
Tableau V	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire. 37
Tableau VI	ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$ 38
Tableau VII	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$ 39
Tableau VIII	Valeurs optimales des paramètres et coûts résultants. 39
Tableau IX	Résultats pour la ligne à quatre machines..... 54
Tableau X	Résultats pour la ligne à cinq machines 55
Tableau XI	Résultats pour la ligne à six machines 55
Tableau XII	Résultats pour la ligne à sept machines 55
Tableau XIII	Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour cinq machines..... 59
Tableau XIV	Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour six machines..... 59
Tableau XV	Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour sept machines 59
Tableau XVI	Résultats pour l'optimisation avec le profil pour l'exemple à 20 machines..... 60
Tableau XVII	Paramètres communs pour tous les cas étudiés. 77
Tableau XVIII	ANOVA pour les résultats de l'inventaire. 78
Tableau XIX	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire (kanban) 78
Tableau XX	ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$ (kanban). 77
Tableau XXI	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$ (kanban). 78

Tableau XXII	Configuration optimale, estimation du coût et validation (kanban)....	78
Tableau XXIII	Configuration optimale, estimation du coût et validation (CONWIP)	79
Tableau XXIV	ANOVA pour les résultats de l'inventaire.....	82
Tableau XXV	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire (hybride).	81
Tableau XXVI	ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de 1/2 (hybride).	83
Tableau XXVII	Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de 1/2 (hybride).	83
Tableau XXVIII	Configuration optimale, estimation du coût et validation (hybride)...	84
Tableau XXIX	Résultats pour les lignes à quatre machines.....	84
Tableau XXX	Résultats pour les lignes à cinq machines.....	85
Tableau XXXI	Résultats pour les lignes à six machines.....	85
Tableau XXXII	Résultats pour les lignes à sept machines.....	86

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Une ligne de production à m machines..... 2
Figure 2	Phénomène de propagation des pannes dans une ligne de production 4
Figure 3	Un système à m machines produisant un type de produit 16
Figure 4	Inventaire et rupture moyens 21
Figure 5	Exemple graphique de la modélisation par événements discrets 24
Figure 6	Exemple graphique de la modélisation combinée discrète/continue..... 24
Figure 7	Diagramme du modèle de simulation..... 27
Figure 8	Dynamique des stocks 29
Figure 9	Plan d'expériences central composite à trois paramètres 35
Figure 10	Courbes de niveau pour la surface de la fonction coût..... 39
Figure 11	Diagramme de transition d'états pour la machine $M_i; i=1, \dots, m.$ 46
Figure 12	Diagramme de la méthodologie proposée 49
Figure 13	Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à quatre machines 56
Figure 14	Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à cinq machines 56
Figure 15	Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à six machines 57
Figure 16	Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à sept machines..... 57
Figure 17	Profil paramétré à 4 variables..... 60
Figure 18	Mécanisme kanban pour une ligne à $m=4$ machines 69
Figure 19	Mécanisme CONWIP pour une ligne à $m=4$ machines..... 71
Figure 20	Mécanisme hybride pour une ligne à $m=4$ machines. 73
Figure 21	Coût total pour CONWIP vs Z4 ($c^+=1, c^-=100, c^{st}=0.1$)..... 81

LISTE DES ABBRÉVIATIONS ET DES SIGLES

m	Nombre de machines de la ligne
M_i	Machine ou poste de travail i
B_i	Zone de stockage i
$MTTF_i$	Moyenne des temps de bon fonctionnement de M_i
$MTTR_i$	Moyenne des temps de réparation de M_i
λ_i	Taux de panne de M_i
μ_i	Taux de réparation M_i
e_i	Efficacité d'une machine individuelle (disponibilité asymptotique) de M_i
$\xi_i(t)$	État opérationnel de M_i à l'instant t
$u_i(t)$	Consigne de taux de production désiré de M_i à l'instant t
u_{max}	Taux de production maximum
T	Temps total de la simulation, horizon de planification
WU	Durée du temps de réchauffement de la simulation
$T.C.$	Temps de calcul informatique
$x_i(t)$	Niveau du stock tampon i à l'instant t
$x_m^+(t)$	Niveau du stock de produit fini lorsqu'il est positif
$x_m^-(t)$	Niveau du stock de produit fini lorsqu'il est négatif
\bar{x}^+	Niveau d'en-cours moyen
\bar{x}^-	Niveau de rupture moyen
BC_i	Capacité du stock i
d	Taux de la demande de produits finis
$d_i(t)$	Taux de la demande instantanée au stock B_i
Z_i	Paramètre i du mécanisme de contrôle
Z	Vecteur des paramètres pour un mécanisme
Z^*	Vecteur des paramètres optimaux pour un mécanisme

c^+	Coût unitaire de l'inventaire
c^-	Coût unitaire de rupture
c^{st}	Coût unitaire de stockage
\bar{C}	Coût moyen
C^*	Coût optimal
\tilde{C}^*	Coût optimal estimé
\tilde{C}_i	Coût moyen estimé de l'échantillon i
\tilde{C}	Coût estimé
C_{ij}	Coût de l'expérience de j de l'échantillon i
ρ	Taux d'escompte
S_i	Écart type de l'échantillon i
\widetilde{PR}	Taux de production estimé
IC	Intervalle de confiance
H_0	Hypothèse nulle du test de confiance
H_1	Hypothèse non nulle du test de confiance
CCD	Plan d'expériences de type central composite

INTRODUCTION

Dans le contexte industriel actuel, avec la complexification constante des systèmes de production, le raccourcissement du cycle de vie des produits et une compétition toujours plus importante induite par la mondialisation, les industriels sont toujours à la recherche de façons d'améliorer le rendement de leurs systèmes de production. Parmi les différentes catégories de systèmes de production, les lignes de production constituent une classe importante par leur utilisation en production de masse et nécessitent des investissements en capital importants. Elles sont généralement constituées de machines hautement spécialisées dédiées à un type de production. Les propriétaires d'un tel système désirent donc un retour au point de rentabilité le plus rapide possible.

Le problème du contrôle optimal des lignes de production homogènes dont les machines sont sujettes à des pannes est considéré dans ce travail. L'objectif du problème est d'obtenir la loi de commande des machines qui permettrait de minimiser les coûts de détention (inventaire et stockage) et de rupture. Compte tenu de sa nature stochastique, l'obtention de la politique optimale est un problème d'une grande complexité. Nous présentons dans le Chapitre 1 le problème de façon générale. Trois volets du sujet de recherche sont ensuite abordés :

- Suite à la démonstration de l'impossibilité d'obtenir une solution analytique au problème, une méthode permettant l'obtention d'une solution désirable du problème dans un délai raisonnable est proposée.
- La complexité du problème d'optimisation croissant de façon exponentielle avec la longueur de la ligne, ce qui rend impossible l'utilisation de la méthode proposée initialement, nous développons une heuristique permettant de réduire le nombre de variables du problème d'optimisation est développée.
- Finalement, une étude comparative de différents mécanismes de contrôle de la production existants est effectuée.

CHAPITRE 1

COMMANDE DES LIGNES DE PRODUCTION

Nous analysons le problème des lignes de production homogènes avec un type de produit. Ce type de système est constitué d'une série de machines (ou de postes de travail) en tandem sujettes à des pannes dépendantes du temps. Les temps de bon fonctionnement et les temps de réparation sont distribués selon une loi de probabilité exponentielle avec comme moyenne $MTTF$ et $MTTR$ respectivement. Le taux de production maximum de chaque machine est noté u_{max} . Chaque paire de machines est séparée par un stock tampon ($B_i; i=1, \dots, m-1$). Chaque pièce passe par chaque machine et chaque stock tampon, avant d'aboutir dans le stock de produits finis. La demande à taux constant (d) est satisfaite à partir du stock de produit fini (B_m). L'approvisionnement en matière première de la machine M_1 est considéré infini et tous les temps de transport sont considérés nuls. Ce système est illustré à la figure 1 où les machines sont représentées par des cercles et les stocks par des triangles.

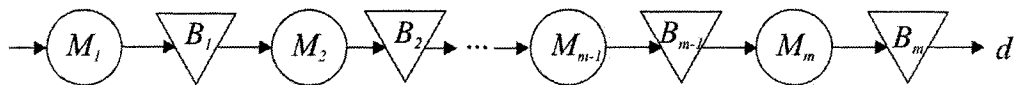


Figure 1 Une ligne de production à m machines

Les demandes qui ne sont pas satisfaites sont mises en rupture en attente d'être comblées. Si la tendance est à réduire les inventaires au maximum, les stocks tampons restent néanmoins nécessaires aux bonnes performances de la ligne. En effet, si la ligne ne comportait aucune source de variabilité, les stocks tampons seraient inutiles. Puisque aucun système réel n'est parfaitement déterministe, des mesures doivent être prises pour se prémunir contre les événements imprévus. C'est particulièrement le cas des lignes de production dont les machines sont sujettes à des pannes aléatoires. Une telle ligne sans

stock tampon aura de pertes d'efficacité causées par la propagation des effets de panne qui peuvent être très importantes. L'efficacité maximale de la ligne de production pour des machines sujettes à des pannes dépendant du temps, sans stock tampon est égale au produit de l'efficacité de toutes les machines tel qu'à l'équation (1.1) :

$$E_{TDF} = \prod_{i=1}^m e_i \quad (1.1)$$

Avec l'efficacité individuelle des machines donnée par l'équation (1.2).

$$e_i = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i} \quad (1.2)$$

Pour augmenter l'efficacité de la ligne, et donc sa capacité de production, nous avons recours à des stocks tampons. Ces stocks servent à limiter la propagation des effets de panne par le désamorçage et le blocage. Le désamorçage se produit lorsqu'une machine opérationnelle ne peut plus produire parce que son approvisionnement est épuisé. Le blocage se produit lorsqu'une machine opérationnelle ne peut plus produire parce que le stock où elle envoie les pièces après production est plein. La figure 2 (a)-(d) illustre ces phénomènes.

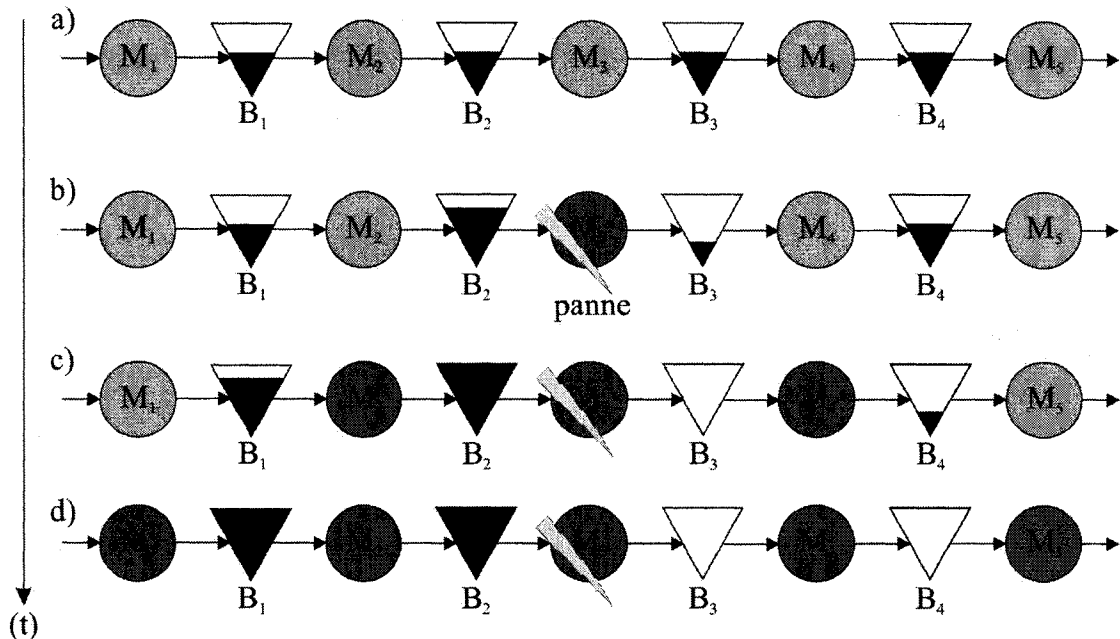


Figure 2 Phénomène de propagation des pannes dans une ligne de production

Sur la figure 2 (a), toutes les machines sont opérationnelles, ont de la matière en approvisionnement et de l'espace de stockage pour les pièces traitées. À la figure 2 (b), une panne survient à la machine M_3 . Par la suite, le stock B_2 se remplit et le stock B_3 se vide. Une fois le stock B_2 plein et le stock B_3 vide, l'effet de la panne se propage à la machine M_2 par blocage et M_4 par désamorçage (Figure 2 (c)). Si la panne est d'une durée suffisante, l'effet se propagera à la machine M_1 par blocage et M_5 par désamorçage (Figure 2 (d)). Des stocks tampons plus grands ont donc plus de chances de prémunir la ligne contre la propagation des effets de panne. Cependant, ces stocks tampons génèrent des coûts liés à l'inventaire et au stockage (Stevenson & Hojati (2001)). Des stocks tampons trop importants dégradent donc les performances du système. Il se pose alors le problème du dimensionnement de ces stocks tampons. De façon plus globale, le problème concerne la loi de commande des machines de la ligne production, ce qui inclue également le transfert d'information le long de la ligne et les décisions conséquentes, la taille des stocks tampons étant fonction de cette stratégie de commande de la ligne.

La littérature concernant la commande des lignes de production est vaste. Elle est d'autant plus vaste que de nombreuses variantes des ces lignes peuvent exister : machines fiables, machines sujettes à des pannes, temps d'opération sur une pièce déterministe ou aléatoire, taux de qualité de 100% ou pièces retravaillées, temps de transport nuls ou non, etc... Nous proposons ici un survol général de la littérature concernant les lignes de production avec une préférence pour les systèmes identiques ou proches de celui étudié dans le présent document. Nous relevons de façon grossière quatre sujets principaux : les méthodes analytiques, les mécanismes de contrôle de la production, les méthodes de décomposition et les techniques d'optimisation en simulation.

1.1 Techniques analytiques

Les méthodes analytiques exactes ont des applications pratiques limitées pour les systèmes de production en général, du moins à ce jour. Par contre, de nombreuses contributions importantes sont issues de l'étude analytique de ces systèmes. En particulier Gershwin & Schick (1979) ont proposé la solution analytique d'une ligne à deux machines séparées par un stock tampon et Gershwin & Schick (1980) ont proposé la solution d'une ligne semblable mais dont le flux de matières est continu. Ces contributions serviront plus tard au développement de méthodes de décomposition qui occupent une place importante dans le domaine. Une solution pour une ligne à trois machines a également été présentée dans Gershwin & Schick (1983) mais son application reste limitée à ce cas. Pour les systèmes de production à une machine et un produit, Akella & Kumar (1986) ont proposé une solution au problème de commande optimale du taux de production. Leur approche ne permet pas d'obtenir la politique optimale pour des cas complexes, mais la structure de la loi de commande obtenue peut être adaptée pour les lignes de production. Presman et al. (1995) ont analysé les lignes de production dans le contexte d'obtention d'une politique optimale. Par contre, la complexité croît de façon fulgurante avec le nombre de machines ; ce qui en empêche la

résolution pour des cas généraux. Karaesmen & Dallery (2000) ont également utilisé un modèle analytique d'une ligne à deux machines pour comparer les propriétés structurales et les performances de plusieurs mécanismes de production. De façon générale, les approches analytiques ne permettent pas d'obtenir la politique optimale pour le système étudié, sauf dans des cas très particuliers. Les résultats qui en découlent pour des systèmes simples donnent par contre une structure de loi de commande qui peut être adaptée à des systèmes plus complexes (politique du « hedging point ») ou des blocs pour la construction de méthodes de décomposition.

1.2 Mécanismes de contrôle des flux de production

Une partie importante de la littérature sur les lignes de production concerne différents mécanismes de contrôle des flux de production et d'information. En l'absence de solution analytique exacte pour la commande des machines, ces mécanismes sont des heuristiques pratiques pour la gestion des lignes qui sont relativement faciles à mettre en place et permettent d'obtenir des performances plus ou moins intéressantes selon le mécanisme et sa configuration. Il en existe aujourd'hui un nombre important et il s'en de nouveaux sont proposés régulièrement. Introduit chez Toyota dans les années 70, kanban est le premier mécanisme à flux tirés défini comme tel. Une littérature abondante sur ce mécanisme témoigne du très grand intérêt que chercheurs et praticiens lui ont porté. Berkley (1992) a proposé une revue détaillée de la littérature disponible ce moment. Spearman et al. (1990) ont proposé le mécanisme CONWIP comme alternative à kanban. Framinan et al. (2003) ont proposé une revue de la littérature concernant ce mécanisme. Des mécanismes récents proposés sont l'hybride kanban/CONWIP (hybride, Bonvik (1996) et Bonvik et al. (1997)), « generalized kanban », (GKCS, Frein et al. (1995)) et « Extended kanban control system» (EKCS, Dallery & Liberopoulos (2000)). Hybride et EKCS sont le résultat de la combinaison de deux mécanismes existants soit kanban/CONWIP et kanban/Base stock respectivement. Il est également à noter que malgré les performances préliminaires intéressantes, GKCS

et EKCS présentent deux paramètres par poste de travail contre un par machine pour kanban, « base stock », hybride et un seul paramètre pour tout le système pour CONWIP. Un nombre de paramètres accru complexifie le problème d'optimisation de façon importante. Plusieurs études comparatives avec des critères et des systèmes différents ont été conduites au fil des années. Plusieurs études comparent différents mécanismes (Bonvik (1996), Bonvik et al. (1997), Roderick et al. (1994), Muckstadt & Tayur (1995), Huang et al. (1998), Duri et al. (2000a), Geraghty & Heavey (2004)). Ces comparaisons sont généralement effectuées sur un système particulier sans varier les paramètres ou la longueur de la ligne. Les critères de performance diffèrent généralement entre les études ce qui complique la synthèse des observations faites. Derrière les études comparatives se cache un problème d'optimisation complexe, puisque tous les mécanismes doivent être comparés dans leur configuration optimale en rapport avec les critères de performance choisis. Généralement, les auteurs procèdent à une simulation exhaustive de toutes les combinaisons possibles, ce qui résulte en un très grand nombre de combinaisons. Cette technique ne peut cependant s'appliquer qu'à des systèmes avec peu de paramètres ou peu de valeurs possibles par paramètre. Des techniques d'optimisation peuvent cependant être utilisées pour plus d'efficacité.

1.3 Techniques de décomposition

Une portion significative de la littérature sur les lignes de production concerne les méthodes de décomposition. Ces méthodes, développées pour pallier à la lenteur de la simulation par événements discrets et l'absence de méthodes analytiques efficaces, ont l'avantage d'être très rapides. Elles s'appuient le plus souvent sur les solutions de lignes à deux machines avec un stock tampon de Gershwin & Schick (1979) et Gershwin & Schick (1980). Gershwin (1987) a présenté le premier de ces algorithmes pour le cas de pièces discrètes. Dallery et al. (1989) ont amélioré la technique avec l'introduction de l'algorithme DDX (Dallery-David-Xie) qui utilise un flux de matière continu. Di Mascolo et al. (1991) a étendu la technique à des lignes d'assemblage (arborescences),

Baynat & Dallery (1993a) à des systèmes à boucle fermée et Baynat & Dallery (1993b) à des lignes avec embranchements convergents et divergents (« fork/join »). Burman (1995) a amélioré encore la technique en permettant l'analyse de lignes non-homogènes et Frein et al. (1996) des lignes à boucles fermées avec stocks tampons finis, semblable au mécanisme hybride mais dans le contexte de demande saturée. Bonvik et al. (2000) ont adapté la technique pour l'évaluation des performances d'une ligne avec un mécanisme hybride soumis à une demande constante de produits finis permettant la rupture du stock de produits finis. Généralement, ces contributions ont utilisé des distributions de pannes et de réparations exponentielles seulement. Dallery & Le Bihan (1999) ont cependant présenté une technique de décomposition permettant d'approximer les distributions par deux moments (au lieu de la moyenne uniquement) par l'utilisation d'exponentielles généralisées. Les outils présentés servent généralement à évaluer les performances du système, le plus souvent le taux de production asymptotique et le niveau des stocks, sans optimiser le système. Schor (1995) a proposé des algorithmes permettant d'optimiser la répartition de l'espace de stockage disponible ou minimiser l'espace de stockage sous contrainte de taux de production asymptotique et Sadr & Malhame (2004) un algorithme de décomposition/agrégation pour la minimisation du coût d'inventaire et de rupture. Théoriquement, les outils pour permettre l'évaluation des coûts de possession et de rupture sont disponibles pour la plupart des mécanismes de contrôle de la production. Cependant, ces méthodes ont montré à plusieurs reprises un manque de précision important, particulièrement sur le niveau moyen de rupture. Leur utilisation dans des cadres de minimisation des coûts de possession et de rupture est donc problématique. De plus, comme la modélisation des multiples mécanismes nécessite l'utilisation de « blocs » différents, la comparaison des performances est difficile.

1.4 Méthodes d'optimisation en simulation

Un quatrième thème ayant récemment reçu une attention significative concerne les méthodes d'optimisation pour la simulation. Banks (1998) a proposé une revue de techniques d'optimisation adaptées à l'optimisation pour des modèles de simulation avec variables discrètes ou continues. Relié plus directement au problème étudié dans le présent document, Gaury et al. (2000) ont utilisé un algorithme d'évolution pour choisir entre un mécanisme de contrôle de la production de type kanban, CONWIP ou hybride. Gaury et al. (2001) ont utilisé un algorithme semblable afin de choisir quelles boucles de d'étiquettes de production devraient être implantées sur mécanisme générique. Kleijnen & Gaury (2003) ont proposé une méthodologie pour optimiser la robustesse d'un mécanisme de contrôle de la production à l'aide de simulation par événements discrets, algorithmes génétiques et de surfaces de réponse. Ils notent par contre que les algorithmes génétiques sont réputés pour être lents et que des heuristiques d'optimisation plus efficaces pourraient être utilisées pour améliorer la méthodologie. Kochel & Nielander (2002) ont également utilisé des algorithmes génétiques mais pour optimiser le nombre de cartes kanban et la taille du lot pour chaque kanban. Une approche pour l'optimisation de systèmes manufacturiers par l'utilisation de plans d'expérience et de surfaces de réponse a été utilisée par Kenné & Gharbi (2001, 2004a) pour différents systèmes simples ainsi que par Rioux (2001) pour quelques problèmes dont l'optimisation des stocks tampons d'une ligne de production à cinq machines. Suite à l'observation du profil du « bol inversé » dans la distribution optimale d'un espace total déterminé pour la maximisation du taux de production (Hillier et al. (1993)), Hillier (2000) a proposé un profil paramétré pour la distribution de l'espace de stockage. Ce profil a comme objectif de réduire l'effort d'optimisation pour ce type de problème, qui tient uniquement compte de l'espace de stockage dans un contexte de demande saturée. Il néglige les coûts de possession et de rupture. Toutes les contributions citées (à l'exception de Banks (1998) qui présente uniquement des techniques) ont utilisé la simulation par événements discrets comme outil d'évaluation

des performances. Quoiqu'il soit très efficace, cet outil peut prendre un temps important pour effectuer une seule simulation. Dans des études d'optimisation nécessitant un nombre important d'expériences, la simulation par événements discrets peut s'avérer handicapante, voire inutilisable.

1.5 Sujets de recherche abordés

Nous abordons trois aspects du sujet de recherche dans la suite de ce travail. Chacun des chapitres suivants traite d'un aspect, se lit de façon relativement indépendante du reste du mémoire et comporte un résumé et une conclusion. Premièrement, nous proposons dans le Chapitre 2 une approche pour contourner les limites de l'approche de commande optimale stochastique, dont la solution analytique ne peut être obtenue que pour des cas simples. Cette approche consiste à adopter la structure de la loi de commande obtenue par la résolution des cas simples dont la solution analytique est possible et de l'adapter au fonctionnement de la ligne de production. L'optimisation de la loi de commande ainsi obtenue, en fonction du coût de possession et de rupture, nécessite l'utilisation d'un outil d'évaluation des performances efficace. Comme nous l'avons vu plus haut, les méthodes de décomposition manquent de précision pour l'évaluation des coûts de possession et de rupture. Nous avons donc recours à une approche composée de simulation, de plans d'expériences et de surfaces de réponses. Pour accélérer le processus d'optimisation, nous proposons également au chapitre 2 l'utilisation d'un modèle de simulation combinée discrète/continue. Cette modélisation nous permettra d'optimiser des lignes en un temps de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fois inférieur au temps qu'il n'aurait été nécessaire à l'aide de simulation par événements discrets.

Malgré la grande rapidité du modèle proposé au chapitre 2 par rapport à la simulation par événements discrets, la complexité du problème croît de façon exponentielle avec le nombre de machines de la ligne. Cette complexité empêche la résolution de problèmes

d'optimisation pour des lignes longues. Nous proposons donc au chapitre 3 une approche heuristique basée sur le profil observé dans la distribution des valeurs des paramètres de la loi de commande, paramètres qui sont également les capacités des stocks tampons de la ligne. Cette approche nous permettra de résoudre des problèmes d'optimisation pour des lignes longues qui auraient été autrement impossibles à résoudre.

Finalement, de nombreux mécanismes de contrôle de la production ont été développés pour améliorer les performances des lignes de production. Cependant, si plusieurs études comparatives ont été conduites, peu comparent plus de deux mécanismes ou les comparent sur plus d'un système. De plus, nous remarquons que si les études comparatives portent souvent attention au niveau d'inventaire comme indicateur de performance, rares sont celles qui incorporent directement le coût de l'espace de stockage dans leur évaluation des performances. Ne pas pénaliser cet espace revient à avantager certains mécanismes et à en désavantager d'autres. Entre autre, le mécanisme CONWIP nécessite beaucoup d'espace de stockage, mais cette donnée n'est jamais prise en considération dans les études comparatives. Il est fort probable que la dissociation des coûts d'inventaire et des coûts de stockage influence les résultats des études comparatives de façon significative. Nous proposons donc au chapitre 4 une étude comparative entre les mécanismes kanban, CONWIP et l'hybride kanban/CONWIP en fonction des coûts de détention et de rupture. Dans cette étude nous considérons des cas où les coûts d'inventaire et de stockage sont agrégés ensemble dans le coût de détention et d'autres où ils sont considérés explicitement. Nous montrons ainsi que la dissociation des coûts d'inventaire et de stockage influence de façon significative la performance relative des mécanismes.

CHAPITRE 2

OPTIMISATION DE LA PRODUCTION ET MODÈLE DE SIMULATION COMBINÉ DISCRET/CONTINU

Résumé

L'objectif du problème abordé dans ce chapitre est de déterminer le taux de production instantané des machines qui minimise le coût total moyen d'inventaire et de rupture. En combinant une approche analytique et des outils statistiques axés sur la simulation tels que les plans d'expériences et les surfaces de réponses, nous obtenons une approximation de la politique de contrôle optimale. Un modèle de simulation combiné discret/continu est employé pour obtenir l'estimé du coût en une fraction du temps nécessaire pour la simulation par événements discrets. Cette technique rend possible la résolution de problèmes qui serait autrement trop exigeante en temps de calcul informatique. Nous donnons des exemples numériques d'optimisation et comparons les temps de calcul informatique entre le modèle de simulation à événements discrets et le modèle combiné discret/continu. L'utilisation des plans d'expériences, de surfaces de réponses et de la modélisation combinée discrète/continue nous permet d'obtenir les résultats d'optimisation en un délai relativement court sur des ressources informatiques largement disponibles.

2.1 Introduction

Ce chapitre traite du problème de commande de systèmes de production stochastiques constitués de machines multiples disposées en tandem. La nature stochastique du système est due aux machines le constituant, sujettes à des pannes et des réparations aléatoires. Les variables de décision sont les taux d'entrée aux machines, ce qui influence le nombre de pièces dans les stocks tampons entre les machines et le surplus

Le surplus est la différence entre la production et la demande cumulatives de produits finis. D'un point de vue pratique, il est évident que l'en-cours, l'inventaire le long de la ligne, doit demeurer non-négatif. Puisque l'en-cours et le surplus sont des variables d'état, nous sommes face à un problème d'optimisation problème de commande avec contraintes qui est de déterminer le taux d'entrée aux machines qui minimisera le coût asymptotique d'inventaire et de rupture. Plusieurs auteurs ont contribué au domaine de la planification de la production de systèmes de production flexibles. Le problème devient beaucoup plus complexe avec l'introduction de stocks intermédiaires le long de la ligne, puisqu'ils engendrent des problèmes de commande avec contraintes d'état.

En s'appuyant sur une telle complexité et en observant que des solutions optimales explicites telles que présentées dans Akella & Kumar (1986) n'existent pas, Lou et al. (1994) ont étendu l'approche proposée par ces derniers au problème à deux machines en tandem. Ils ont conduit une étude rigoureuse de la dynamique du système et des conditions frontières s'y rattachant. Une analyse des lignes de production ($m \geq 2$) dans le contexte d'obtention d'une politique de commande déterministe par morceaux optimale a été discutée dans Presman et al. (1995). Un tel système a été étudié dans les travaux de Bai & Gershwin (1994) où les auteurs ont établi un contrôleur hiérarchique pour réguler la production. Le but de ce chapitre est de présenter une approche alternative afin de déterminer les taux de production pour un grand nombre de machines. Le cadre principal développé ici étend les travaux de Kenné & Gharbi (1999) et Gharbi & Kenné (2003) traitant de plans d'expériences en simulation pour la commande de systèmes de production. La simulation par événements discrets peut théoriquement atteindre n'importe quelle précision dans les résultats. Une autre caractéristique désirable de la simulation est qu'elle ne nécessite pas d'hypothèse contraignante quant au type de distribution de probabilité à utiliser pour modéliser les événements aléatoires. D'un autre côté, la simulation est parfois considérée comme trop exigeante en termes de temps. Ce sera particulièrement le cas pour les systèmes présentant beaucoup de

variabilité ou des taux de production élevés puisque la production de chaque pièce exige la génération d'événements multiples, ce qui augmente le temps de calcul.

Dans la littérature scientifique concernant les lignes de production, les techniques de décomposition occupent une place importante. Elles ont été développées pour compenser le manque de techniques analytiques exactes, la complexité des méthodes d'optimisation numérique et l'effort de calcul important que nécessite la simulation. Elles sont des méthodes approximatives qui s'appuient sur des problèmes simplifiés comme la solution analytique exacte de la ligne à 2 machines développée par Gershwin & Schick (1979). Les lignes sont décomposées en une série de lignes à 2 machines, l'une représentant la portion de la ligne en amont du stock tampon et l'autre la portion en aval. Dallery et al. (1989) ont introduit l'algorithme DDX (pour Dallery-David-Xie) qui utilise un flux de matière continu. Burman (1995) a étendu l'algorithme à des lignes non-homogènes. Dallery & Le Bihan (1999) ont étendu l'algorithme à des distributions de panne et de réparation plus générales à l'aide de distributions exponentielles généralisées (« generalized exponential distributions »). Schor (1995) et Gershwin & Schor (2000) ont développé des algorithmes pour deux problèmes : (i) la distribution d'un espace de stockage fixe pour maximiser la production et (ii) la minimisation de l'espace de stockage tout en atteignant un taux de production imposé. Schor (1995) présente des algorithmes d'optimisation pour les flux de matière discrets et pour un flux de matière continu. Les problèmes d'optimisation qui tiennent compte uniquement de l'espace de stockage et non du niveau d'inventaire sont appropriés pour les systèmes dont l'espace de stockage est dispendieux mais dont l'inventaire ne l'est pas. Lorsque les coûts de détention sont non négligeables, cette formulation doit être remise en question. Les contributions mentionnées dans le paragraphe ci-haut utilisent le taux de production asymptotique comme critère principal de performance mais permettent également d'estimer le niveau d'inventaire moyen dans les différents stocks intermédiaires. Les lignes ainsi étudiées opèrent dans un contexte dit de demande saturée, c'est-à-dire que l'on considère que toute pièce produite trouvera preneur. Les

produits finis ne sont donc jamais stockés. Bonvik et al. (2000) ont utilisé un stock de produits finis pour satisfaire un taux de demande constant dans un système permettant la mise en rupture des demandes qui ne sont pas satisfaites sur le champ, pour une ligne de production gouvernée par un mécanisme hybride kanban/CONWIP. Malgré que l'algorithme semble estimer précisément le niveau d'inventaire moyen dans les différents stocks tampons, le niveau de rupture semble gravement sous-estimé dans les contextes de forte utilisation de la ligne. Lors d'une étude comparative de différentes techniques de décomposition, Bonvik (1996) remarque que la plupart des techniques semblent surestimer le taux de production asymptotique de quelques pourcents. Ceci peut rendre l'utilisation de ces méthodes difficile dans des problèmes de minimisation des coûts lorsque le niveau de rupture est pénalisé. Sadr & Malhame (2004) ont utilisé une technique de décomposition/agrégation différente basée sur la programmation dynamique pour une application de minimisation des coûts d'inventaire et de rupture dans des lignes partiellement homogènes. Nous remarquons cependant qu'une étude approfondie de la précision de cette méthode n'a pas été effectuée. À notre connaissance, très peu d'auteurs traitent de la minimisation des coûts d'inventaire et de rupture par les méthodes de décomposition.

Pour minimiser le coût moyen, nous utilisons une combinaison de simulation combinée discrète/continue, plans d'expériences et surfaces de réponses. L'approche proposée a l'avantage d'être beaucoup plus rapide que les techniques d'optimisation axées sur la simulation par événements discrets, avantage qui gagne en importance avec la variabilité du système, tout en obtenant un estimé adéquat du coût avec une précision vérifiable.

Le reste du chapitre est organisé de la façon suivante : la section 2.2 présente la formulation mathématique du problème, la section 2.3 l'approche proposée, la section 2.4 le modèle de simulation, la section 2.5 la validation de ce modèle. À la section 2.6, nous comparons les coûts obtenus et le temps de calcul des modèles de simulation par

événements discrets et du modèle de simulation combiné discret/continu. Finalement des exemples numériques d'optimisation sont présentés à la section 2.7.

2.2 Énoncé du problème

Dans ce chapitre, nous considérons le problème de commande des flux de production dans un système de production en tandem avec m ($m \geq 2$) machines sujettes à des pannes aléatoires. Le système est présenté à la figure 3, où M_i représente les machines $i = 1, \dots, m$. Chaque machine a deux états (opérationnel ou en panne, notés 1 et 0 respectivement), résultant en un système avec une chaîne de Markov à p -états $k(t) = (k_1^1(t), \dots, k_1^1(t), \dots, k_1^p(t), \dots, k_1^p(t))$ sur l'espace de probabilité (Ω, F, P) dont les valeurs sont comprises dans un ensemble fini M . La capacité de la machine M_i au mode j à l'instant t est notée $k_i^j(t)$.

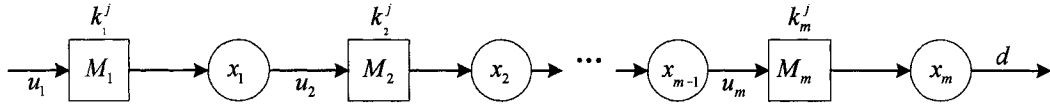


Figure 3 Un système à m machines produisant un type de produit

Nous notons $u_i(t)$ le taux d'entrée à la machine M_i et $x_i(t)$ le nombre de pièces dans le stock tampon entre M_i et M_{i+1} , ($i = 1, \dots, m-1$). Finalement, la différence entre la production et la demande cumulée de produits finis, le surplus, est notée $x_m(t)$. La dynamique du système peut être écrite de la façon suivante :

$$\frac{d}{dt}(x_i(t)) = u_i(t) - u_{i+1}(t), \quad x_i(0) = x_i, \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt}(x_m(t)) = u_m(t) - u_{m+1}, \quad x_m(0) = x_m \quad (2.2)$$

où $u_{m+1} = d$ est le taux constant de la demande. En notation matricielle, le système d'équations (2.1)-(2.2) devient:

$$\frac{d}{dt}(x(t)) = A \cdot u(t), \quad x(0) = x \quad (2.3)$$

où A est une matrice de dimensions $m \times (m+1)$, $x(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$, $u(t) = (u_1(t), \dots, u_{m+1}(t))$, $x = (x_1, \dots, x_m)$. Puisque le nombre de pièces dans les stocks intermédiaires ne peut être négatif, nous imposons à la variable d'état $x_i(t)$ de ne pas être négative (i.e., $x_i(t) \geq 0$ pour $i = 1, \dots, m-1$). En relation à une telle contrainte, $x(t) \in S = [0, \infty)^{m-1} \times \mathbb{R}$ pour $k = (k_1^j, \dots, k_m^j)$, $k_i^j \geq 0$, posons $U(k) = \{u = (u_1, \dots, u_m) : 0 \leq u_i(t) \leq k_i^j u_{\max}^i\}$ où u_{\max}^i est le taux de production maximum de la machine M_i . L'ensemble des commandes admissibles par rapport à $x(t) \in S$ est donné par $\Upsilon(x, k)$ défini comme étant :

$$\Upsilon(x, k) = \{u' = (u_1, \dots, u_m) : u' \in U(k); x_i = 0 \Rightarrow u_i - u_{i+1} \geq 0, i = 1, \dots, m-1\}$$

Le problème de commande consiste en la recherche d'une politique de commande $u(\cdot)$ admissible qui minimise la fonction coût $J(\cdot)$ donnée par :

$$J(x, k, u) = E \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [g(x(t))] dt \mid x(0) = x, k(0) = k \right\} \quad (2.4)$$

où $g(x(t))$ représente le coût instantané d'inventaire/rupture et ρ est le taux d'escompte. La fonction valeur du problème de planification est donnée par :

$$v(x, k) = \inf_{u \in \Upsilon(x, k)} J(x, k, u) \quad (2.5)$$

Il est montré dans la littérature de contrôle (voir Presman et al. (1995), Lou et al. (1994) et Kenné & Boukas (1997) pour les détails) que la fonction valeur donnée par l'équation (2.5) est strictement convexe en x et continuellement différentiable. De plus, elle satisfait un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées, appelées équations d'HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman). Ces équations sont dérivées de l'application de l'approche par programmation dynamique. Puisque nous avons des contraintes sur le niveau des stocks tampons ($x_i(t) \geq 0, i = 1, \dots, m-1.$), nous ne pouvons pas utiliser les approches classiques telles que celle basée sur la solution de viscosité (« viscosity solution »). Nous utilisons le concept de dérivée directionnelle (DD) appliquée à la fonction valeur qui a été montrée dans la littérature comme étant convexe. Nous obtenons que les conditions d'optimum résultantes, nommées HJBDD peuvent être données par :

$$\rho v(x, k) = \min_{u \in \Upsilon(x, k)} \left\{ v'_{Ax}(x, k) + g(x) + Q(\cdot)v(x, \cdot) \right\} \quad (2.6)$$

avec $f'_p(x) = \langle \nabla f(x), p \rangle$ où $\nabla f(x)$ est le gradient de $f(x)$ et $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est le produit scalaire.

La politique optimale de commande $u^*(\cdot)$ est obtenue lorsque la fonction valeur est disponible. Cependant, une solution analytique des équations HJBDD données par (2.6) est pratiquement impossible à réaliser dans les cas généraux. Une façon d'obtenir la solution de chaque équation est l'application de méthodes numériques. En utilisant la méthode de Kushner (voir Kushner & Dupuis (1992) et Kenné & Boukas (1997)), nous obtenons un processus de décision à sauts Markoviens à états finis et commandes finies caractérisée par la dimension, dépendante de m , suivante :

$$Dim(m) = p \times 3^{m \times p} \times \prod_{j=1}^m N_h(x_j) \quad (2.7)$$

où $p = 2^m$ et $N_h(x_j) = \text{card}[G_h(x_j)]$ avec $G_h(x_j)$ décrivant la grille numérique pour la variable d'état x_j en relation au stock tampon j . Chaque machine a deux états (i.e. $p = 2^m$ états pour un système de production à m machines) et son taux de production peut prendre trois valeurs, nommément le taux de production maximal, le taux de la demande et 0 pour chaque mode (i.e. $3^{m \times p}$ états pour un système à m machines et p modes). Les algorithmes numériques tels l'itération de la politique ou l'amélioration de la politique (voir Kushner & Dupuis (1992)) ne peuvent être implémentées sur les ordinateurs d'aujourd'hui pour les lignes de transfert longues, classifiées dans la littérature de contrôle comme systèmes complexes.

Étant donnée une telle complexité, différentes approches analytiques, telles que la commande hiérarchique et des méthodes heuristiques ont été employées pour obtenir une approximation de la solution optimale. Néanmoins, la solution de problèmes plus simples, telle que pour le système à une machine et un produit de Akella & Kumar (1986), pointe vers la politique du « hedging point » qui consiste à bâtir un stock de niveau défini à chaque fois que c'est possible et de le maintenir. Appliquée à notre ligne de production, nous obtenons une politique du « hedging point » décentralisée (DHP, « decentralized hedging point »). La structure suivante est adoptée des résultats disponibles, obtenus par les approches mentionnées plus haut appliquées à des systèmes simples.

$$u_i(\cdot) = \left. \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_i(t) < Z_i \\ d_i(t) & \text{si } x_i(t) = Z_i \\ 0 & \text{si } x_i(t) > Z_i \\ 0 & \text{si } x_{i-1}(t) = 0 \text{ avec } i > 1 \end{cases} \right\} i = 1, \dots, m. \quad (2.8)$$

avec $u_i(t)$ étant le taux de production de la machine M_i à l'instant t et $d_i(t)$ le taux de la demande au stock tampon B_i à l'instant t . La demande $d_m(t)$ est constante au taux d . Cette politique est basée sur la politique du « seuil critique », Z_i étant le seuil critique

local et $d_i(t)$ la demande locale. Ce type de politique est considéré comme étant une façon convenable d'obtenir une politique sous-optimale satisfaisante. Elle est parfois nommée politique à stocks tampons finis (de l'anglais « finite buffer policy ») puisque le seuil critique correspond en quelque sorte à la capacité du stock. Elle est l'équivalent de la politique Kanban lorsqu'elle est implémentée à l'aide de cartes d'autorisation de production. Puisque les taux de production sont fixés par cette politique, le problème d'optimisation consiste maintenant en la minimisation du coût moyen en fonction du vecteur de variables d'entrée $Z = (Z_1, \dots, Z_m)$. Dans la prochaine section, nous présentons l'approche proposée pour obtenir la valeur optimale des paramètres de la structure de commande donnée par l'équation (2.8).

2.3 Approche proposée

Puisque la complexité du problème présenté rend la résolution analytique ou numérique impossible à ce jour, nous proposons une approche d'optimisation par la simulation afin d'obtenir les paramètres d'entrée de la politique de commande donnée en (2.8). La mesure de performance est l'espérance du coût d'inventaire et de rupture $\bar{C}(Z)$ pour un vecteur de capacité donné Z montré à l'équation (2.9) :

$$\bar{C}(Z) = c^+ \bar{x}^+ + c^- \bar{x}^- \quad (2.9)$$

où c^+ et c^- sont les coûts unitaires pour l'inventaire et la rupture respectivement et \bar{x}^+ est le niveau d'inventaire moyen calculé par :

$$\bar{x}^+ = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^+(t) dt \quad (2.10)$$

avec T étant l'horizon de planification et $x^+(t)$ la somme des stocks à l'instant t montrée par :

$$x^+(t) = \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t) + \max(x_m(t), 0) \quad (2.11)$$

Nous présumons que le coût unitaire pour l'inventaire est constant le long de la ligne. Les niveaux de rupture instantané ($x^-(t)$) et moyen (\bar{x}^-) sont donnés respectivement par les équations (2.12) et (2.13).

$$x^-(t) = \max(0, -x_m(t)) \quad (2.12)$$

$$\bar{x}^- = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x^-(t) dt / T \quad (2.13)$$

La figure 4 illustre le concept de niveau moyen d'inventaire et de rupture pour un système à une machine et un stock de produit fini. La figure 4 a) montre l'évolution du surplus dans le temps, la figure 4 b) montre le niveau d'inventaire équivalent et la figure 4 c) le niveau de rupture équivalent pour la même séquence d'événements.

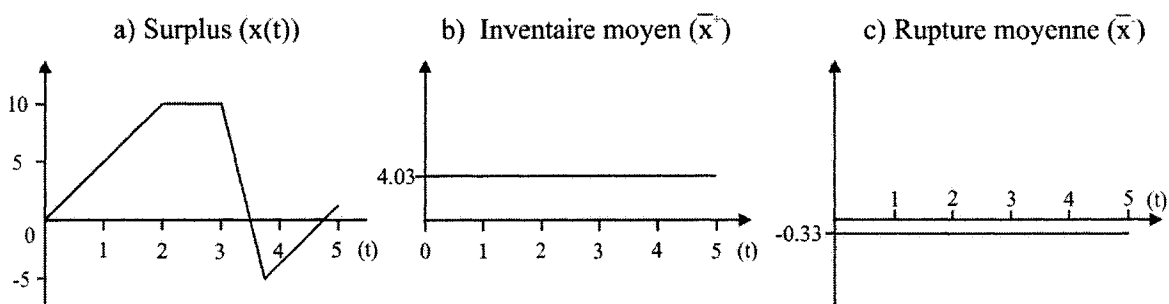


Figure 4 Inventaire et rupture moyens

Le problème d'optimisation de la section 2 est maintenant réduit à la minimisation de l'équation (2.9) en fonction de vecteur d'entrée Z . La valeur de Z qui permet d'atteindre cet objectif est notée Z^* . Afin de trouver Z^* , nous devons combiner la

simulation à une technique d'optimisation. Nous croyons que la simulation est toujours l'outil le plus efficace à ce jour, étant assez précis et flexible pour estimer les coûts d'opération d'un système général. Il existe une littérature abondante illustrant la puissance de la simulation en tant qu'outil pour la conception, la planification, l'ordonnancement et la commande de systèmes complexes (Banks (1998)). Historiquement, un des inconvénients principaux de la simulation est son inhabilité d'optimiser. L'intérêt pour le couplage de la simulation à une technique d'optimisation s'est manifesté à partir des années 1970. Le premier produit commercial fut lancé en 1995. De nos jours, quelques simulateurs commerciaux ont un module d'optimisation intégré. Ces modules sont basés sur une combinaison d'heuristiques telles que les algorithmes d'évolution, la recherche Tabou, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, le recuit simulé, etc. Cependant, ces heuristiques sont des techniques très sophistiquées qui demandent un effort de calcul énorme tout en ne garantissant pas la convergence à un optimum. Banks (1998) présente une revue de techniques d'optimisation qui sont appropriées pour l'optimisation par la simulation pour des variables discrètes et des variables continues. En ce qui concerne les variables discrètes, différents algorithmes pour la méthode de recherche aléatoire sont présentés. Tous impliquent le déplacement d'un point admissible à un point admissible voisin. Nous concluons que plus le nombre de points admissible (ou domaine) sera grand, plus grand sera également le nombre de simulations qui devront être effectuées avant de trouver l'optimum, de l'ordre de milliers de simulations. En utilisant un flux de matière continu, nous sommes en mesure d'utiliser des techniques d'estimation de gradient telles que la méthode par différence finie ou l'analyse de perturbations pour converger à la solution de manière plus efficace. L'utilisation de plans d'expériences et de surfaces de réponse est aussi facilitée par la continuité des facteurs.

Avec le développement du génie de la qualité, les outils reliés aux plans d'expériences (voir Montgomery (2005)) représentent également une classe importante de techniques d'optimisation pour la simulation. Les surfaces de réponse ont l'avantage de proposer

un modèle polynomial de la fonction coût en fonction des paramètres d'entrée de la politique de commande. À l'aide de programmation non linéaire, nous sommes en mesure de quantifier la politique de contrôle sous-optimale pour le problème de commande optimale stochastique énoncé auparavant. De plus, ce modèle polynomial nous permet de conduire des analyses de sensibilité sans nécessiter de simulations additionnelles. Ceci n'est pas possible lorsque l'on utilise des algorithmes de recherche directe, la recherche Tabou ou les méthodes basées sur le gradient. Étant donné les propriétés de convexité de la fonction valeur, telle que mentionnée dans la section 2, elle peut être approximée par une fonction de second degré de façon assez précise lorsque le domaine est choisi adéquatement. Une façon efficace d'obtenir la fonction de second degré est par l'emploi d'un plan d'expériences de type Box-Wilson tel que décrit dans Montgomery (2005). Ce type de plan a l'avantage d'être orthogonal et de permettre l'estimation de l'effet de tous les facteurs, leurs carrés et leurs interactions doubles tout en nécessitant un nombre d'essais grandement inférieur à un plan factoriel à 3 niveaux. Par expérience, nous savons que plusieurs interactions ainsi que des carrés de facteurs sont statistiquement significatifs. Malgré que les plans d'expériences permettent une planification efficace des expériences à conduire et les surfaces de réponses nous permettent d'obtenir une fonction décrivant cette réponse, nous avons toujours besoin d'un outil précis pour conduire ces expériences.

La simulation par événements discrets donne toute la flexibilité pour résoudre ce problème. Cependant, l'effort de calcul informatique de la simulation par événements discrets a souvent été jugé trop important pour être pratique. À cause de la nature discrète des pièces dans un tel modèle, de nombreux événements sont liés aux opérations sur les pièces comme le début et la fin d'une opération. La figure 5 et la figure 6 montrent un exemple simple pour une machine avec $u_{\max} = 2$ et $d = 1$. Ces figures sont montrées pour illustrer la différence dans le nombre d'événements entre la simulation par événements discrets et la modélisation combinée discrète/continue.

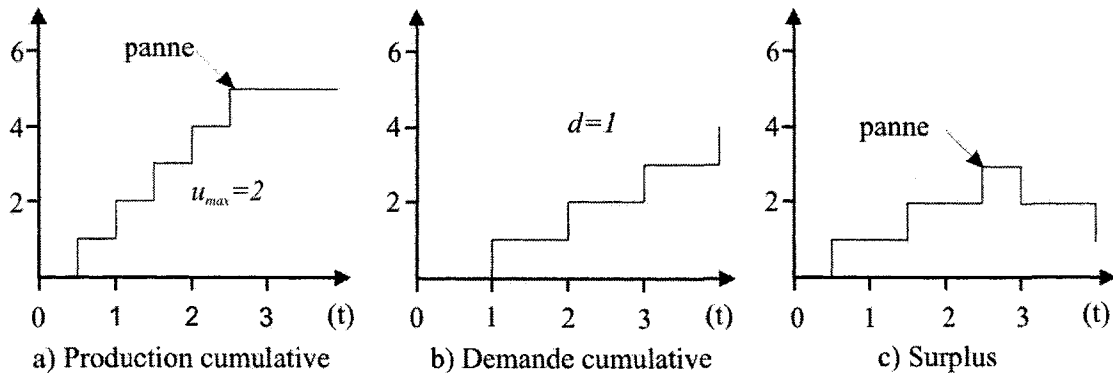


Figure 5 Exemple graphique de la modélisation par événements discrets

La figure 5 (a) présente la production cumulative, 3 (b) la demande cumulative et la figure 5 (c) la différence entre les figures 5 (a) et 5 (b). Nous voyons que les processus de production et de demande évoluent par sauts dans le modèle discret. Ceci résulte en la génération d'événements multiples. Dans l'exemple, nous voyons que des événements correspondant à la production de cinq pièces, quatre demandes et une panne sont générés. Nous remarquons à la figure 6 que pour la même durée d'observation, beaucoup moins d'événements sont générés que pour le modèle discret montré à la figure 5. Nous voyons que seul l'événement de panne est généré.

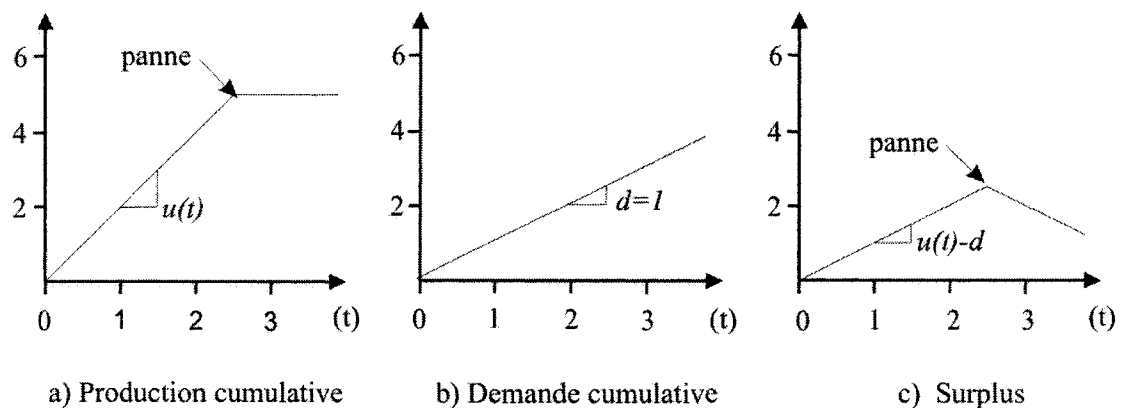


Figure 6 Exemple graphique de la modélisation combinée discrète/continue

Si la panne était survenue à l'instant $t = 100$, il y aurait eu la production de 200 unités et 100 demandes avant la panne, alors que le modèle combiné discret/continu n'aurait encore une fois nécessité que la génération de l'événement de panne. De façon intuitive, pour un certain niveau de précision des indicateurs de performance, nous comprenons que plus la variabilité dans le système est importante ou plus le taux de production est élevé, plus le nombre d'événements générés par simulation est grand. Le nombre d'événements augmente également avec le nombre de machines dans le système. Plus le nombre d'événements générés est important, plus le temps de calcul est long. Le nombre d'expériences dans un plan augmente également avec le nombre de paramètres (i.e. de machines). Dans certains cas, le plan nécessitera plusieurs jours voir plusieurs semaines à compléter, dépendant de la précision souhaitée et des ressources informatiques disponibles. Le problème serait encore plus apparent avec l'utilisation d'une technique d'optimisation pour variables discrètes et un domaine pour Z étendu. En s'appuyant sur les observations faites aux figure 5 et figure 6, nous proposons un modèle de simulation combinée discrète/continue comme moyen de réduire le nombre d'événements de façon significative. Comme nous le verrons à la section 2.6, cette réduction en événements résultera en une réduction importante du temps de calcul. Dans la section suivante, nous décrivons le modèle de simulation combinée discrète/continue. Cette approche devient nécessaire dans de nombreux cas pour compléter l'optimisation des paramètres de la politique de commande.

2.4 Modèle de simulation combinée discrète/continue

Le modèle de simulation combinée discrète/continue est développé à l'aide du langage Visual SLAM (Pritsker & O'Reilly (1999)) avec des sous-routines en C. La portion Visual SLAM est composée de différents réseaux décrivant des tâches spécifiques (pannes et réparation, passage de seuils pour les variables d'inventaire, etc...). Le modèle est représenté à la figure 7 avec la description suivante des différents blocs le

composant. Un exemple de modèle de simulation (réseaux, fichier de contrôle et fonctions en langage C) pour une ligne à $m=4$ machines est présenté en annexe 1.

1) L'INITIALISATION donne les valeurs à Z , le taux de demande ainsi que les paramètres des machines tels que u_{\max} , la moyenne des temps techniques de fonctionnement ($MTTF$) et la moyenne des temps techniques de réparation ($MTTR$). Les spécifications pour le maximum et le minimum du pas d'intégration sont également définis à cette étape ainsi que la durée de simulation totale et la durée du réchauffement après lequel les statistiques sont réinitialisées.

2) Le TAUX DE LA DEMANDE est constant et défini dans le bloc INITIALISATION. Il est montré ici comme bloc individuel pour faciliter la compréhension puisqu'il est utilisé constamment en tant que variable d'entrée dans les équations d'état.

3) La POLITIQUE DE COMMANDE est implémentée à l'aide de réseaux d'observation qui envoient un signal lorsque l'un des seuils est franchi positivement ou négativement. Les taux de production des machines sont fixés par la suite selon l'équation (2.8) et le vecteur de paramètres Z .

4) Le DÉSAMORÇAGE des machines est implanté à l'aide de réseaux d'observation. Lorsqu'un des stocks intermédiaires se vide, un signal est envoyé. Un nouveau signal est envoyé lorsque de la matière redevient disponible. Le désamorçage est intégré aux équations d'état par le biais de variables binaires qui multiplient les taux de production.

5) Le bloc PANNES ET RÉPARATIONS sert à échantillonner les temps entre les pannes ainsi que les temps de réparation à partir de leur distribution de probabilités respectives. L'état opérationnel des machines est incorporé dans les équations d'état à l'aide de variables binaires également.

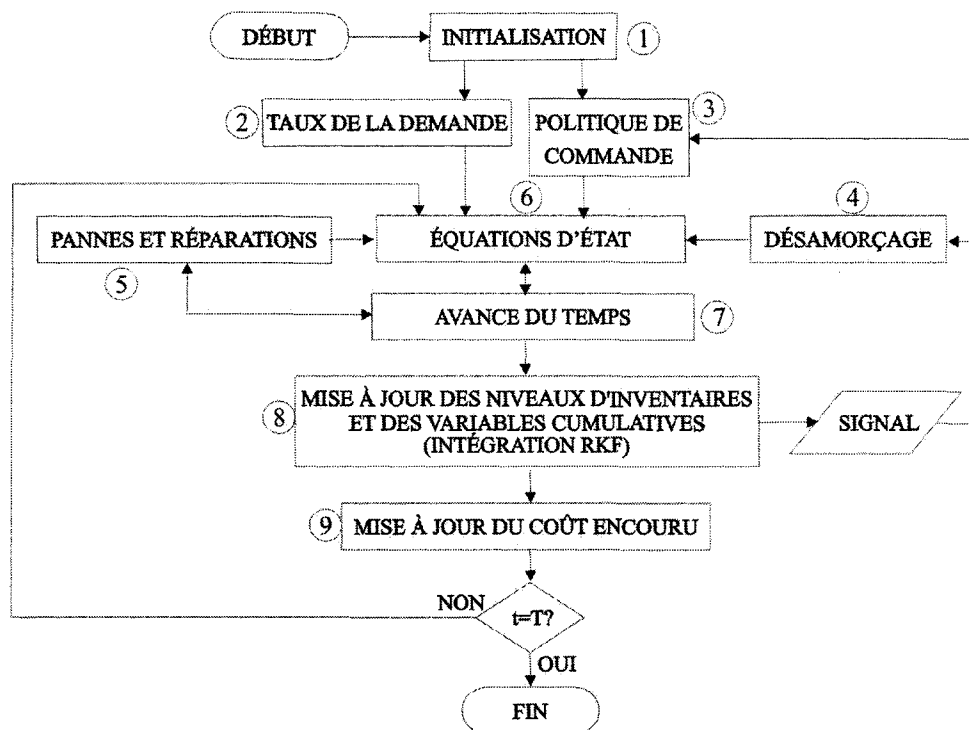


Figure 7 Diagramme du modèle de simulation

6) Les ÉQUATIONS D'ÉTAT sont les équations (2.1), (2.2), (2.11) et (2.12) définies en tant que fichier complémentaire en langage C pour AweSIM!. Elles décrivent les variables d'inventaire et de rupture en utilisant les taux de production et les variables binaires des réseaux de panne et de réparation, ainsi que de désamorçage.

7) Le bloc d'AVANCE DU TEMPS utilise un algorithme fourni par Visual SLAM. C'est une combinaison de planification d'événements discrets (pannes et réparations), de passage de seuils de variables continues et des spécifications de minimum et de maximum du pas de temps.

8) La MISE À JOUR DES NIVEAUX D'INVENTAIRES ET DES VARIABLES CUMULATIVES est effectuée une fois que le pas de temps suivant est déterminé. Les

variables cumulatives sont intégrées à l'aide de la méthode Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) telle que décrite dans Pritsker & O'Reilly (1999).

9) La MISE À JOUR DU COÛT ENCOURU sert à calculer le coût encouru en fonction des niveaux des différentes variables ainsi que des coûts unitaires c^- et c^+ .

La simulation se termine lorsque la durée définie de simulation T est atteinte. Pour obtenir la moyenne de l'inventaire et de la rupture, les variables cumulatives sont divisées par T . Comme la durée de simulation ne peut pas être infinie tel que dans les équations (2.10) et (2.13), nous avons donc conduit des simulations préliminaires pour déterminer le temps requis pour que le système atteigne le régime permanent. Nous avons trouvé que pour nos modèles, ce temps correspond approximativement à 10 000 fois MTTF. Cette durée est donc utilisée pour toutes les simulations. Des répliques multiples sont ensuite effectuées. L'échantillon résultant sera utile pour conduire les tests d'hypothèse entre le modèle à événements discrets et le modèle combiné discret/continu. Afin de vérifier que les modèles discrets et combinés donnent les mêmes résultats en termes de coûts, nous conduirons un test d'hypothèse sur les moyennes de coût obtenues respectivement. L'hypothèse nulle du test est $H_0 : \tilde{C}_1 = \tilde{C}_2$, avec \tilde{C}_1 et \tilde{C}_2 étant les coûts asymptotiques obtenus sur un horizon infini pour les deux modèles comparés. L'hypothèse alternative est donc $H_1 : \tilde{C}_1 \neq \tilde{C}_2$. Nous utilisons un niveau de risque $\alpha = 5\%$. La distribution centrée réduite de la différence entre les deux moyennes, en supposant que H_0 est vraie, est distribuée selon :

$$Z_h = \frac{(\bar{C}_1 - \bar{C}_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.14)$$

avec \bar{C}_1 et \bar{C}_2 étant les moyennes des échantillons, S_1 et S_2 les variances des échantillons calculés selon l'équation (2.15) avec C_{ij} les résultats individuels des simulations de chaque échantillon. Pour plus de détails concernant les tests d'hypothèse, se référer à Montgomery (2005).

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum (C_{ij} - \bar{C}_i)^2}{n-1}}; i=1,2.; j=1,\dots,n. \quad (2.15)$$

Nous rejetons H_0 si $Z_h > z_{\alpha/2}$ ou $Z_h < -z_{\alpha/2}$, sinon nous acceptons H_0 . Dans la prochaine section, nous présentons la validation du modèle de simulation.

2.5 Validation du modèle de simulation

Pour vérifier la précision du modèle, nous procédons en deux étapes : premièrement la dynamique des stocks est vérifiée graphiquement pour voir si le modèle fonctionne selon la politique de commande. Ensuite, les résultats sont comparés à ceux présentés dans Chiang et al. (1999). La figure 8 est une représentation graphique des trajectoires des stocks intermédiaires et du surplus.

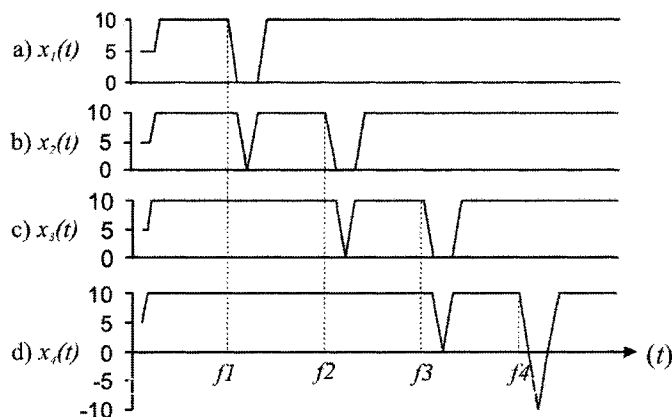


Figure 8 Dynamique des stocks

La figure 8 (a)-(d) représente l'évolution des stocks $x_i, i=1,2,3,4$, pour une ligne de transfert à $m=4$ machines. L'illustration montre 4 pannes survenant séquentiellement de la première à la dernière machine ($f1-f4$). Au début, tous les stocks contiennent 5 unités. Puisque toutes les machines sont opérationnelles et qu'aucune machine n'a atteint son seuil critique, elles produisent toutes au taux u_{\max} . Le premier stock à se remplir sera le stock x_4 . Lorsqu'il est plein, le stock x_3 se remplit et ainsi de suite. Lorsque M_1 tombe en panne ($f1$), M_2 conserve x_2 à son seuil critique aussi longtemps que possible en utilisant les pièces dans le stock x_1 . Lorsque x_1 est vide, l'effet de panne se propage à la machine M_2 par désamorçage. Lorsque M_1 est réparée, le premier stock à se remplir est x_2 , suivi de x_1 lorsque le premier est plein. Nous remarquons que seul le stock x_4 prend des valeurs négatives, puisque c'est le stock de produits finis.

Afin de valider notre modèle, nous l'avons comparé à Chiang et al. (1999). Dans cette étude, plusieurs lignes sont simulées pour obtenir le taux de production maximal de la ligne sous une certaine configuration et demande saturée. Nous avons comparé notre modèle à la ligne de $m=7$ machines du cas numéro 1, étant le seul cas homogène de l'étude. Les machines ont un processus de panne et de réparation Markovien. La ligne est homogène avec $MTTF=10$, $MTTR=10/9$, $Z_i=2$ et $u_{\max}=1$. La durée de simulation est de 32 000 000 unités de temps après un réchauffement de même durée. L'unité de temps correspond au 1/200 de MTTR. \widetilde{PR} est le taux de production résultant. Nous supposons que la ligne est vide au début de la simulation. Les résultats sont montrés au tableau I.

Tableau I

Résultats de validation pour le taux de production asymptotique

Modèles	m	u_{max}	$MTTF$	MTTR	\widetilde{PR}
Chiang et al. (1999)	7	1	10	1.1	.7682
Modèle proposé	7	1	10	1.1	.7684
				Diff.	0.02%

Nous remarquons que la différence entre les deux résultats est de 0.02%. Nous considérons donc que la différence n'est pas significative et concluons que les modèles génèrent des résultats identiques. Notre modèle est ainsi validé. Dans la section suivante, nous présentons la comparaison entre le modèle de simulation par événements discrets et le modèle combiné discret/continu en égard du temps de calcul informatique et du coût moyen obtenu.

2.6 Comparaison des approches de modélisation pour la simulation

Dans cette section, nous comparons le coût obtenu ainsi que le temps de calcul nécessaire pour un modèle de simulation par événements discrets et le modèle combiné proposé. L'objectif est de valider l'utilisation du modèle combiné discret/continu pour l'évaluation du coût tout en mesurant l'avantage en termes de temps de calcul par rapport au modèle par événements discrets. Nous avons évalué 6 cas, trois lignes à $m=4$ machines et 3 à $m=6$ machines. Les lignes de production considérées sont homogènes (i.e. toutes les machines ont les mêmes valeurs de $MTTF$, $MTTR$ et u_{max}). Ces cas sont présentés au tableau II.

Tableau II

Paramètres des machines pour les cas présentés

CAS	$MTTF_i$	$MTTR_i$	m	c^-	c^+	d	m	u_{\max}
1	100	3	4	100	1	1	4	1.1
2	700	21	4	100	1	1	4	1.1
3	1500	45	4	100	1	1	4	1.1
4	100	3	6	100	1	1	6	1.1
5	700	21	6	100	1	1	6	1.1
6	1500	45	6	100	1	1	6	1.1

Au début de chaque expérience, une période de réchauffement correspondant à $100 \cdot MTTF$ après laquelle les statistiques cumulatives sont réinitialisées, a été utilisée. Cette période de réchauffement est une pratique courante pour éliminer les données d'une période transitoire qui résultent des conditions initiales au démarrage du système. La partie servant à la collecte de données des simulations (T) a été d'une durée égale à $10000 \cdot MTTF$ dans tous les cas, puisque cette durée a été trouvée nécessaire pour atteindre le régime permanent. En utilisant $MTTF$ comme paramètre pour la durée de la simulation, nous obtenons des simulations avec une moyenne d'événements de panne et de réparation égale dans tous les cas. Le tableau III montre les résultats pour le modèle combiné discret/continu (Comb.) et le modèle par événements discrets (Discr.), le coût moyen estimé, (\tilde{C}), le temps de calcul ($T.C.$) en secondes et la valeur de T_h calculée à partir de l'équation (2.14). La colonne H_0 présente les résultats des tests d'hypothèse, O signifiant que H_0 est acceptée et N signifiant que H_0 est rejetée.

Tableau III

Comparaison des coûts et résultats de chronométrage

Cas	Modèle	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	\tilde{C}	n	T.C.	T_h	H_0
1	Discr.	20	20	20	20	--	--	74.27	30	420	-1.96	Y
	Comb.	20	20	20	20	--	--	74.57	30	23		
2	Discr.	70	70	70	70	--	--	417.68	30	2300	-0.72	Y
	Comb.	70	70	70	70	--	--	422.33	30	33		
3	Discr.	150	150	150	150	--	--	906.28	30	4300	0.45	Y
	Comb.	150	150	150	150	--	--	899.63	30	33		
4	Discr.	20	20	20	20	20	20	109.93	30	750	1.28	Y
	Comb.	20	20	20	20	20	20	109.73	30	55		
5	Discr.	70	70	70	70	70	70	557.73	30	4100	0.07	Y
	Comb.	70	70	70	70	70	70	557.08	30	75		
6	Discr.	150	150	150	150	150	150	1183.86	30	8200	-0.08	Y
	Comb.	150	150	150	150	150	150	1185.36	30	75		

Nous remarquons que le temps de calcul du modèle combiné discret/continu est beaucoup plus faible que le modèle par événements discrets, tout en ne montrant pas de différence significative au niveau du coût résultant. Nous remarquons également que plus les valeurs de $MTTF$ et $MTTR$ sont grandes, plus le temps de calcul est important. Cependant, les valeurs de $MTTF$ et $MTTR$ n'affectent pas de façon importante le temps de calcul pour le modèle combiné parce qu'il dépend principalement du nombre d'événements de panne et de réparation générés durant la simulation. Comme nous avons décidé que la moyenne du nombre de pannes et de réparations resterait constante entre les différents cas, il est donc tout à fait prévisible que le temps de calcul soit semblable. Dans les cas présentés ici, nous avons fait varier les valeurs de $MTTF$, $MTTR$ et le niveau des stocks tampons en fonction de ces valeurs tout en gardant d et u_{\max} constants. Des résultats semblables en termes de temps de calcul auraient été obtenus en faisant varier d et u_{\max} tout en conservant $MTTF$ et $MTTR$ constants. Nous observons que le rapport des temps de calcul du modèle de simulation par événements discrets sur celui du modèle combiné est parfois de l'ordre de centaines

de fois, le temps de calcul pour le modèle discret atteignant quelques heures dans certains cas. Si seulement quelques simulations sont requises pour l'étude à conduire, ce temps de calcul peut être acceptable. Par contre dans des problèmes de simulation impliquant quelques centaines ou milliers d'expériences, le modèle discret devient prohibitif. Par exemple, un plan d'expériences semblable à ceux utilisés dans les sections suivantes appliqués aux cas 5 et 6 de la présente section aurait pris respectivement une et deux semaines à compléter au lieu de trois heures pour le modèle combiné discret/continu. En considérant qu'un plan d'expériences peut être répété plusieurs fois, par exemple pour ajuster le domaine expérimental, le temps de calcul du modèle discret devient problématique.

Les expériences ont été menées sur un processeur Pentium IV de 1.8GhZ de la compagnie Intel. Pour toutes les expériences menées avec le modèle combiné, la taille maximale du pas d'incrémentation du temps a été fixé à la même valeur que $MTTF$, ce qui donne le temps de calcul le plus bas pour notre modèle. Les temps de calcul donnés ici dépendent grandement des ressources informatiques utilisées pour effectuer les expérimentations. Ils sont donnés pour illustrer le temps approximatif qu'une simulation pouvait prendre au moment où ce travail a été effectué et ce sur des ressources informatiques largement répandues.

2.7 Résultats d'optimisation et analyse

Dans la section précédente, nous avons observé que la simulation par événements discrets demande beaucoup plus de temps de calcul que la simulation combinée discrète /continue. Il a aussi été remarqué que pour tous les cas testés, le coût résultant est statistiquement identique pour les deux modèles. Puisque le temps pour résoudre un problème d'optimisation avec le modèle discret est de l'ordre de jours ou même de semaines, son usage en est très restreint. L'utilisation du modèle combiné discret/continu devient nécessaire pour résoudre ce problème dans un délai raisonnable.

Dans cette section, nous présentons les résultats d'optimisation pour les mêmes six cas qu'à la section précédente, présentés au tableau II. Ces exemples numériques servent à illustrer l'utilité de la technique proposée.

Le plan d'expériences est obtenu et analysé à l'aide d'un logiciel commercial. La fonction réponse que nous désirons obtenir est de second degré. Un plan efficace pour obtenir une telle réponse est le plan central composite (CCD, de l'anglais central composite design, ou Box-Wilson). Un tel plan consiste en un plan factoriel à deux niveaux augmenté de points au centre et sur les axes des facteurs. La figure 9 montre la représentation schématique d'un tel plan d'expériences avec trois facteurs, les points marquant l'emplacement des essais. Pour plus de détails, nous référons le lecteur à Montgomery (2005). Le plan d'expériences utilisé pour tous les exemples numériques présentés est de type Box-Wilson avec deux points de centre, répliqué quatre fois (cinq au total). Le nombre d'essais pour un tel plan est donné par $2^m + 2m + n$, avec m le nombre de machines et n le nombre de points de centre, ce qui donne 130 simulations pour le plan à 4 facteurs et 230 pour le plan à 6 facteurs. De ce plan, nous obtiendrons deux réponses : (i) une surface estimant le niveau total d'inventaire et (ii) une surface estimant le niveau moyen de rupture. Ces réponses sont de la forme de l'équation (2.16)

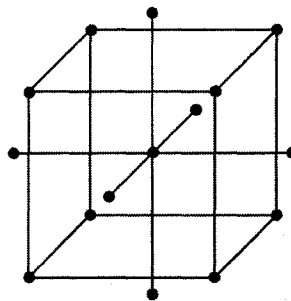


Figure 9 Plan d'expériences central composite à trois paramètres

$$Y \approx \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i Z_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \geq i}}^m \beta_{ij} Z_i Z_j \quad (2.16)$$

Lorsqu'une portion acceptable de la variance de chaque réponse est décrite par les modèles, la fonction rupture est multipliée par le ratio de coûts unitaires c^- / c^+ et les deux fonctions résultantes sont additionnées. La fonction de la somme des deux réponses est par la suite minimisée à l'aide de programmation non-linéaire telle que décrite dans Venkataraman (2002).

Le tableau IV montre l'analyse de variance (ANOVA) pour la réponse de l'inventaire pour la ligne à $m=4$ machines correspondant au cas 1. Nous remarquons que le coefficient R^2 est de presque 100%, ce qui signifie que la variabilité de l'inventaire est décrite presque entièrement par les différents facteurs. Si la « P-Value » est plus grande que 5 %, (pour un niveau de confiance de 95%) nous considérons que la source de variance n'est pas significative. Nous constatons que les « F-Ratios » pour les facteurs individuels sont très importants par rapport à ceux des interactions et carrés de facteurs jugés significatifs. Ceci implique que la surface de réponse est presque un hyperplan avec une courbure légère. Le niveau d'inventaire augmente presque linéairement avec le niveau des facteurs individuels. Les tableaux IV et VI montrent uniquement les sources de variance qui ont été jugées significatives suite à l'analyse. La fonction résultante est montrée à l'équation (2.16). Les coefficients pour la réponse de l'inventaire sont présentés au tableau V.

Tableau IV

ANOVA pour les résultats de l'inventaire

Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	535.57	1	535.57	648994.49	0
B:Z2	466.263	1	466.263	565009.09	0
C:Z3	427.654	1	427.654	518223.38	0
D:Z4	399.539	1	399.539	484154.93	0
AA	0.463335	1	0.463335	561.46	0
AB	0.1114	1	0.1114	134.99	0
BB	0.0693565	1	0.0693565	84.05	0
CC	0.0096789	1	0.00967892	11.73	0.0009
blocs	1.89796	9	0.210884	255.55	0
Erreur totale	0.0924258	112	0.00082523		
Total (corr.)	1831.8	129			$R^2 = 99.995 \%$

Tableau V

Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}	β_{12}	β_{22}	β_{33}
-11.548	1.5151	1.2988	1.1001	.9897	-2.547E-2	-9.329E-3	-9.856E-3	-3.682E-3

Pour la réponse de rupture, la variance des résidus augmente avec la valeur de la moyenne. Afin d'uniformiser la variance et ainsi augmenter le coefficient R^2 , une transformation a dû être employée. La transformation qui fonctionne le mieux dans notre cas est l'exposant fractionnaire. Pour plus de détails concernant les transformations et la façon de les sélectionner, nous référons le lecteur à Montgomery (2005). Le tableau VI montre les résultats de l'ANOVA pour le niveau de rupture avec un exposant $\frac{1}{2}$. Nous remarquons que le coefficient $R^2 = 98.72\%$, ce qui est encore une

fois très élevé. Cependant, un tel niveau d'explication de la variance est nécessaire puisque la pénalité sur le niveau de rupture est largement supérieure à celle pour l'inventaire pour les cas étudiés. Par conséquent, une erreur importante sur l'estimation du niveau de rupture aura d'autant plus d'impact que la pénalité pour la rupture sera élevée. Les coefficients de la fonction réponse pour le niveau de rupture moyen sont donnés au tableau VII.

Tableau VI

ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$

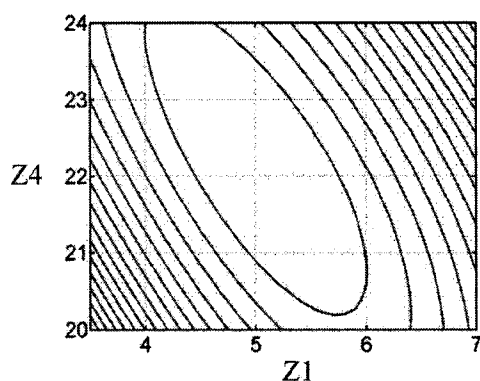
Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	0.178689	1	0.178689	1619.78	0
B:Z2	0.1502	1	0.1502	1361.53	0
C:Z3	0.137066	1	0.137066	1242.47	0
D:Z4	0.152808	1	0.152808	1385.17	0
AA	0.00570514	1	0.00570514	51.72	0
AB	0.00937076	1	0.00937076	84.94	0
AC	0.00289	1	0.00289	26.2	0
AD	0.000468939	1	0.000468939	4.25	0.0417
BB	0.00182986	1	0.00182986	16.59	0.0001
BC	0.00406175	1	0.00406175	36.82	0
BD	0.000795622	1	0.000795622	7.21	0.0084
CC	0.000872344	1	0.000872344	7.91	0.0059
CD	0.00146932	1	0.00146932	13.32	0.0004
blocs	0.263524	9	0.0292804	265.42	0
Erreur totale	0.0118039	107	0.000110317		
Total (corr.)	0.921627	129			$R^2 = 98.72\%$

Tableau VII

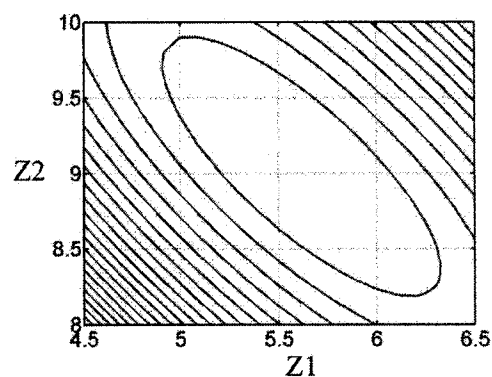
Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}
2.307	1.5151	-0.1052	0.09815	-0.08816	-0.04093	2.827E-3	1.503E-3	6.053E-4

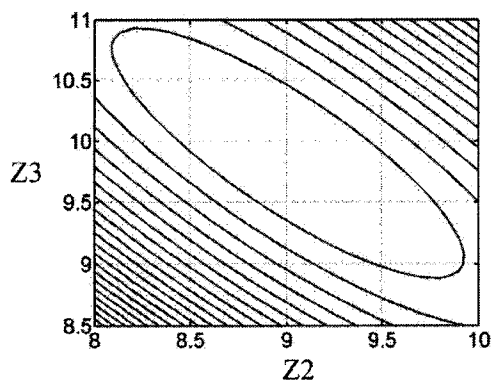
β_{22}	β_{23}	β_{24}	β_{33}	β_{34}
1.600E-3	1.781E-3	7.884E-4	1.105E-3	1.071E-3



a) Courbes de niveau du coût vs Z1 et Z4
(Z2=9.2, Z3=9.6)



b) Courbes de niveau du coût vs Z1 et Z2
(Z3=9.6, Z4=20.8)



c) Courbes de niveau du coût vs Z2 et Z3
(Z1=5.4, Z4=20.8)

Figure 10 Courbes de niveau pour la surface de la fonction coût

Les figures 10 (a), (b) et (c) montrent les courbes de niveau pour la fonction coût résultante. Les résultats de l'optimisation pour les six cas étudiés à l'aide du modèle de simulation combiné discret/continu sont présentés au tableau VIII. Nous ne présentons pas ici l'analyse complète pour tous les cas, puisque l'espace requis serait très important tout en n'ajoutant aucune valeur à l'analyse.

Tableau VIII

Valeurs optimales des paramètres et coûts résultants

CAS	$MTTF$	$MTTR$	m	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	Z_6^*	\tilde{C}^*
1	100	3	4	5.4	9.2	9.6	20.8	--	--	44.1
2	700	21	4	37.5	64.2	67.1	145.6	--	--	308.9
3	1500	45	4	80.3	137.6	143.9	312.0	--	--	661.9
4	100	3	6	4.5	6.7	9.1	9.7	10.4	24.1	57.5
5	700	21	6	31.6	46.8	63.6	67.8	72.9	168.8	402.7
6	1500	45	6	67.8	100.4	136.2	145.4	156.3	361.8	862.9

Nous remarquons que les valeurs optimales des paramètres vont en augmentant le long de la ligne. Nous croyons que la cause est la pénalité importante pour les ruptures. Cette pénalité justifie un stock de produits finis important pour prévenir la rupture. Nous remarquons également que le premier stock tampon est significativement plus petit que les suivants. Ceci est justifié par le fait que la première machine ne subit pas de variabilité induite par son approvisionnement puisqu'il est considéré fiable. En conséquence, la machine M_1 n'a besoin d'accumuler un inventaire que pour découpler la machine M_2 de ses propres pannes et non de la variabilité de l'approvisionnement. Les paramètres Z_2 à Z_{m-1} ont une distribution plus uniforme tout en augmentant légèrement le long de la ligne.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité du problème de commande de la production pour un système de production en tandem avec des machines sujettes à des pannes aléatoires. Nous avons montré que la complexité du problème analytique nous empêche de résoudre les équations d'HJB qui y sont reliées. En utilisant les résultats obtenus pour des cas plus simples, une structure pour une politique de commande sous-optimale ou heuristique est obtenue. Pour obtenir les valeurs optimales des paramètres d'entrée de cette politique, nous avons employé une combinaison de simulation, de plans d'expériences et de surfaces de réponses et donnons quelques exemples numériques. Nous croyons que cette technique permet le traitement de lignes longues, problème qui serait autrement très difficile à résoudre analytiquement ou numériquement. Afin de réduire le temps de calcul informatique, un modèle de simulation combiné discret/continu a été proposé. Ce modèle a permis de réduire le temps de calcul de l'ordre de centaines de fois pour des exemples numériques donnés. Avec l'évolution des processeurs informatiques, le ratio du temps de calcul du modèle de simulation par événements discrets sur celui du modèle combiné demeurera dans le même ordre de grandeur. Ce modèle permettra l'optimisation de lignes longues dans un délai raisonnable. Un exemple d'une ligne à vingt machines est d'ailleurs présenté au chapitre 3.

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DES MÉCANISMES DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION DES LIGNES LONGUES

Résumé

Ce chapitre traite de la commande de la production des lignes de production homogènes constituées de machines sujettes à des pannes aléatoires. Nous considérons les coûts d'inventaire et de rupture dans ces systèmes. Étant donné que la complexité du problème croît avec la taille de la ligne (nombre de machines), nous développons une méthode heuristique pour faciliter la distribution des capacités des stocks tampons dans le cas de lignes longues tout en minimisant les coûts. Cette heuristique est basée sur la forme du profil de la distribution optimale des stocks tampons. À l'aide du formalisme analytique, de plans d'expériences et de surfaces de réponse, nous optimisons un ensemble de lignes allant jusqu'à 7 machines, avec un paramètre d'optimisation par machine. Nous observons un profil commun dans la distribution optimale des capacités de stocks tampons qui peut être modélisé à l'aide de 4 paramètres. Conséquemment, le problème d'optimisation pour les lignes de plus de 4 machines est réduit en un problème à 4 variables, réduisant grandement l'effort expérimental nécessaire à leur optimisation. Un exemple d'une ligne constituée de 20 machines est présenté pour illustrer l'utilité d'un tel profil paramétré.

3.1 Introduction

Le problème de la commande optimale des taux de production pour les systèmes manufacturiers est étudié largement dans la littérature scientifique. C'est particulièrement le cas pour une catégorie de systèmes : les lignes de production à un type de produit. Ces systèmes présentent un intérêt particulier parce qu'ils sont généralement utilisés dans la production de masse et sont très souvent constitués

d'équipements hautement spécialisés et coûteux dédiés à un produit. Le propriétaire d'un tel système a donc tout intérêt d'atteindre le seuil de rentabilité le plus rapidement possible. Un tel problème est d'une grande complexité et a été résolu uniquement pour des systèmes simples jusqu'à présent. La solution pour le système à une machine et un produit a été présentée dans Akella & Kumar (1986). La solution présentée pointe vers la politique à seuil critique («hedging point policy», HPP) qui consiste en l'accumulation et le maintien d'un niveau d'inventaire déterminé tant et aussi longtemps que c'est possible. Étant donnée la complexité du problème, il est aujourd'hui impossible de le résoudre pour des cas généraux tels que celui considéré dans le présent chapitre. Des méthodes heuristiques doivent être développées pour obtenir des performances satisfaisantes du système.

Comme au chapitre 2, nous étendons le HPP aux lignes de transfert et obtenons une classe de politiques sous optimales se comportant comme le célèbre mécanisme de contrôle de la production kanban. Nous sommes alors confrontés à un problème d'optimisation à un paramètre par machine consistant à trouver le seuil optimal, soit la capacité du stock tampon, des stocks intermédiaires et de produit finis. Malgré le fait que connaître la structure de la politique simplifie le problème, sa complexité croît avec la taille de la ligne de production.

La simulation par événements discrets est une façon très efficace d'estimer à peu près toutes les mesures de performance d'un système, en autant que les données relatives au système sont précises. Cependant, cette technique peut être très exigeante en termes de temps. Dans le chapitre 2, nous avons observé qu'effectuer la minimisation des coûts d'inventaires et de rupture pour une ligne de production peut prendre des semaines pour une ligne à six machines à l'aide d'un processeur Pentium® IV de 1.8 MHz. Cette tâche devient impossible pour une ligne à 20 machines par exemple. Nous avons démontré que l'utilisation d'un modèle de simulation combiné discret/continu peut réduire grandement le nombre d'événements générés pendant une expérience de simulation,

réduisent en conséquence le temps de calcul nécessaire à sa réalisation. Cependant, malgré l'utilisation de ce modèle plus rapide, l'optimisation à un paramètre par machine des lignes longues reste trop exigeante en temps pour qu'elle soit profitable.

Dans une étude de la répartition optimale de stocks tampons pour des lignes de production avec demande saturée, Hillier et al. (1993) ont observé le phénomène du bol inversé. En simulant de façon exhaustive toutes les combinaisons possibles de capacités de stock tampons, ils ont remarqué que les stocks aux extrémités de la ligne devraient se voir attribuer moins d'espace de stockage que les autres stocks. Une relation approximative donnant l'augmentation relative de l'espace allouée aux stocks du milieu par rapport aux stocks des extrémités (le premier et le dernier) a été donnée par Hillier (2000). Il s'agit en fait d'un profil de bol inversé simplifié et paramétré. Ce profil a comme objectif de réduire l'effort d'optimisation pour ce type de problème, qui tient uniquement compte de l'espace de stockage dans un contexte de demande saturée. Il néglige par contre les coûts de possession et de rupture. Cette relation concerne les lignes balancées avec temps de traitement variable. Cette étude a été conduite sur des lignes allant jusqu'à six machines. Schor (1995) présente un algorithme d'optimisation pour les méthodes de décomposition. Des résultats pour des lignes homogènes à 10 machines montrent qu'une diminution relative de l'espace de stockage (partie transitoire) devrait être appliquée à plus que les seuls stocks des extrémités lorsque la ligne est relativement longue. La partie transitoire affecte environ trois stocks à chaque extrémité. La solution d'une ligne à 20 machines présentée sur le site web du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (Gershwin (1996)) montre une partie transitoire de 4 stocks tampons à chaque extrémité. Les différences de capacité les plus importantes se trouvent toujours entre les stocks aux extrémités et leur voisin immédiat. Cependant, ces solutions ne tiennent pas compte des coûts de possession et de rupture mais plutôt de l'espace de stockage. Cette formulation est appropriée lorsque le coût de l'espace de stockage est largement supérieur au coût d'inventaire. Dobler et al. (1990) montre cependant que les coûts d'inventaire sont généralement beaucoup plus élevés que

les coûts de stockage. En nous appuyant sur ces observations de profils caractéristiques, nous porterons une attention particulière à la distribution des capacités des stocks tampons permettant la minimisation des coûts d'inventaire et de rupture. Nous croyons que la découverte d'un profil se répétant dans les résultats, nous permettrait de proposer un profil paramétré qui réduirait grandement le nombre de variables du problème d'optimisation. Cette réduction dans le nombre de variables résulterait en une diminution importante du nombre de simulations nécessaires à l'optimisation de lignes longues, limitant le problème à quelques variables seulement. Une telle réduction de la complexité du problème permettrait la prise en charge de l'optimisation de lignes longues, qui seraient autrement trop exigeantes en temps pour être mises en œuvre. La suite du chapitre est organisée de la façon suivante : l'énoncé du problème est présenté à la section 2.2, l'approche expérimentale est présentée à la section 2.3 et le modèle de simulation est abordé brièvement à la section 2.4. La section 2.5 présente les techniques de plans d'expériences et de surfaces de réponse, la section 2.6 donne l'analyse et les résultats d'optimisation à un paramètre par machine et à la section 2.7, un profil pour la distribution de l'espace de stockage est proposé et validé à partir des résultats de la section précédente.

3.2 Formulation du problème

Chaque machine peut être dans deux états: opérationnelle ($\xi_i = 1$) ou en panne ($\xi_i = 0$). Les pannes dépendent du temps. La transition d'un état à un autre est un processus Markovien en temps continu caractérisé par le diagramme de transition de la figure 11. Le taux de transition de l'état $\xi_i = 1$ à $\xi_i = 0$ est noté λ_i . Conséquentment, le temps de bon fonctionnement de la machine est distribué selon une loi exponentielle de moyenne $1/\lambda_i = MTTF$. La transition de l'état $\xi_i = 0$ à $\xi_i = 1$ est noté μ_i . Le temps de panne est donc distribué selon une loi exponentielle de moyenne $1/\mu_i = MTTR$.

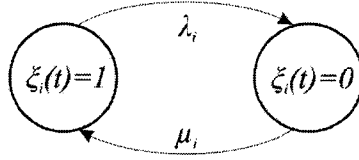


Figure 11 Diagramme de transition d'états pour la machine M_i ; $i=1, \dots, m$.

Pour la ligne de production, le processus stochastique décrivant sa dynamique est donné par $\xi(t) \in M = \{1, \dots, 2^m\}$. L'espace d'état croît de façon exponentielle avec le nombre de machines. La dynamique du niveau des stocks tampons est donnée par :

$$\frac{d}{dt}(x_i(t)) = u_i(t) - u_{i+1}(t), \quad x_i(0) = x_i, \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (3.1)$$

La dynamique du surplus est donnée par :

$$\frac{d}{dt}(x_m(t)) = u_m(t) - u_{m+1}, \quad x_m(0) = x_m \quad (3.2)$$

Avec $x_i(t) \geq 0$; $i = 1, \dots, m-1$. Le but du problème est de trouver la loi de commande $u(\cdot) = (u_1(\cdot), \dots, u_m(\cdot))$ qui minimiserait le coût d'inventaire et de rupture total donné par l'équation (3.3) :

$$J(x_0, \xi_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\int_0^T (x^+(t) \cdot c^+ + x^-(t) \cdot c^-) dt \right] \quad (3.3)$$

ou encore :

$$\frac{J(x_0, \xi_0)}{c^+} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\int_0^T x^+(t) dt \right] + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\int_0^T x^-(t) dt \right] \cdot c^- / c^+ \quad (3.4)$$

avec :

$$x^+(t) = \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t) + \max(x_m(t), 0) \quad (3.5)$$

$$x^-(t) = \max(0, -x_m(t)) \quad (3.6)$$

En divisant la fonction coût par c^+ , nous généralisons la solution pour toutes les combinaisons de c^+ et c^- dont le ratio c^-/c^+ est identique. La loi de commande optimale est obtenue par la résolution des équations de HJB correspondantes. À ce jour, cette tâche n'a été accomplie que pour des systèmes très simples et est impossible à faire pour des problèmes généraux. Cependant, la solution des problèmes simples, comme le système manufacturier à une machine produisant un type de produit de Akella & Kumar (1986), pointe vers le HPP. Cette politique consiste à accumuler et maintenir un niveau défini d'inventaire dès que possible. Étendue à des lignes de production en tandem, nous obtenons la politique à seuil critique décentralisé (« decentralized hedging point policy », DHP) de la même façon qu'au chapitre 2. La structure suivante est adoptée à partir de ces résultats :

$$u_i(\cdot) = \left. \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_i(t) < Z_i \\ d_i(t) & \text{si } x_i(t) = Z_i \\ 0 & \text{si } x_i(t) > Z_i \\ 0 & \text{si } x_{i-1}(t) = 0 \text{ avec } i > 1 \end{cases} \right\} i = 1, \dots, m. \quad (3.7)$$

avec $u_i(t)$ le taux de production de la machine M_i et $d_i(t)$ le taux de la demande au stock tampon B_i à l'instant t , la demande $d_m(t)$ est constante au taux d . Cette politique est basée sur le HPP, Z_i étant le niveau de « hedging » local et $d_i(t)$ la demande locale. Ce type de politique est considéré comme étant une bonne avenue pour obtenir une politique sous-optimale satisfaisante. Cette politique est parfois nommée politique à stock tampons finis (« finite buffer policy ») ou dans le cas de pièces discrètes, la

politique kanban. Le mécanisme de contrôle des flux de production kanban a reçu beaucoup d'attention de la part d'industriels et de chercheurs depuis son introduction (Berkley (1992)). L'objectif du problème de contrôle est alors de trouver $Z^* = [Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_m^*]$, le vecteur des capacités des stocks (ou « hedging level ») qui minimise la fonction coût. Dans la section suivante, nous décrivons l'approche proposée pour résoudre ce problème.

3.3 Approche expérimentale

La complexité du problème étudié empêche toute solution analytique ou numérique. La politique DHP est largement employée sous le nom Kanban. Cependant, les praticiens fixent généralement le nombre de cartes d'une façon relativement instinctive, ce qui peut résulter en des performances diminuées. Tout comme au chapitre 2, nous utiliserons une combinaison de plans d'expériences et de surfaces de réponse pour optimiser la politique de production. Les paragraphes suivants décrivent les différentes étapes suivies dans le but de retrouver un profil caractéristique qui pourrait être utilisé dans l'optimisation de lignes longues. La méthodologie est illustrée à la figure 12.

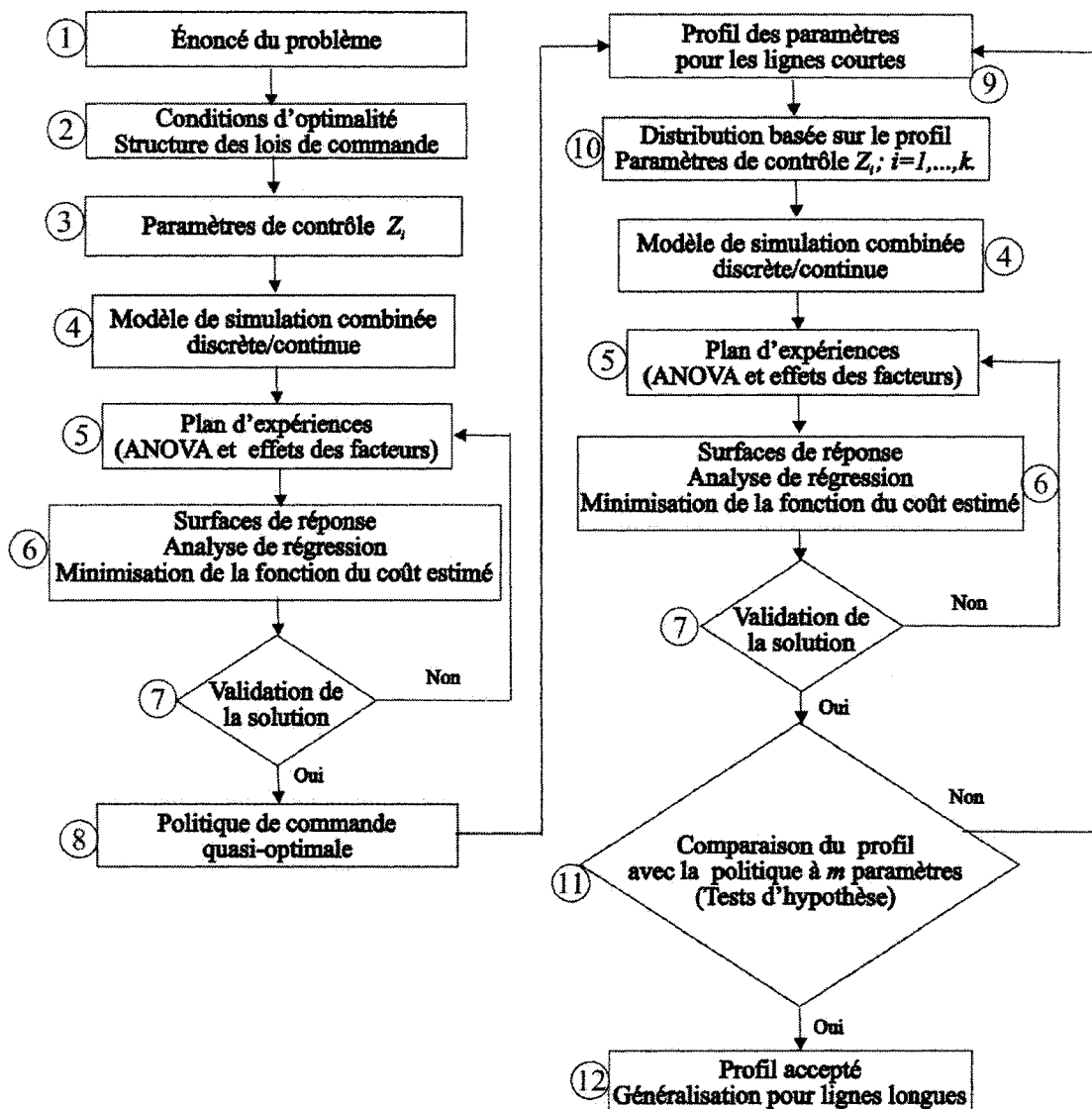


Figure 12 Diagramme de la méthodologie proposée

1) L'énoncé du problème de commande des lignes de production, présenté à la section 2, est la formulation mathématique du problème de contrôle la production par la commande optimale stochastique basée sur la théorie du contrôle. L'objectif de l'étude est spécifié dans la formulation du problème de contrôle optimal des flux. Cet objectif est de trouver la loi de commande $u(\cdot) = (u_1(\cdot), \dots, u_m(\cdot))$ qui minimise les coûts d'inventaire et de rupture.

- 2) Les *conditions d'optimum* sont données par les équations de HJB associées au problème. La *structure de la loi de commande* est obtenue en résolvant les équations de HJB pour les cas simples.
- 3) Les *paramètres de contrôle* sont définis comme étant les paramètres de la loi de commande sous-optimale obtenue en adoptant la structure des cas résolus et en l'étendant au cas général tel que dans Sadr & Malhame (2004).
- 4) Le *modèle de simulation combinée discrète/continue* est développé en utilisant le langage Visual SLAM (Pritsker & O'Reilly (1999)) avec des sous-routines en langage C.
- 5) Le *plan d'expériences* définit le domaine des facteurs à être analysés, la manière dont les facteurs varieront et le nombre de réplifications des expériences. Les résultats des simulations sont utilisés pour obtenir les effets des facteurs par l'analyse de variance (ANOVA).
- 6) La *surface de réponse* est utilisée pour obtenir l'approximation de la fonction objective en tant que combinaison des effets des facteurs et de leurs interactions, obtenus à l'étape précédente. Les résidus sont alors analysés pour vérifier l'uniformité de la variance, des corrélations séquentielles ou autre indice d'un défaut du modèle obtenu.
- 7) La *validation de la solution* est faite en comparant les résultats obtenus par la surface de réponse et l'intervalle de confiance obtenue par la simulation de 30 réplifications de la combinaison optimale obtenue par minimisation. Il est également vérifié que la solution obtenue par la minimisation de la surface de réponse se situe bien dans le domaine défini à l'étape 6.

8) La *politique de commande quasi-optimale* est définie avec la solution optimale validée. Le coût encouru dans cette configuration est considéré comme étant le minimum.

9) Le *profil des paramètres pour les lignes courtes* est scruté pour déceler un profil commun. Les résultats de plusieurs lignes sont analysés pour permettre l'extrapolation vers des lignes plus longues.

10) La *distribution basée sur le profil* est obtenue en ajustant un profil paramétré bien adapté à la forme observée à l'étape 9. Les *facteurs de contrôle* sont les paramètres du profil choisi pour définir la distribution des capacités de tout stock tampon.

11) La *comparaison du profil avec la politique à m paramètres* est effectuée par le biais d'un test de confiance. Le test est effectué pour déterminer s'il y a une différence significative entre les deux résultats. Les échantillons utilisés pour fins de comparaison sont les résultats de validation.

12) Le *profil est accepté* si le test d'hypothèse permet de conclure qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre la politique à m paramètres et la politique à k paramètres basée sur le profil. Nous généralisons alors pour les lignes plus longues.

3.4 Modèle de simulation

L'outil d'évaluation des performances qui a été choisi pour cette étude est un modèle de simulation combiné discrète/continue, semblable au modèle du chapitre 2. Nous avons effectué plusieurs simulations préliminaires pour déterminer le temps nécessaire au système pour atteindre le régime permanent ainsi que le temps de réchauffement approprié. Nous avons trouvé que pour nos modèles, le temps de simulation adéquat est d'environ 1 000 000 unités de temps précédé par un réchauffement de 1000 unités de temps. Ces durées sont donc employées pour toutes les simulations.

3.5 Plans d'expériences et surfaces de réponse

Le plan d'expériences est obtenu et analysé à l'aide d'un logiciel commercial. Par expérience, nous savons que la surface de réponse doit être au minimum de degré 2 et que les interactions entre les stocks tampons (pas nécessairement adjacents) ont souvent un effet statistiquement significatif. Un plan efficace pour obtenir une telle réponse est celui de type central composite (CCD, Box-Wilson). Il consiste en un plan factoriel à deux niveaux augmenté de points sur les axes et de points de centre. Ce type de plan est désirable de par son orthogonalité, la capacité de mesurer les effets indépendamment les uns des autres, et sa « rotatability » la capacité de mesurer la réponse avec une variance égale dans toutes les directions à partir du point de centre. Le nombre d'expériences dans chaque plan avec m paramètres et n points de centre est de $2^m + 2m + n$. Pour plus de détails, nous référons le lecteur à Montgomery (2005). D'un tel plan, nous retirons 2 réponses: une surface approximant le niveau d'inventaire moyen et une autre estimant le niveau de rupture moyen. Ces réponses sont de la forme de l'équation (3.8).

$$Y \approx \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i Z_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \geq i}}^m \beta_{ij} Z_i Z_j \quad (3.8)$$

avec Y étant la réponse estimée, $Z_i; i=1, \dots, m$. les facteurs multipliés par leurs coefficients β . Lorsqu'une portion acceptable de la variabilité de chacune des réponses est expliquée par les modèles polynomiaux, la fonction rupture est multipliée par le rapport c^- / c^+ et additionnée à la fonction inventaire. La fonction résultante est alors minimisée à l'aide de programmation non-linéaire avec le logiciel Matlab tel que décrit dans Venkataraman (2002).

Afin de réduire la variabilité dans les résultats d'une configuration à une autre, nous utilisons la technique des nombres aléatoires communs. Cette technique consiste à

soumettre les différentes configurations du système à des événements de pannes et de réparations identiques, en fixant le nombre source du générateur de nombres pseudo aléatoires. Il est alors possible de retirer une portion de la variabilité qui est due à une série d'événements particuliers. Une fois que l'optimisation est accomplie, nous validons le coût estimé par les surfaces de réponse en simulant 30 répliques avec la solution trouvée comme valeur des paramètres d'entrée. Nous calculons alors l'intervalle de confiance à 95% à l'aide de l'équation (3.9) :

$$\bar{C} - 1.96 \cdot S / \sqrt{n} \leq C^* \leq \bar{C} + 1.96 \cdot S / \sqrt{n} \quad (3.9)$$

avec S obtenu par l'équation (3.10) :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

avec $C_i, i = 1, \dots, n$. les résultats des simulations de validation, \bar{C} le coût moyen obtenu par ces répliques, S l'écart type de l'échantillon et C^* le coût optimal. Si le coût estimé obtenu à l'aide de la fonction coût \tilde{C}^* se retrouve à l'intérieur de cet intervalle de confiance, nous considérons que les surfaces de réponse estiment le coût réel de façon satisfaisante.

Comme avec la plupart des techniques d'optimisation, le nombre d'expériences nécessaires croît avec le nombre de variables d'optimisation. Puisque la simulation peut être très exigeante en termes de temps, ceci représente un inconvénient. Dans le but d'éliminer cette contrainte pour les lignes longues, nous observerons les résultats à la recherche d'un profil commun qui pourrait être modélisé par quelques paramètres seulement. Nous nous servirons alors de ce profil pour réduire le nombre de variables d'optimisation et ainsi simplifier le problème.

3.6 Exemples numériques et analyse des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats d'optimisation pour plusieurs lignes. Les résultats pour $c^-/c^+=20$ et $c^-/c^+=100$ sont montrés. Les simulations ont une durée de 10^6 unités de temps précédée par une période de réchauffement de 10^3 unités de temps. Pour tous les cas, $MTTF=100$ et $MTTR=3$, $u_{\max}=1.1$ et $d=1$. Une analyse complète (ANOVA, coefficients polynomiaux, courbes de niveaux, etc...) pour le cas de la ligne à $m=4$ machines avec $c^-/c^+=100$ est présentée à la section 2.7. Les valeurs de Z_i^* et les coûts résultants estimés \tilde{C}^* pour quatre machines sont montrés au tableau IX et la distribution des capacités le long de la ligne est montrée graphiquement à la figure 13. Le tableau X et la figure 14 montrent les résultats pour cinq machines, le tableau XI et la figure 15 pour six machines et le tableau XII et la figure 16 pour sept machines. Tous les coûts estimés obtenus se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95%. Nous remarquons que la largeur de l'intervalle de confiance augmente avec la valeur de c^-/c^+ . Cette augmentation est liée à la plus grande variabilité des résultats de rupture. Une pénalité de rupture plus importante a comme effet d'augmenter l'effet de cette variabilité.

Tableau IX

Résultats pour la ligne à quatre machines

c^-/c^+	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)
20	3.92	8.00	9.00	13.02	32.76	[32.33:33.19]
100	5.35	9.17	9.59	20.80	44.13	[43.04:45.22]

Tableau X

Résultats pour la ligne à cinq machines

c^-/c^+	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)
20	3.75	7.07	8.58	9.65	14.70	39.84	[38.86:40.00]
100	4.2	8.14	9.57	8.72	24.69	51.70	[49.94:52.20]

Tableau XI

Résultats pour la ligne à six machines

c^-/c^+	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	Z_6^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)
20	3.06	8.59	8.65	7.50	8.50	17.06	45.46	[45.45:46.63]
100	4.52	6.69	9.08	9.69	10.42	24.12	57.53	[56.51:58.41]

Tableau XII

Résultats pour la ligne à sept machines

c^-/c^+	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	Z_6^*	Z_7^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)
20	2.93	7.13	8.56	8.45	8.90	9.56	15.72	51.84	[51.47:52.67]
100	3.50	7.00	9.00	9.28	9.76	9.93	25.10	64.28	[64.05:66.55]

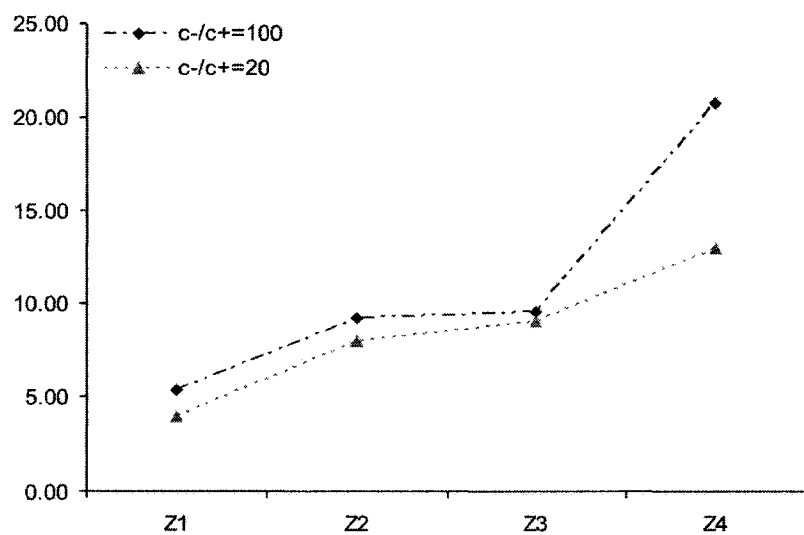


Figure 13 Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à quatre machines

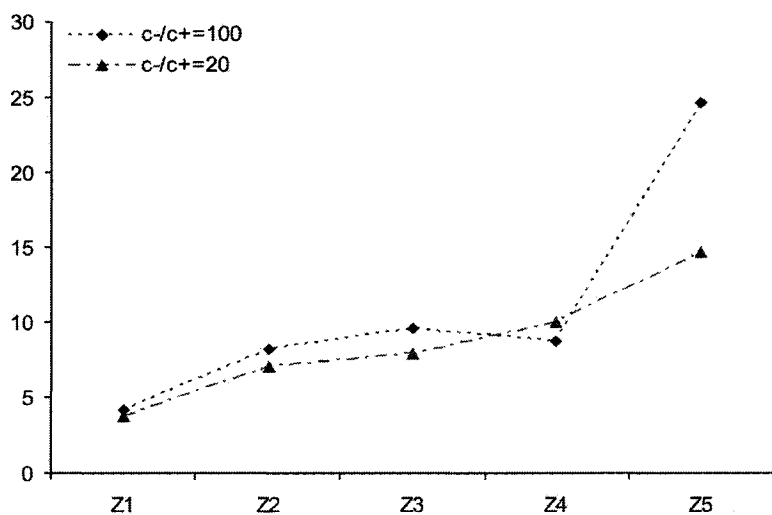


Figure 14 Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à cinq machines

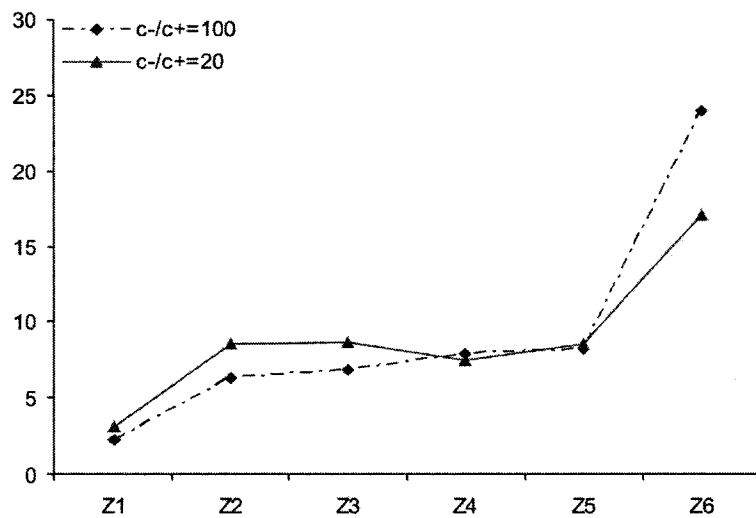


Figure 15 Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à six machines

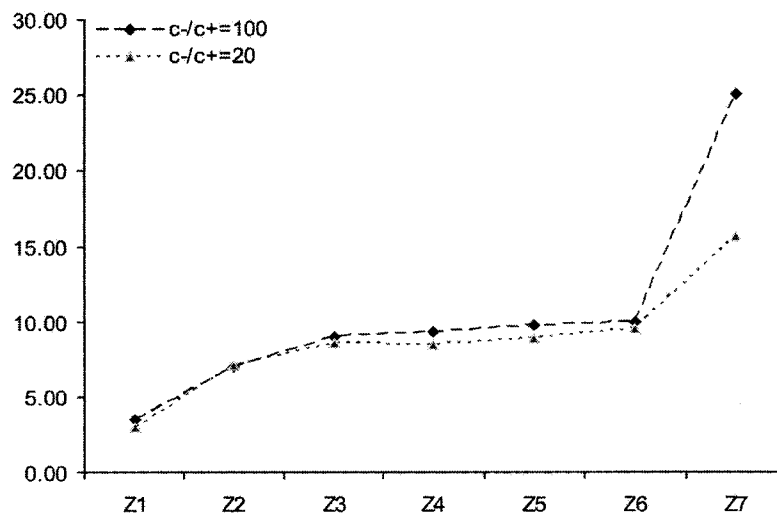


Figure 16 Distribution de l'espace de stockage pour la ligne à sept machines

Nous remarquons un profil commun dans la distribution des capacités des stocks. Alors que le premier et le dernier stock semblent indépendants, la portion milieu de la ligne est distribuée selon une droite. Le stock de produits finis est nettement plus important que les stocks intermédiaires. Cette augmentation dans la capacité est justifiée par la

pénalité imposée sur les ruptures de stock. Cet effet diminue avec le coût unitaire de rupture. Le stock B_1 se démarque également du reste de la ligne par sa plus petite taille. Ceci se justifie par le fait que la machine M_1 n'est jamais en manque de matière première. Conséquemment, la machine M_1 n'a pas à accumuler de stock pour protéger la machine M_2 d'un éventuel désamorçage causé par une défaillance de l'approvisionnement, mais uniquement pour empêcher la propagation des pannes à la M_2 .

La valeur optimale des capacités semble augmenter légèrement le long de la ligne (B_2 à B_{m-1}). Des expériences ont démontré que pour une capacité de stockage identique, les stocks vers la fin de la ligne accumulent moins d'inventaire que ceux situés au début de la ligne. Conséquemment, en se déplaçant vers la fin de la ligne, les stocks peuvent avoir une plus grande capacité tout en ne générant pas un niveau d'inventaire aussi élevé qu'il le ferait si le stock était placé en début de ligne. L'explication pour ce phénomène réside dans la propagation de l'effet des pannes des machines. Comme nous le savons, l'effet des pannes se propage aux machines adjacentes par le biais du blocage pour la machine en amont de la panne et par désamorçage pour la machine en aval. Expliqué de façon simplifiée, les machines les plus en amont de la ligne ont plus de chances d'être bloquées parce qu'elles peuvent subir l'effet de la propagation des pannes de plus de machines. Même si les machines en amont d'une panne ne ressentent pas directement la propagation de la panne, le niveau accru du stock devant les machines qui ont subi un blocage réduira le laps de temps avant que la panne se propage lors d'un événement de panne subséquent. Des résultats obtenus avec des lignes de production homogènes dans un contexte de demande saturée montrent clairement que la probabilité de blocage augmente en se déplaçant vers la fin de la ligne alors que la probabilité de désamorçage augmente. Des expériences effectuées dans ce travail confirment également ce phénomène ainsi que la diminution graduelle du niveau moyen du stock tampon en allant du stock B_1 vers B_m .

Il a également été remarqué sur les figures 10 (a), (b) et (c) que le transfert d'une petite capacité d'un stock tampon à un autre ne semblait pas affecter le coût de façon significative. Nous croyons que cette constatation vient soutenir l'utilisation d'une droite pour la distribution des stocks de la portion milieu de la ligne. En effet, même si cette distribution est approximative et a comme effet de niveler la capacité des stocks, les petits transferts de capacité d'un stock à un autre en comparaison avec la véritable distribution optimale n'aura pas un effet significatif sur le coût résultant. Le profil que nous avons remarqué dans cette section sera donc utilisé pour réduire le nombre de paramètres dans les problèmes des lignes longues dans la section suivante.

3.7 Distribution de l'espace de stockage en fonction du profil observé

Comme nous l'avons remarqué dans la section précédente, il se dessine un profil caractéristique de la distribution optimale des capacités des stocks le long de la ligne. Ce profil consiste en deux points indépendants, Z_1 et Z_m , et une portion linéaire de Z_2 à Z_{m-1} . Ce profil est représenté à la figure 17. Nous proposons donc l'optimisation de seulement quatre paramètres, soit Z_1 , Z_2 , Z_{m-1} et Z_m , alors que la section milieu de la ligne sera interpolée linéairement entre Z_2 et Z_{m-1} . Malgré que ce profil ne représente probablement pas la distribution exacte des seuils critiques décentralisés, des résultats plus que satisfaisants en découleront tout en réduisant de façon considérable l'effort expérimental nécessaire à l'optimisation, en comparaison avec l'optimisation à m paramètres. Par exemple, le plan d'expériences CCD à quatre paramètres avec deux points de centre répliqué quatre fois donne 130 expériences. Le même plan d'expériences avec huit paramètres donne 1370 expériences et le plan factoriel à trois niveaux donne 6561 expériences. En considérant que le temps de simulation augmente avec la complexité du système (la longueur dans le cas présent), nous constatons que ce profil devient rapidement très utile, voire nécessaire pour les lignes longues. Nous nous

rappelons également que toute technique d'optimisation nécessiterait un très grand nombre de simulations.

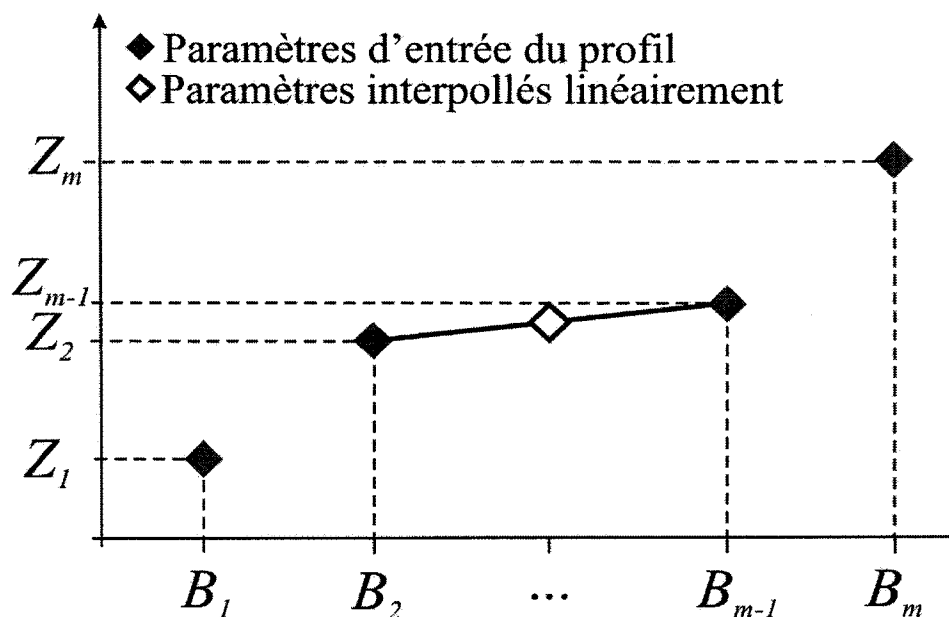


Figure 17 Profil paramétré à 4 variables

Les tableaux suivants montrent les résultats obtenus en optimisant ce profil à 4 paramètres. Pour faciliter la comparaison des résultats du profil avec ceux de l'optimisation complète à m paramètres, les deux résultats sont présentés dans les mêmes tableaux. L'optimisation complète est notée « comp » et l'optimisation du profil est notée « heur ». Dans tous les cas, l'hypothèse nulle H_0 du test d'hypothèse n'a pu être rejetée, avec un niveau de confiance de 95% (A=accepter).

Tableau XIII

Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour cinq machines

c^-/c^+		Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)	H_0
100	Comp	4.20	8.14	9.57	8.72	24.69	51.70	[49.94:52.20]	A
	Heur	4.73	7.78	9.64	11.5	20.98	51.25	[49.77:51.85]	
20	Comp	3.75	7.07	7.85	10.02	14.70	39.84	[38.86:40.00]	A
	Heur	3.92	7.50	8.58	9.65	13.19	39.53	[38.97:40.03]	

Tableau XIV

Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour six machines

c^-/c^+		Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	Z_6^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)	H_0
100	Comp	4.52	6.69	9.08	9.69	10.42	24.12	57.53	[56.51:58.41]	A
	Heur	4.56	7.50	8.64	9.79	10.93	21.64	56.69	[56.34:57.34]	
20	Comp	3.06	8.59	8.65	7.50	8.50	17.06	45.46	[45.51:46.63]	A
	Heur	3.50	6.85	7.85	8.85	9.85	15.30	45.60	[45.00:46.30]	

Tableau XV

Résultats pour les optimisations complètes et avec le profil pour sept machines

c^-/c^+		Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*	Z_6^*	Z_7^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)	H_0
100	Comp	3.50	7.00	9.00	9.28	9.76	9.93	25.10	64.28	[64.05:66.55]	A
	Heur	4.00	8.00	8.79	9.58	10.36	11.15	22.07	65.19	[63.90:66.46]	
20	Comp	2.93	7.13	8.56	8.45	8.90	9.56	15.72	52.90	[51.47:52.67]	A
	Heur	3.05	7.81	8.28	8.74	9.21	9.67	14.60	52.73	[51.64:52.72]	

Nous remarquons que les résultats sont très près dans tous les cas. De plus, le profil ne donne pas systématiquement un coût supérieur à l'optimisation complète. Les résultats montrent donc que le profil donne une très bonne approximation de la distribution optimale.

Pour illustrer l'utilité d'une telle heuristique, nous donnons au tableau XVI un exemple à 20 machines. Ce cas a été optimisé à l'aide du profil proposé plus haut. Les résultats ne peuvent pas être comparés avec l'optimisation complète puisqu'elle ne pouvait être effectuée avec la technique proposée ici. Le cas est donc proposé à titre d'exemple.

Tableau XVI

Résultats pour l'optimisation avec le profil pour l'exemple à 20 machines

c^-/c^+	Z_1^*	Z_2^*	$Z_i^*; i=3,\dots,18.$	Z_{19}^*	Z_{20}^*	\tilde{C}^*	Validation IC (95%)
100	3.5	7.17	$f(Z_2, Z_{m-1}, m, i)$	10.76	24.2	143.8	[143.61:152.57]

Dans le tableau XVI, les seuils Z_3 à Z_{m-2} sont donnés par l'équation (3.11).

$$f(Z_2, Z_{m-1}, m, i) = Z_2 + (i-1) * (Z_{m-1} - Z_2) / (m-3), i = 3, \dots, m-2. \quad (3.11)$$

En comparaison, le nombre de simulations pour un plan d'expériences CCD avec deux points de centre répliqué quatre fois est de 5 243 090 et 17 433 922 005 pour le plan factoriel à trois niveaux. L'effort de calcul nécessaire à l'optimisation complète serait beaucoup trop important pour justifier qu'elle soit entreprise. La simulation exhaustive de toutes les combinaisons serait tout simplement impossible avec les ordinateurs d'aujourd'hui.

3.8 Conclusion

Nous avons présenté une série de résultats d'optimisation de politique DHP ou kanban pour les lignes de transfert homogènes à l'aide de simulation combinée discrète/continue, de plans d'expériences et de surfaces de réponse. Le but d'un tel problème est de minimiser le coût moyen d'inventaire et de rupture. Nous avons observé qu'un profil caractéristique se dessine dans la distribution des stocks le long de la ligne. Ce profil consiste en deux points indépendants au premier et dernier stock ainsi qu'une distribution linéaire pour les stocks de la partie milieu de la ligne. Nous avons proposé une heuristique, basée sur cette observation qui nous permet de réduire l'effort d'optimisation pour les lignes à plus de quatre machines à seulement quatre paramètres. Une telle heuristique est hautement désirable puisqu'elle réduit le nombre de simulations nécessaires pour résoudre le problème et conséquemment l'effort de calcul requis. Un exemple d'une ligne à 20 machines, qui aurait été pratiquement impossible à résoudre par l'optimisation à 20 paramètres, a été optimisé à l'aide du profil proposé. Nous avons présentons les résultats à titre d'exemple de l'utilité de l'heuristique.

CHAPITRE 4

ÉTUDE COMPARATIVE DE MÉCANISMES DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION À FLUX TIRÉS

Résumé

Nous nous penchons sur les lignes de production à un produit dont les machines sont sujettes à des pannes. Nous considérons les coûts de détention (inventaire et stockage) et les coûts de rupture. Étant donnés les multiples mécanismes de contrôle à flux tirés proposés ces dernières années, il est difficile de choisir le mécanisme le plus adapté à une application particulière. À l'aide de simulation et de plan d'expériences, nous optimisons et comparons un ensemble de lignes homogènes contrôlées par kanban, CONWIP et l'hybride kanban/CONWIP. Nous observons que le mécanisme hybride est toujours meilleur que le mécanisme CONWIP lorsque les coûts relatifs au stockage et à l'inventaire sont considérés explicitement. Cependant, lorsque ces coûts ne sont pas considérés explicitement mais plutôt agrégés ensemble dans le coût de détention, nous concluons qu'il n'y a pas de différence entre le mécanisme CONWIP et le mécanisme hybride. De plus, kanban surclasse CONWIP lorsque la taille de la ligne et le coût de stockage sont assez importants.

4.1 Introduction

Le « lean manufacturing » s'est imposé en quelques décennies comme étant beaucoup plus qu'une autre mode industrielle. La capacité de réduire les inventaires à un minimum tout en maintenant des performances de chef de file est devenue un facteur prédominant pour le succès en production de masse. Afin d'atteindre ces faibles niveaux d'inventaire, les industriels ont recours à des mécanismes de contrôle des flux tirés, une composante du « lean manufacturing », afin de contrôler la production et les déplacements des pièces dans le système. De tous les mécanismes, nous nous

concentrons sur trois : (i) kanban parce qu'il est le plus communément appliqué, (ii) CONWIP (acronyme de l'anglais « CONstant Work-In-Process ») parce qu'il a donné des performances supérieures à kanban dans plusieurs études et l'hybride kanban/CONWIP parce qu'il a donné des résultats prometteurs dans Bonvik et al. (1997).

Depuis son introduction chez Toyota dans les années 70, kanban a eu beaucoup de succès dans des applications industrielles. Ce mécanisme consiste à assigner un nombre fini de cartes à chaque poste de travail de la ligne. Ce mécanisme a été largement étudié dans la littérature scientifique. Berkley (1992) a fait une revue de la littérature disponible au moment de sa publication. La facilité d'implémentation à l'aide de cartes d'autorisation de production et les performances améliorées dans les applications de production de masse l'ont rendu attrayant aux yeux des praticiens. Pour les lignes de production à un produit, ce mécanisme est identique à la politique à stocks tampons finis (« finite buffer policy ») et la politique du « hedging point » décentralisée (« decentralized hedging point policy », Sadr & Malhame (2004)).

CONWIP a été introduit par Spearman et al. (1990). Il consiste à limiter le niveau d'inventaire total dans le système à tout moment. Toutes les zones de stockage doivent avoir une capacité égale à la limite de l'inventaire total. L'introduction de nouvelles pièces dans le système est contrôlée par l'arrivée des demandes au stock de produits finis. Framinan et al. (2003) ont présenté une revue d'études comparatives traitant du mécanisme CONWIP et ils ont noté que la très grande majorité des études concluent sur la supériorité de CONWIP face à kanban dans les critères de performance mais également en robustesse. Cependant, Gstettner & Kuhn (1996) et Muckstadt & Tayur (1995) ont conclu que kanban donnait un niveau d'inventaire inférieur à CONWIP pour le même taux de production. CONWIP a également l'avantage de n'avoir qu'un seul paramètre à optimiser, ce qui réduit grandement l'effort nécessaire à son optimisation. Cependant, tous les stocks doivent être en mesure de contenir l'ensemble de l'inventaire,

ce qui soulève quelques questions concernant le coût de cet espace de stockage. L'attribution de tout cet espace de stockage dans la phase de conception engendre vraisemblablement des coûts qui ne sont généralement pas pris en compte dans les études comparatives de tels mécanismes. Les coûts de stockage sont généralement agrégés au coût d'inventaire dans le coût de possession. Il pourrait être plus approprié de considérer les coûts d'inventaire et de stockage indépendamment. À notre connaissance, aucune étude comparative ne prend en compte ce facteur.

Dans une tentative de combiner les avantages de kanban et de CONWIP, Bonvik et al. (1997) ont introduit le mécanisme hybride kanban/CONWIP. Il consiste à limiter l'inventaire total admissible dans le système à tout moment tout en limitant l'accumulation d'inventaire localement dans les stocks tampons à la suite de pannes de machines. Bonvik et al. (1997) ont comparé le niveau d'inventaire minimum nécessaire à l'atteinte d'un taux de service imposé de 99.9% pour plusieurs mécanismes. Ils ont observé que le mécanisme hybride surclasse significativement kanban et légèrement CONWIP. Bonvik (1996) a noté que l'avantage pourrait croître avec le taux d'utilisation du système.

Pour comparer les différents mécanismes, leurs performances doivent être mesurées. Il existe plusieurs outils pour évaluer ces performances sans effectuer les tests sur le système réel. Dans la littérature scientifique concernant les lignes de production, les techniques de décomposition sont largement étudiées. La plupart d'entre elles utilisent le taux de production asymptotique comme mesure principale. Ce sont des méthodes approximatives qui s'appuient sur la solution de problèmes plus simples comme la solution exacte de la ligne à deux machines développée par Gershwin & Schick (1979). Les lignes sont décomposées en une suite de lignes à deux machines séparées par un stock tampon, la première machine représentant la portion de la ligne en amont de ce stock et la deuxième machine représentant la portion en aval. Dallery et al. (1989) ont introduit leur algorithme DDX (pour Dallery-David-Xie) qui utilise une représentation

continue du flux de matière. Burman (1995) étend la technique à des lignes non-homogènes Dallery & Le Bihan (1999) élargissent le champs d'application de la technique à des distributions de pannes et de réparation à l'aide de distributions exponentielles généralisées. Schor (1995) et Gershwin & Schor (2000) ont développé des algorithmes d'optimisation pour deux problèmes : (i) la distribution d'un espace de stockage total déterminé parmi les zones de stockage dans le but de maximiser le taux de production et (ii) minimiser l'espace de stockage total nécessaire à l'atteinte d'un taux de production déterminé. Bonvik et al. (2000) ont présenté une technique de décomposition pour les lignes de production contrôlées par un mécanisme hybride. Cette technique est dite très rapide et précise, mais l'erreur sur le niveau de rupture devient très importante lorsque la demande est proche de la capacité du système. Nous croyons que cela peut poser un inconvénient dans les problèmes de minimisation des coûts où le niveau de rupture est pénalisé. Sadr & Malhame (2004) ont proposé un algorithme de décomposition/agrégation pour minimiser les coûts d'inventaire et de rupture encourus pour une ligne de production partiellement homogène gouvernée par un mécanisme kanban. Cependant, une étude étendue concernant la précision de cette technique n'a pas été effectuée. Une comparaison de résultats entre nos modèles de simulation et leur technique de décomposition tend à montrer que la technique de décomposition sous-estime le niveau de rupture de façon très significative. Duri et al. (2000b) ont étudié analytiquement une ligne à trois machines avec temps de traitement variables sous CONWIP avec inspections. Golany et al. (1999) ont utilisé la technique de recuit simulé pour déterminer le nombre de cartes optimal pour un problème de système sous CONWIP avec produits multiples. Ils ont utilisé un modèle analytique. Les techniques analytiques et de décomposition n'ont par contre jamais été utilisées dans des études comparatives de plusieurs mécanismes pour des lignes de production dont les machines sont sujettes à des pannes.

Généralement, les études comparatives sont conduites sur un système unique dont les paramètres sont fixes, habituellement une ligne relativement petite avec des stocks

tampons de taille réduite. Afin de comparer les mécanismes, nous devons d'abord trouver la configuration de chaque mécanisme dans laquelle il donne les meilleures performances relativement au critère choisi. Cette tâche peut s'avérer très complexe. Framinan et al. (2003) ont noté que certaines comparaisons sont faites sans avoir auparavant déterminé la meilleure configuration de chaque mécanisme. La plupart du temps, toutes les combinaisons sont simulées et la meilleure configuration est choisie parmi les résultats tel que dans Bonvik et al. (1997). Cependant, procéder de cette manière n'est pas très efficient, et ne peut être entrepris que pour un petit nombre de paramètres et un petit nombre de valeurs possibles par paramètre. Par exemple, un mécanisme avec six paramètres et dix valeurs possibles par paramètre donne un million de combinaisons différentes pouvant être simulées, sans prendre en considération les réplifications multiples nécessaires pour calculer les intervalles de confiance, ce qui est très coûteux en terme de temps de calcul.

En utilisant le cadre développé par Gharbi & Kenné (2003) et Kenné & Gharbi (2004b) pour la simulation par événements discrets, nous avons proposé au chapitres 1 et 2 l'utilisation d'un modèle de simulation combiné discret/continu, de plan d'expériences et de surfaces de réponse pour optimiser le mécanisme kanban. Nous proposons donc ici d'utiliser la même technique de modélisation combinée discrète/continue adaptée aux différents mécanismes ainsi que l'utilisation de plan d'expériences et de méthodologie de surface de réponse pour minimiser les coûts d'inventaire, de stockage et de rupture. Cette minimisation sera effectuée pour les trois mécanismes proposés plus haut. Les résultats de l'optimisation seront ensuite utilisés pour la comparaison des coûts d'opération entre les mécanismes.

Les sections suivantes sont présentées de la façon suivante : la section 3.2 donne l'énoncé du problème, la section 3.3 l'approche expérimentale, la section 3.4 présente le modèle de simulation et la section 3.5 traite des plans d'expériences et de la méthodologie de surface de réponse. La section 3.6 présente l'analyse des résultats, la

section 3.7 l'analyse de sensibilité et la comparaison des mécanismes. Nous discutons ces résultats à la section 3.8 et concluons à la section 3.9.

4.2 Mécanismes et critère de performance

Différents mécanismes de contrôle des flux tirés ont été développés dans le passé pour contrôler les flux de pièces et d'information, souvent sous la forme de cartes ou de contenants autorisant la production de pièces. Les sous-sections suivantes présentent les mécanismes kanban, CONWIP et hybride ainsi que la mesure de performance qui sera utilisée.

4.2.1 Kanban

Le premier mécanisme à avoir été introduit fut kanban dans les années 1970 chez Toyota au Japon. Cependant, plusieurs auteurs argumentent qu'une ligne de production contrôlée par kanban avec demande saturée équivaut à la ligne de transfert automatique qui a été étudiée dès les années 1950 (Berkley (1992)). Appliquée à une ligne de production sans opérations de transport, ce mécanisme de contrôle est montré à la figure 18. Les flèches pleines y représentant le transfert de pièces (avec carte attachée) et les flèches pointillées le transfert de cartes.

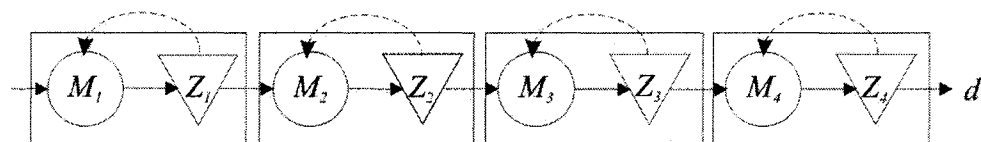


Figure 18 Mécanisme kanban pour une ligne à $m=4$ machines

Adapté à notre problème de ligne de production, kanban est semblable à la politique à stocks tampons finis (« finite buffer policy ») avec une carte attribuée à chaque unité d'espace dans le stock et chaque machine travaillant pour garder son stock tampon plein.

Chaque carte autorise la production d'une pièce. Le stock B_i a donc une capacité Z_i . Lorsqu'une pièce est produite, une carte y est attachée et elles sont envoyées au stock tampon. Au fur et à mesure que les pièces sont réquisitionnées par la machine en aval du stock tampon (ou les clients pour le stock de produit fini), les cartes sont renvoyées à la machine en amont du stock tampon pour autoriser la production de nouvelles pièces. Lorsqu'une machine est opérationnelle et disponible, qu'elle a des pièces et des cartes disponibles, elle peut opérer. Dans le cas de flux de matière continu, la notion de cartes ne s'applique pas. Nous parlons alors de capacité du stock ou de niveau de « hedging ». La structure de la loi de commande des taux de production est traduite par l'équation suivante adaptée de la politique du « hedging point ».

$$u_i(\cdot) = \left. \begin{cases} u_{\max} & \text{if } x_i(t) < Z_i \\ d_i(t) & \text{if } x_i(t) = Z_i \\ 0 & \text{if } x_i(t) > Z_i \\ 0 & \text{si } x_{i-1}(t) = 0 \text{ avec } i > 1 \end{cases} \right\} i = 1, \dots, m. \quad (4.1)$$

avec $u_i(t)$ le taux de production de la machine M_i et $d_i(t)$ le taux de la demande au stock B_i à l'instant t . La demande $d_m(t)$ est constante au taux d . Le vecteur des paramètres d'entrée pour ce mécanisme est $Z = \{Z_1, \dots, Z_m\}$. Une machine ne sera pas en mesure d'obéir à l'équation (4.1) dans deux cas : (i) elle est en panne ou (ii) le stock tampon où elle s'approvisionne est vide (elle est désamorcée). Le blockage est assimilé à la loi de commande puisque la machine M_i cessera de produire lorsque $x_i(t)$ dépassera le seuil Z_i ce qui ne survient qu'à la suite d'une panne de la machine M_{i+1} . Le maximum d'inventaire admissible en même temps dans le système est égal à la somme des capacités de tous les espaces de stockage de la ligne. Aujourd'hui, kanban est considéré par plusieurs comme étant un mécanisme à la fine pointe de la technologie. Cependant, ce mécanisme a été surclassé par plusieurs mécanismes incluant CONWIP et hybride.

4.2.2 CONWIP

Le second mécanisme proposé est CONWIP (acronyme de l'anglais CONStant Work-In-Process). Ce mécanisme limite le niveau total d'en-cours présent dans un système à tout moment. Toutes les zones de stockage ont une capacité égale à la limite d'inventaire. Dans le cas de pièces discrètes, il peut être implanté facilement à l'aide d'un ensemble unique de cartes ou de contenants qui sont renvoyés du stock de produits finis à la première machine tel qu'illustré à la figure 19 pour une ligne de production à quatre machines.

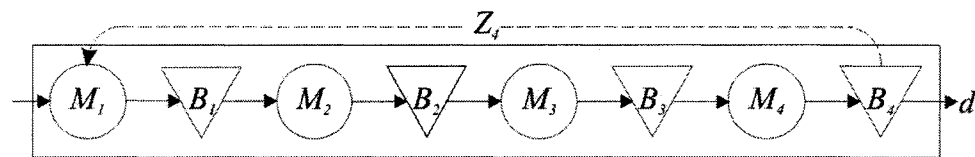


Figure 19 Mécanisme CONWIP pour une ligne à $m=4$ machines

Au fur et à mesure que les demandes sont satisfaites par stock de produits finis, les cartes sont renvoyées à la première machine. Lorsque la machine M_1 est opérationnelle, elle produit au taux u_{max} si $x^+(t) < Z_m$, au taux de la demande d si $x^+(t) = Z_m$ ou au taux 0 si $x^+(t) > Z_m$. Une fois que les pièces sont introduites dans le système, elles descendent la ligne selon la règle du premier arrivé, premier servi, de la même manière que les systèmes à flux poussés. La carte resta attachée à la pièce jusqu'à ce qu'elle rejoigne un client. Dans le cas de flux de matière continu, les équations (4.2) (a) et (b) présente le fonctionnement du mécanisme sous forme de loi de commande.

$$\begin{aligned}
 a) \quad u_1(t) &= \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x^+(t) < Z_m \\ d_m(t) & \text{si } x^+(t) = Z_m \\ 0 & \text{si } x^+(t) > Z_m \end{cases} \\
 b) \quad u_i(t) &= \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_{i-1}(t) > 0 \\ u_{i-1}(t) & \text{si } x_{i-1}(t) = 0 \end{cases} \Big|_{i=2, \dots, m}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

avec $u_i(t)$ le taux de production de la machine M_i , $d_i(t)$ le taux de la demande au stock B_i et $x^+(t)$ l'inventaire instantané total défini à l'équation (1.13) au premier chapitre. La demande $d_m(t)$ est constante au taux d . Nous remarquons que la machine M_1 contrôle le niveau d'inventaire total dans le système afin qu'il ne dépasse pas Z_m (équation (4.2)-(a)). Les machines M_2 à M_m tentent d'envoyer les pièces le plus rapidement possible au stock de produits finis (équation (4.2)-(b)). Lorsque le stock en B_{i-1} se vide, la machine M_i produit au taux de la machine M_{i-1} . Si la machine M_{i-1} est en panne, la machine M_i est alors désamorçée. Le vecteur de paramètres d'entrée du mécanisme est $Z=\{Z_m\}$. Une fois de plus, les machines vont obéir à cette loi de commande tant qu'elles ne sont pas en panne ou désamorçées, le blocage étant intégré à la loi de commande. Ce mécanisme est supporté par l'hypothèse du coût d'inventaire égal tout au long de la ligne. Étant donnée cette hypothèse, il peut sembler plus approprié d'envoyer les pièces le plus rapidement possible au stock de produit fini où elles permettront de satisfaire des demandes de clients au lieu de s'accumuler le long de la ligne. Conséquemment, l'inventaire ne s'accumulera dans les stocks intermédiaires, seulement suite à des pannes, devant la machine l'ayant subie (puisque toutes les pièces peuvent être contenues dans chaque stock. Un avantage de ce mécanisme est sa simplicité : en utilisant un paramètre unique, la limite de l'inventaire, il est facilement optimisé. Cependant, avec l'augmentation de la longueur de la ligne, la capacité de chaque stock doit augmenter aussi. Ceci peut devenir très coûteux en espace de stockage.

4.2.3 Hybride kanban/CONWIP

Ce mécanisme ressemble à kanban en ce que tous les stocks internes de la ligne de production opèrent de façon semblable à kanban. Leur capacité est inférieure (ou égale) à la limite de l'inventaire total. La différence principale est que les cartes associées au stock B_m sont envoyées à la machine M_l lorsque les pièces trouvent preneur, comme le mécanisme CONWIP, et non à la machine M_m , comme le mécanisme kanban. La limite d'inventaire dans le système est donc fixée par cette boucle. Conséquemment, puisque toutes les pièces du système peuvent être contenues dans le stock de produits finis, elles seront envoyées à la fin de la ligne le plus rapidement possible comme pour CONWIP. Ce mécanisme pour une ligne à 4 machines est illustré à la figure 20.

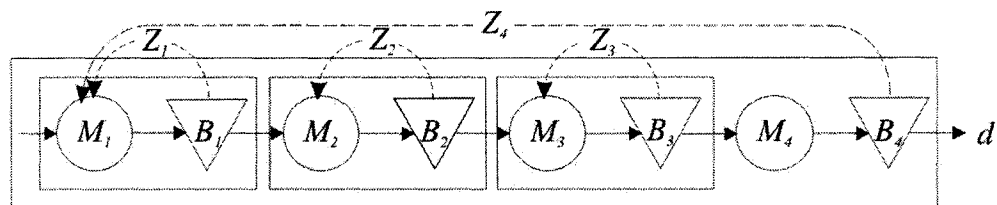


Figure 20 Mécanisme hybride pour une ligne à $m=4$ machines.

Lorsqu'une panne survient à une machine, l'accumulation de pièces dans le stock immédiatement en amont de la machine est limitée par sa capacité (nombre de cartes). On croit que l'avantage de ce mécanisme réside dans cette limitation de l'accumulation de pièces devant une machine suite à une panne en comparaison avec CONWIP. Par contre, en envoyant les pièces rapidement au stock de produits finis pour satisfaire les demandes, le niveau de rupture s'en trouve réduit. Le fonctionnement de ce mécanisme se traduit par l'équation (4.3) :

$$\begin{aligned}
a) \quad u_1(t) &= \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_1(t) < Z_1 \text{ ou } x^+(t) < Z_m \\ d_m(t) & \text{si } x_1(t) = Z_1 \text{ ou } x^+(t) = Z_m \\ 0 & \text{si } x_1(t) > Z_1 \text{ ou } x^+(t) > Z_m \end{cases} \\
b) \quad u_i(t) &= \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_i(t) < Z_i \\ d_i(t) & \text{si } x_i(t) = Z_i \\ 0 & \text{si } x_i(t) > Z_i \end{cases} \quad i = 2, \dots, m. \\
c) \quad u_m(t) &= \begin{cases} u_{\max} & \text{si } x_{m-1}(t) > 0 \\ u_{m-1}(t) & \text{si } x_{m-1}(t) = 0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

avec $u_i(t)$ étant le taux de production de la machine M_i , $d_i(t)$ le taux de la demande au stock B_i et $x^+(t)$ le niveau d'inventaire défini à l'équation (2.11). La demande $d_m(t)$ est constante au taux d . Le vecteur de paramètres d'entrée du mécanisme est $Z = \{Z_1, \dots, Z_m\}$. Pour les machines M_2 à M_{m-1} , nous reconnaissons à l'équation (4.3)-(b) le mécanisme kanban alors que la machine M_1 a deux paramètres de commande (équation (4.3)-(a)). La machine M_m envoie les pièces dans le stock de produits finis le plus rapidement possible (équation (4.3)-(c)). Comparé au mécanisme CONWIP, il a l'avantage de réduire l'espace de stockage le long de la ligne, réduisant ainsi l'espace total nécessaire. Nous remarquons que lorsque tous les stocks ont la même capacité, le mécanisme se comporte de façon identique à CONWIP.

4.3 Mesure de performance

Différents coûts sont associés à l'opération des systèmes de production. Stevenson & Hojati (2001) les séparent en trois catégories : coûts de détention, coûts de rupture et coûts de commande. Notre système présente les deux premières puisque nous ne considérons pas le problème de l'approvisionnement de la ligne. Les coûts de rupture peuvent inclure des pénalités de retard, ou, pour les clients internes, des coûts de perte de production. Ils peuvent également inclure des coûts difficilement quantifiables comme la détérioration de l'image de marque. Dans notre système, les coûts de rupture

sont liés au niveau de rupture moyen. Le coût unitaire de rupture est noté c^- . En général, les coûts de stockage sont inclus dans le coût de détention. Cependant, Dobler et al. (1990) donnent un fractionnement du coût de détention montrant qu'une portion significative (2 à 15%) du coût de détention est liée au stockage (espace, équipement, personnel, etc...). De tels coûts sont liés principalement à la capacité de stockage et aux équipements. Il peut sembler inapproprié de pénaliser le stockage que lorsqu'il est utilisé. Conséquemment, il est parfois plus approprié de pénaliser l'espace de stockage même pour obtenir une meilleure représentation de la structure des coûts, en particulier lors de la comparaison de différents mécanismes de contrôle de la production. Nous définissons donc le coût unitaire pour l'espace de stockage et le notons c^{st} . La partie la plus importante du coût de détention est liée à l'inventaire même. Le coût unitaire d'inventaire est noté c^+ . Les coûts d'inventaire sont liés à la valeur immobilisée par les pièces dans le système, les assurances, l'endommagement, etc...

Le mécanisme de contrôle dicte le taux de production de chaque machine dépendant de l'état de la ligne. Les niveaux d'inventaire et de rupture obtenus avec ces mécanismes dépendent des réglages de ces mécanismes (paramètres d'entrée). La mesure de performance utilisée est le coût total d'inventaire, de rupture et de stockage $\bar{C}(Z)$ pour un vecteur de paramètres d'entrée Z donné par l'équation (4.4) :

$$\bar{C}(Z) = c^+ \bar{x}^+ + c^- \bar{x}^- + \sum_{i=1}^m BC_i c^{st} \quad (4.4)$$

où BC_i est la capacité de stockage du stock tampon B_i et \bar{x}^+ est le niveau d'inventaire moyen calculé par l'équation (4.5) :

$$\bar{x}^+ = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x^+(t) dt / T \quad (4.5)$$

avec T étant l'horizon de planification et $x^+(t)$ la somme des niveaux des stocks tampons ($x_i(t), i=1, \dots, m$) à l'instant t calculé à l'équation (4.6).

$$x^+(t) = \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t) + \max(x_m(t), 0) \quad (4.6)$$

Le niveau instantané ($x^-(t)$) et moyen (\bar{x}^-) de rupture sont donnés respectivement par (4.7) et (4.8).

$$x^-(t) = \max(0, -x_m(t)) \quad (4.7)$$

$$\bar{x}^- = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x^-(t) dt / T \quad (4.8)$$

Nous considérons que le coût pour l'espace de stockage et pour l'inventaire est constant le long de la ligne.

4.4 Approche proposée et modèles de simulation

Nous reprenons pour l'optimisation des différents mécanismes la méthodologie proposée à la section 2.3. La différence principale réside dans les modèles de simulation utilisés. Leur modélisation est basée sur la section 2.4. Cependant, les différents mécanismes de production sont implantés dans le bloc POLITIQUE DE COMMANDE du diagramme du modèle de simulation (Figure 7). Les modèles de simulation (réseaux, fichier contrôle et fonctions en langage C) pour les mécanismes kanban, CONWIP et hybride pour une ligne à $m=4$ machines sont présentés à l'annexe 1.

Nous reprenons également l'approche de plans d'expériences et de surfaces de réponses proposée à la section 3.5. Comme le mécanisme CONWIP n'a qu'un seul paramètre, cette approche ne peut s'appliquer. Nous utiliserons la méthode graphique pour trouver son optimum.

4.5 Analyse des résultats

Les analyses de résultats pour la ligne à quatre machines avec $c^{st}=0.1$ pour les mécanismes kanban, CONWIP et hybride sont données ici. Les tableaux d'analyse de variance (ANOVA) montrent les effets observés pour les différentes sources de variance possibles. Les tableaux de ANOVA montrent uniquement les sources de variance qui sont considérées comme étant significatives par l'analyse. Si la valeur de la « P-Value » est supérieure à 5% (pour un intervalle de confiance à 95%) nous considérons que la source n'est pas significative. Les paramètres du système sont montrés au tableau XVII.

Tableau XVII

Paramètres communs pour tous les cas étudiés

$MTTF_i$	$MTTR_i$	d	u_{\max}	c^+	c^-	T
100	3	1	1.1	1	100	10^6

4.5.1 Analyse des résultats pour l'exemple avec kanban

Dans cette section nous présentons l'analyse d'une ligne de production à quatre machines contrôlée par kanban. Le tableau XVIII montre le ANOVA de la réponse de l'inventaire. Nous remarquons que le coefficient R^2 est de presque 100%. Le niveau d'inventaire est expliqué presque entièrement par les différentes sources. Nous remarquons que les F-Ratios pour les facteurs individuels sont très grands par rapport aux interactions ou aux carrés de facteurs. Ceci montre que la surface est presque un hyper plan avec une légère courbure. Le niveau d'inventaire augmente presque linéairement avec la capacité des stocks. Les valeurs des coefficients pour la réponse de l'inventaire sont présentées au tableau XIX.

Tableau XVIII

ANOVA pour les résultats de l'inventaire

Source	Somme des carrés	Df	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	569.237	1	569.237	1129232.08	0
B:Z2	466.447	1	466.447	925321.17	0
C:Z3	435.539	1	435.539	864006.22	0
D:Z4	399.823	1	399.823	793153.49	0
AA	0.725873	1	0.725873	1439.96	0
AB	0.136156	1	0.136156	270.1	0
AC	0.00752035	1	0.00752035	14.92	0.0002
AD	0.002334	1	0.002334	4.63	0.0337
BB	0.0579812	1	0.0579812	115.02	0
BC	0.013445	1	0.013445	26.67	0
BD	0.00219821	1	0.00219821	4.36	0.0391
CC	0.0166577	1	0.0166577	33.04	0
CD	0.00273007	1	0.00273007	5.42	0.0218
blocs	1.17123	9	0.130137	258.16	0
Erreur total	0.0539379	107	0.00050409		
Total (corr.)	1873.26	129			$R^2 = 99.997\%$

Tableau XIX

Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire (kanban)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}	β_{12}	β_{13}
-11.604	1.591	1.294	1.136	0.9569	-3.188E-2	-1.031E-2	-2.4239E-3

β_{14}	β_{22}	β_{23}	β_{24}	β_{33}	β_{34}
1.350E-3	-9.011E-3	-3.241E-3	1.310E-3	-4.830E-3	1.460E-3

Pour les résultats de rupture, la variance des résidus augmente avec la valeur de la moyenne. Dans le but d'uniformiser la variance et d'augmenter le coefficient R^2 , nous

avons utilisé une transformation mathématique de la réponse. La transformation qui fonctionne le mieux dans le cas présent est l'exposant fractionnaire. Pour plus de détails concernant les transformations, nous référons le lecteur à Montgomery (2005). Le tableau XX présente l'ANOVA pour la réponse de la rupture moyenne avec une transformation exponentielle de $\frac{1}{2}$. Nous remarquons un coefficient R^2 une fois de plus très élevé à 99.07%. Cependant, un tel niveau d'explication est nécessaire parce que la pénalité sur le niveau de rupture est beaucoup plus élevée que celle pour l'inventaire dans les cas étudiés. Les coefficients de la fonction réponse transformée sont donnés au tableau XXI.

Tableau XX

ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de $1/2$
(kanban)

Source	Somme des carrés	Df	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	0.182355	1	0.182355	2486.26	0
B:Z2	0.145269	1	0.145269	1980.62	0
C:Z3	0.175473	1	0.175473	2392.43	0
D:Z4	0.144415	1	0.144415	1968.98	0
AA	0.00827506	1	0.00827506	112.82	0
AB	0.0120189	1	0.0120189	163.87	0
AC	0.0047569	1	0.0047569	64.86	0
AD	0.00113543	1	0.00113543	15.48	0.0001
BB	0.0019816	1	0.0019816	27.02	0
BC	0.00530674	1	0.00530674	72.35	0
BD	0.00121905	1	0.00121905	16.62	0.0001
CC	0.00152475	1	0.00152475	20.79	0
CD	0.001749	1	0.001749	23.85	0
DD	0.00033582	1	0.00033582	4.58	0.0347
blocs	0.156309	9	0.0173676	236.79	0
Erreur totale	0.00777457	106	7.3345E-05		
Total (corr.)	1873.26	129			$R^2 = 99.09\%$

Tableau XXI

Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de 1/2 (kanban)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}	β_{12}	β_{13}
2.80259	-0.1234	- 0.1068	0.1033	7.418E-2	3.416E-3	3.064E-3	1.928E-3

β_{14}	β_{22}	β_{23}	β_{24}	β_{33}	β_{34}	β_{44}
9.418E-4	1.671E-3	2.036E-3	9.759E-4	1.466E-3	1.169E-3	6.881E-4

Le coût total estimé est obtenu en multipliant les surfaces de réponse, ayant subi une transformation inverse le cas échéant, par leur coût unitaire et en les additionnant au coût de stockage tel qu'à l'équation (4.4). La configuration optimale ainsi que le coût estimé et l'intervalle de confiance de validation sont présentés au tableau XXII.

Tableau XXII

Configuration optimale, estimation du coût et validation (kanban)

	Z1	Z2	Z3	Z4	C (est.)	Validation IC (95%)
Kanban	5.0	7.9	11.0	20.5	47.98	[47.29,49.09]

4.5.2 Analyse des résultats pour l'exemple avec CONWIP

L'optimisation pour le mécanisme est une tâche beaucoup plus simple à effectuer. Après une série d'expériences pour déterminer le voisinage de l'optimum, nous conduisons des répliques multiples à des points variables. La technique la plus simple est de tracer les moyennes résultantes et de trouver le minimum graphiquement. La figure 21 montre le tracé des moyennes obtenues.

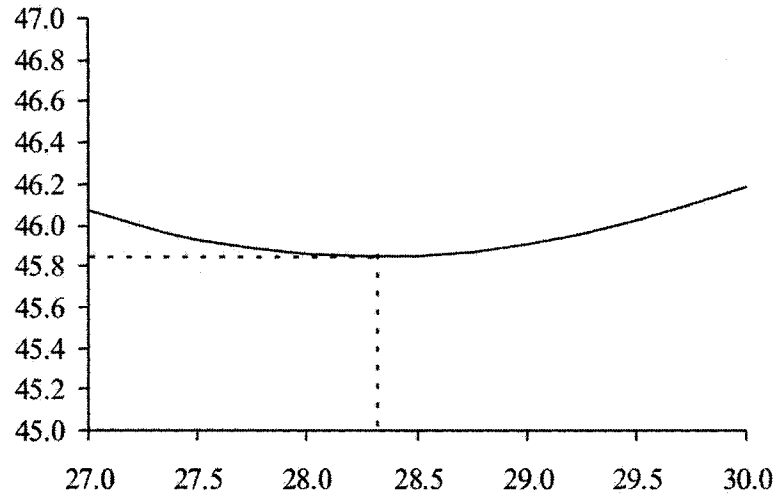


Figure 21 Coût total pour CONWIP vs Z4 ($c^+=1$, $c^-=100$, $c^{st}=0.1$)

Nous observons que le minimum de la courbe est à $Z_4=28.3$ avec un coût moyen de 45.85. La configuration optimale, l'estimation du coût et sa validation sont donnés au tableau XXIII.

Tableau XXIII

Configuration optimale, estimation du coût et validation (CONWIP)

	Z4	C (est.)	Validation IC (95%)
CONWIP	28.30	45.85	[45.25,46.43]

4.5.3 Analyse des résultats pour l'exemple avec hybride

Le tableau XXIV montre le ANOVA de la réponse de l'inventaire du mécanisme hybride. Ce tableau montre que le facteur le plus important est, de loin, Z_m , la boucle

CONWIP. Le coefficient R^2 est une fois de plus très élevé à 99.989%, résultant du long temps de simulation et d'une technique de réduction de la variance (technique des nombres aléatoires communs). Les coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse sont donnés au tableau XXV.

Tableau XXIV

ANOVA pour les résultats de l'inventaire

Source	Somme des carrés	Df	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	10.2016	1	10.2016	42094.65	0
B:Z2	0.882355	1	0.882355	3640.85	0
C:Z3	0.0579677	1	0.0579677	239.19	0
D:Z4	165.069	1	165.069	681122.53	0
AA	0.537931	1	0.537931	2219.66	0
AB	0.143344	1	0.143344	591.48	0
AC	0.0171952	1	0.0171952	70.95	0
BB	0.0342598	1	0.0342598	141.37	0
BC	0.0211903	1	0.0211903	87.44	0
blocs	0.11978	7	0.0171114	70.61	0
Erreur totale	0.0210843	87	0.00024235		0
Total (corr.)	192.596	103			$R^2 = 99.989 \%$

Tableau XXV

Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de l'inventaire (hybride)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}	β_{12}	β_{13}
-5.668	0.4414	0.1896	5.151E-2	0.9883	-1.316E-2	-5.540E-3	-1.918E-3

β_{22}	β_{23}
-3.322E-3	2.130E-3

Le tableau XXVI donne l'ANOVA pour les résultats de rupture. Une fois de plus, la transformation exponentielle fractionnaire a été utilisée sur les résultats du rupture pour obtenir l'uniformité de la variance des résidus et augmenter le coefficient R^2 , une fois de plus très élevé avec 97.22%. Le tableau XXVII donne les coefficients polynomiaux pour la surface de réponse de l'inventaire avec transformation.

Tableau XXVI

ANOVA pour les résultats de rupture avec une transformation exponentielle de 1/2 (hybride)

Source	Somme des carrés	Df	Carré moyen	F-Ratio	P-Value
A:Z1	0.0288442	1	0.0288442	367.91	0
B:Z2	0.0137913	1	0.0137913	175.91	0
C:Z3	0.0080646	1	0.0080646	102.86	0
D:Z4	0.0978825	1	0.0978825	1248.49	0
AA	0.0026265	1	0.0026265	33.5	0
blocs	0.0861331	7	0.0123047	156.95	0
Erreur totale	0.00713448	91	7.8401E-05		
Total (corr.)	192.596	103			$R^2 = 97.22 \%$

Tableau XXVII

Coefficients du polynôme décrivant la surface de réponse de la rupture avec une transformation exponentielle de 1/2 (hybride)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_{11}
1.209	-2.245E-2	-4.471E-3	-3.419E-3	-2.382E-2	9.188E-4

Le coût total estimé est obtenu en multipliant les surfaces de réponse, ayant subi une transformation inverse le cas échéant, par leur coût unitaire et en les additionnant au

coût de stockage tel qu'à l'équation (4.4). La configuration optimale ainsi que le coût estimé et l'intervalle de confiance de validation sont présentés au tableau XXVIII.

Tableau XXVIII

Configuration optimale, estimation du coût et validation (hybride)

	Z1	Z2	Z3	Z4	C (est.)	Validation IC (95%)
Hybride	9.52	13.55	14.04	31.00	41.21	[41.13,42.23]

4.6 Analyse de sensibilité

Dans cette section, nous présentons les résultats d'optimisation et la comparaison des coûts entre les mécanismes kanban, CONWIP et hybride pour des lignes de quatre à sept machines. Le tableau XVII donne les paramètres communs à toutes les lignes et les tableaux XXXIII-XXXVI montrent les résultats.

Tableau XXIX

Résultats pour les lignes à quatre machines

c^{st}		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	C (est.)	Validation IC (95%)	Diff.
.1	Kanban	5.0	7.9	11.0	20.5	47.98	[47.29,49.09]	15.6%
	Hybride	9.5	13.6	14.0	31.0	41.21	[41.13,42.23]	---
	CONWIP				28.3	45.85	[45.25,46.43]	10.0%
.05	Kanban	5.0	7.9	11.0	20.8	45.75	[45.20,47.45]	21.0%
	Hybride	11.4	14.5	14.5	30.0	38.11	[37.72,38.82]	---
	CONWIP				29.1	40.11	[39.55,40.67]	4.8%
.01	Kanban	5.0	8.0	11.0	21.0	43.96	[43.43,45.63]	25.8%
	Hybride	12.8	20.6	21.5	29.6	34.70	[34.63,35.75]	---
	CONWIP				29.9	35.39	[34.88,35.90]	1.7%
0	Kanban	5.4	9.2	9.6	20.8	44.13	[43.04,45.22]	29.1%
	Hybride	30.1	30.1	30.1	30.1	34.19	[33.68,34.70]	---
	CONWIP				30.1	34.19	[33.70,34.74]	---

Tableau XXX

Résultats pour les lignes à cinq machines

c^{st}		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	C (est.)	Validation IC (95%)	Diff.
.1	Kanban	4.0	8.4	8.4	11.3	21.8	56.86	[55.11,57.41]	18.6%
	Hybride	11.1	14.0	13.8	12.8	34.4	47.52	[46.70,48.18]	---
	CONWIP					32.0	54.47	[53.71,55.25]	14.8%
.05	Kanban	4.1	8.4	8.4	11.3	22.4	54.15	[52.31,54.71]	24.0%
	Hybride	12.7	15.6	14.8	14.8	33.3	43.30	[42.41,43.91]	---
	CONWIP					33.0	46.40	[45.70,47.08]	7.5%
.01	Kanban	3.9	8.4	8.5	11.1	23.8	51.72	[50.47,52.62]	31.8%
	Hybride	13.9	22.1	20.0	20.0	34.3	38.80	[38.59,39.69]	---
	CONWIP					33.8	39.73	[39.09,40.34]	1.5%
0	Kanban	3.9	8.4	8.5	11.1	23.9	51.16	[49.94,52.08]	34.0%
	Hybride	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	38.08	[37.46,38.66]	---
	CONWIP					34.2	38.08	[37.46,38.66]	---

Tableau XXXI

Résultats pour les lignes à six machines

c^{st}		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	C (est.)	Validation IC (95%)	Diff.
.1	Kanban	4.6	6.8	9.0	9.7	10.4	23.2	63.93	[62.64,64.76]	18.1%
	Hybride	9.4	11.2	12.1	12.1	12.6	39.8	54.55	[53.26,54.58]	---
	CONWIP						35.8	65.25	[64.67,65.85]	21.0%
.05	Kanban	4.5	6.7	9.1	9.7	10.4	23.6	60.74	[59.67,61.95]	24.4%
	Hybride	10.7	12.7	13.4	13.6	15.8	39.7	49.58	[48.34,49.44]	---
	CONWIP						37.0	54.36	[53.83,54.89]	11.2%
.01	Kanban	4.5	6.9	8.9	9.8	10.4	23.8	58.08	[57.11,59.02]	30.8%
	Hybride	12.6	17.5	18.4	21.5	21.9	38.9	44.58	[43.95,44.86]	---
	CONWIP						38.3	45.4	[44.92,45.81]	2.2%
0	Kanban	4.5	6.7	9.1	9.7	10.4	24.1	57.53	[56.51,58.41]	33.5%
	Hybride	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	43.10	[42.60,43.50]	---
	CONWIP						38.6	43.10	[42.60,43.50]	---

Tableau XXXII

Résultats pour les lignes à sept machines

c^{st}		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	C (est.)	Validation IC (95%)	Diff.
.1	Kanban	2.9	7.6	10.6	8.0	10.8	10.8	22.5	72.79	[71.34,73.98]	20.1%
	Hybride	10.5	10.9	14.4	12.3	11.5	11.6	43.6	61.10	[59.74,61.30]	---
	CONWIP							39.7	76.1	[75.29,76.87]	25.7%
.05	Kanban	2.8	7.6	10.7	8.0	10.8	10.8	23.1	69.12	[67.76,70.32]	26.7%
	Hybride	11.7	11.6	15.0	14.3	13.9	14.6	43.5	54.99	[53.83,55.17]	---
	CONWIP							41.0	62.05	[61.33,62.73]	13.8%
.01	Kanban	2.7	7.9	9.6	9.5	9.7	11.4	23.5	66.18	[64.81,67.29]	34.2%
	Hybride	14.0	21.8	22.1	23.7	24.7	25.3	42.9	49.25	[48.57, 49.78]	---
	CONWIP							42.4	50.49	[49.87,51.11]	2.7%
0	Kanban	3.5	7.0	9.0	9.3	9.8	9.9	25.1	64.28	[64.05,66.55]	37.7%
	Hybride	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8	47.51	[46.83,48.03]	---
	CONWIP							42.8	47.51	[46.83,48.03]	---

Nous remarquons que pour tous les cas où le coût de stockage est considéré explicitement, le mécanisme hybride donne les meilleurs résultats. Plus la valeur de c^{st} est élevée, plus le mécanisme hybride se démarque du mécanisme CONWIP. Par contre, lorsque le coût de stockage est agrégé au coût d'inventaire dans le coût de détention ($c^{st}=0$), nous n'avons pas trouvé une configuration du mécanisme hybride donnant de meilleurs résultats que le mécanisme CONWIP. Il est clair dans les résultats que l'avantage du mécanisme hybride décroît avec la valeur de c^{st} . Avec $c^{st}=.01$, les intervalles de confiance de validation se superposent même légèrement et la différence sur la moyenne est d'à peine 1.7 à 2.7%, en fonction de la longueur de la ligne. Conséquemment, nous croyons qu'il n'y a pas de différence entre les performances des mécanismes hybride et CONWIP lorsque le coût de détention est calculé uniquement en fonction du nombre de pièces dans le système. Puisque le mécanisme CONWIP est un cas limite du mécanisme hybride, lorsque tous les paramètres de ce dernier ont la même valeur, nous pensons que dans ce cas, le meilleur mécanisme CONWIP est également le meilleur mécanisme hybride.

Les résultats montrent que le mécanisme kanban est toujours surclassé soit par hybride, soit CONWIP, soit les deux. Par contre, l'avantage de CONWIP sur kanban s'effrite avec l'augmentation du coût de stockage c^{st} , et kanban surpasse éventuellement CONWIP. L'avantage du mécanisme hybride sur le mécanisme kanban semble augmenter légèrement avec le nombre de machines, mais décroît avec le coût de stockage. Le mécanisme kanban montre également beaucoup plus de variabilité que les deux autres. L'intervalle de confiance de kanban est environ le double de celui de hybride et CONWIP, les deux derniers présentant des intervalles de confiance de largeur similaire. Les performances de CONWIP et hybride sont donc plus robustes que kanban. Cette dernière qualité est considérée par les praticiens comme étant plus importante que la performance asymptotique seule (Kleijnen & Gaury (2003)). Puisqu'il est toujours surpassé par hybride, donne des résultats plus variables et présente autant de paramètres à optimiser, il semble n'y avoir aucun avantage à implanter le mécanisme kanban au lieu de hybride. Cependant, l'avantage de hybride sur le mécanisme kanban diminue avec l'augmentation de c^{st} .

D'un point de vue pratique, nous pourrions également ajouter que puisqu'une grande partie des performances du mécanisme hybride est due à la boucle CONWIP commune aux deux mécanismes, il est plus facile d'optimiser le mécanisme hybride que le mécanisme kanban, malgré que leur nombre de paramètres soit identique. En trouvant d'abord l'optimum du mécanisme CONWIP nous obtenons un excellent estimé de Z_m pour le mécanisme hybride, qui est également la borne supérieure du domaine des stocks intermédiaires (il n'y aurait aucune utilité à avoir des stocks intermédiaires pouvant contenir plus de pièces qu'il ne peut en être admis dans le système). Ceci permet de cerner rapidement et précisément le domaine à explorer.

4.7 Discussion

Nous avons observé que dans le problème de minimisation des coûts d'inventaire, de rupture et de stockage, le mécanisme hybride donne de meilleurs résultats que CONWIP et kanban lorsque le coût de stockage est considéré explicitement. Cependant, hybride est équivalent à CONWIP lorsque le coût de stockage n'est pas considéré explicitement, mais plutôt agrégé au coût d'inventaire dans le coût de détention. Malgré que le critère de performance utilisé diffère de Bonvik et al. (1997), ce dernier résultat nuance leur conclusion quant à la supériorité de hybride sur CONWIP en l'absence de coût de stockage. Nous croyons que le niveau d'inventaire inférieur observé avec le mécanisme hybride en comparaison avec CONWIP est le résultat de la nature discrète des pièces dans leur modèle, de la petite taille relative des stocks et du cas spécifique étudié. On peut noter qu'un seul cas a été présenté dans Bonvik et al. (1997).

La comparaison du coût entre CONWIP et kanban avec le coût de stockage agrégé dans le coût de détention confirme les résultats de plusieurs études quant à la supériorité de CONWIP. Nous avons observé une augmentation de coût allant jusqu'à 40% en changeant de CONWIP pour kanban. Cet avantage croît avec la longueur de la ligne. Par contre, si le coût de stockage est significatif et que la ligne est relativement longue, cette conclusion doit être reconsidérée. Il est également noté que la nature continue du flux de pièces dans cette étude avantage les mécanismes CONWIP et hybride face à kanban parce que les machines peuvent opérer avec une quantité infinitésimale de matière dans le stock d'approvisionnement. En conséquence, lorsque les machines n'ont subi aucune panne sur une longue période, les stocks intérieurs des mécanismes hybrides et CONWIP se vident au profit du stock de produits finis, où ils pourront satisfaire des demandes et prévenir les ruptures en cas de panne. Dans un modèle avec un flux de pièces discret, lorsque les machines n'ont pas subi de panne depuis longtemps, des expériences montrent que le niveau d'inventaire à chaque poste de travail (machine et stock en aval de cette machine) est de $1/u_{max}$. Conséquemment, ce ne sont pas toutes les

pièces qui peuvent être dans le stock de produits finis en même temps, contrairement au flux de matière continu.

4.8 Conclusion

Nous avons conduit une étude comparative de différents mécanismes de contrôle de la production à flux tirés en fonction du coût d'inventaire, de stockage et de rupture. Pour atteindre cet objectif, nous avons optimisé une série de lignes de production homogènes contrôlées par les mécanismes kanban, CONWIP et hybride. Ceci a été effectué à l'aide d'un modèle de simulation combinée discrète/continue, de plans d'expériences et de surfaces de réponse. Nous avons observé que lorsque le coût de stockage est considéré explicitement, le mécanisme hybride donne le coût le plus faible dans tous les cas étudiés. Lorsque le coût de stockage est agrégé au coût d'inventaire, les mécanismes hybride et CONWIP donnent un coût identique, les deux étant plus faibles que kanban. Leurs performances sont également plus robustes que celles de kanban. Cependant, avec l'augmentation du coût de stockage et de la longueur de la ligne, kanban donne éventuellement un coût inférieur à CONWIP, ce dernier nécessitant un espace de stockage très important. Ces résultats confirment la supériorité du mécanisme hybride sur les deux autres mécanismes observée dans Bonvik et al. (1997), mais seulement lorsque le coût de stockage est considéré explicitement. De plus amples recherches sur cette observation devraient être conduites.

CONCLUSION

Nous avons considéré le problème de la commande des lignes de production dont les machines sont sujettes à des pannes. Le système a un type de produit et doit répondre à un taux de demande constant et l'indicateur de performance est le coût de détention (inventaire et stockage) et le coût de rupture. Nous avons traité de trois aspects du problème :

- Tout d'abord, en nous appuyant sur la formulation analytique du problème, nous avons montré que la complexité du problème empêche sa solution par les méthodes analytiques et numériques. Nous avons donc étendu le concept de politique à seuil critique au problème de ligne de production et proposé une combinaison de simulation en modélisation combinée discrète/continue, de plans d'expériences et de surfaces de réponses pour en permettre la solution. La simulation en modélisation combinée discrète/continue réduit le temps de calcul de façon considérable par rapport à la simulation par événements discrets et permet l'utilisation de techniques d'optimisation plus efficaces. Les plans d'expériences et les surfaces de réponse sont des techniques relativement simples permettant l'optimisation du système de façon efficace.
- Ensuite, la complexité du problème d'optimisation augmentant de façon exponentielle avec le nombre de machines, nous avons constaté la nécessité d'une heuristique permettant la réduction du nombre de variables d'optimisation. Nous avons proposé une heuristique basée sur l'observation d'un profil caractéristique dans la distribution des valeurs des paramètres de la politique (taille des stocks tampons). Un profil pouvant être modélisé à partir de quatre paramètres a été observé suite à l'optimisation de plusieurs cas. Après une validation des résultats obtenus avec le profil paramétré, une ligne de production

composée de 20 machines a été optimisée. Une ligne d'une telle taille aurait été impossible à optimiser à l'aide de la méthode proposée à la section 2.

- Finalement, nous avons effectué une étude comparative de plusieurs mécanismes de contrôle de la production à flux tirés, soit kanban, CONWIP et l'hybride kanban/CONWIP. Le critère de comparaison était le coût minimum de détention (inventaire et stockage) et de rupture. Nous avons comparé les trois mécanismes sur plusieurs lignes en considérant des cas où le coût de stockage est agrégé au coût d'inventaire et d'autre cas où le coût de stockage est considéré explicitement. La considération explicite du coût de stockage est une innovation par rapport aux études comparatives retrouvées dans la littérature et permet une comparaison plus juste des différents mécanismes de contrôle de la production. Nous avons montré que le mécanisme hybride donne les meilleures performances lorsque le coût de stockage est considéré explicitement mais qu'il est équivalent au mécanisme CONWIP lorsque le coût de stockage est agrégé au coût d'inventaire. Nous avons également montré que lorsque la ligne est relativement longue et le coût de stockage relativement élevé, le mécanisme kanban donne de meilleures performances que le mécanisme CONWIP.

Recherches futures

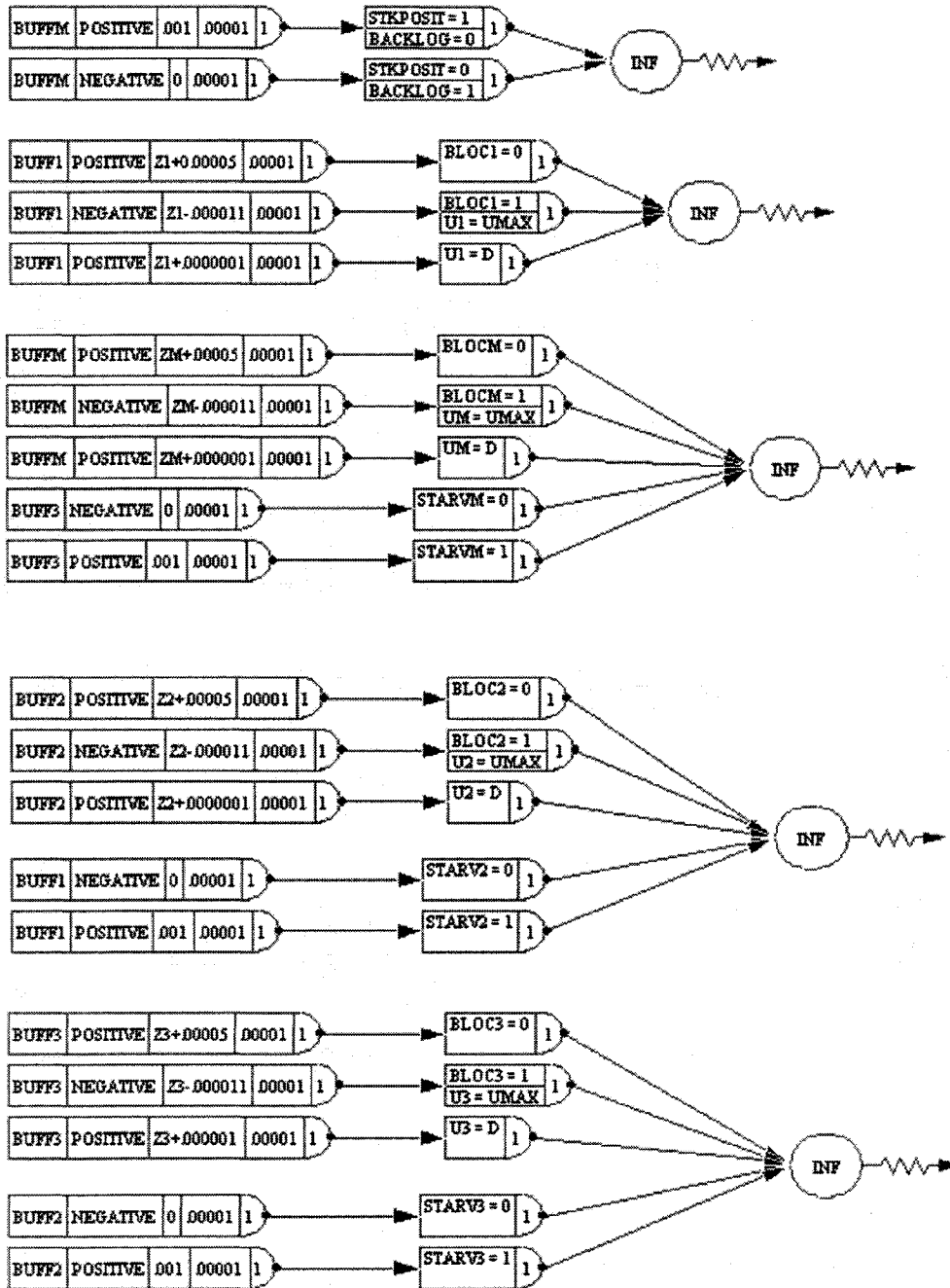
Il serait intéressant d'approfondir l'heuristique basée sur le profil dans la distribution des paramètres pour les lignes en étendant l'étude à d'autres indicateurs de performance, comme le taux de service. D'autres extensions possibles de l'heuristique basée sur le profil concerneraient les lignes avec des distributions autres qu'exponentielles ou avec un approvisionnement à la première machine présentant une certaine variabilité.

Le plus souvent dans les études comparatives, un indicateur de performance unique, comme le coût dans le cas présent, est employé. Dans de nombreuses applications, il

peut être souhaitable de trouver un équilibre entre plusieurs indicateurs comme le taux de service, le niveau d'inventaire et la robustesse des performances. Il serait intéressant de proposer une approche multi-critère afin de combiner plusieurs indicateurs de performance et de suggérer le mécanisme permettant le meilleur compromis et de conduire une analyse de sensibilité à partir des différents paramètres pour déterminer les conditions de supériorité des différents mécanismes de contrôle.

ANNEXE 1

Modèle de simulation combiné discret/continu



2) Fichier de contrôle

```

GEN,"Philippe Lavoie","MAITRISE",2004-08-20,60,YES,YES;
LIMITS,100,100,100,100,100,100;
;
SEEDS,{{ ,1,YES},{ ,2,YES},{ ,3,YES},{ ,4,YES},{ ,5,YES},{ ,6,YES},{ ,7,YES},{
,8,YES},{ ,9,YES},{ ,10,YES},{ ,11,YES},{ ,12,YES},{ ,13,YES},{ ,14,YES},{
,15,YES},{ ,16,YES},{ ,17,YES},{ ,18,YES},{ ,20,YES},{ ,19,YES},{ ,21,YES},{ ,22,YES
},{ ,23,YES},{ ,24,YES},{ ,25,YES},{ ,26,YES},{ ,27,YES},{ ,28,YES},{ ,29,YES},{ ,30,Y
ES},{ ,31,YES},{ ,32,YES},{ ,33,YES},{ ,34,YES},{ ,35,YES},{ ,36,YES},{ ,37,YES},{ ,3
8,YES},{ ,38,YES},{ ,39,YES},{ ,40,YES}};
;
EQUIVALENCE,{{TSIMUL,1001000},{TCLEAR,1000}};
;
;NOMBRE DE MACHINES ET EQUIVALENCE
INTLC,{{LL[0],4}};
EQUIVALENCE,{{m,LL[0]}};
;
CONTINUOUS,2,m,.00000001,100,,WARNING,.00000001,.00000001;
;
EQUIVALENCE,{{PANNE1,LL[1]},{STARV1,LL[m+1]},{BLOC1,LL[2*m+1]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE2,LL[2]},{STARV2,LL[m+2]},{BLOC2,LL[2*m+2]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE3,LL[3]},{STARV3,LL[m+3]},{BLOC3,LL[2*m+3]}};
EQUIVALENCE,{{PANNEM,LL[M]},{STARVM,LL[2*M]},{BLOCM,LL[3*M]}};
EQUIVALENCE,{{D,XX[3*M+3]}};
EQUIVALENCE,{{UMAX,XX[3*M+4]},{MTTF,XX[3*M+5]},{MTTR,XX[3*M+6]
}};
EQUIVALENCE,{{Z1,XX[1]},{Z2,XX[2]},{Z3,XX[3]},{ZM,XX[M]}};
EQUIVALENCE,{{U1,XX[M+1]},{U2,XX[M+2]},{U3,XX[M+3]},{UM,XX[2*M]}};
EQUIVALENCE,{{BUFFM,SS[M+2]},{BUFF3,SS[3+2]},{BUFF2,SS[2+2]},{BUFF1
,SS[1+2]}};
EQUIVALENCE,{{WIP,DD[2]}};
EQUIVALENCE,{{BKLOG,DD[1]}};
EQUIVALENCE,{{BACKLOG,LL[3*M+2]},{STKPOSIT,LL[3*M+1]}};
;
EQUIVALENCE,{{STREAM,LL[3*M+3]},{STREAM2,LL[3*M+3]+10}};
EQUIVALENCE,{{ITER2,LL[3*m+5]},{ITER,LL[3*m+4]}};
;
EQUIVALENCE,{{start,XX[3*m+7]},{finish,XX[3m+8]},{duration,XX[3*m+9]}};
;
INTLC,{{PANNE1,1},{STARV1,1},{BLOC1,1}};
INTLC,{{PANNE2,1},{STARV2,1},{BLOC2,1}};
INTLC,{{PANNE3,1},{STARV3,1},{BLOC3,1}};

```

```
INTLC,{{PANNEM,1},{STARVM,1},{BLOCM,1},{BACKLOG,0},{STKPOSIT,1}};  
;  
INTLC,{{UM,2},{U3,2},{U2,2},{U1,2}};  
;  
;INITIALISATION DES TAUX DE PANNE ET DE PRODUCTION  
INTLC,{{D,1},{UMAX,1.1},{MTTF,100},{MTTR,3}};  
;  
;INITIALISATION DES THRESHOLD  
INTLC,{{Z1,1},{Z2,1},{Z3,1},{ZM,1}};  
;  
;INITIALISATION DES NIVEAUX DE STOCK INITIAL  
INTLC,{{BUFF1,.05},{BUFF2,.05},{BUFF3,.05},{BUFFM,.05}};  
;  
;  
INITIALIZE,0.0,TSIMUL,YES,,NO;  
NETWORK,READ;  
FIN;
```

3) Fonction état (STATE)

```

#include "vslam.h"
#define m LL[0]      /* Nombre de machines déclarées dans le
fichier de contrôle*/
#define d XX[3*m+3] /* demande */
void SWFUNC STATE(void)

{
    int i;

    /*Taux de production des machines 1 à m*/
    for (i=1; i<=m;i++) {

        XX[2*m+i]=XX[m+i]*LL[i]*LL[m+i]*LL[2*m+i];    }

    /*Variables d'état*/
    /* Variable d'etat sur le stock de produit fini*/
    SS[m+2]=SSL[m+2] +(XX[3*m]-d)*DTNOW;

    /*Définition des variables d'etat pour les stocks 1 à
m-1*/
    for (i=1; i<=m-1;i++)        {
        SS[i+2]=SSL[i+2]+(XX[2*m+i]-XX[2*m+i+1])*DTNOW;
    }

    /*Statistiques*/

    /*Équation différentielle du niveau de rupture*/

    DD[1]= -SS[m+2]*LL[3*m+2];

    /*Équation différentielle de l'inventaire*/

    DD[2]= SS[m+2]*LL[3*m+1];

    for (i=1; i<=m-1;i++)    {
        DD[2]= DD[2]+SS[i+2];
    }

    return;
}

```

4) Fonction EVENT

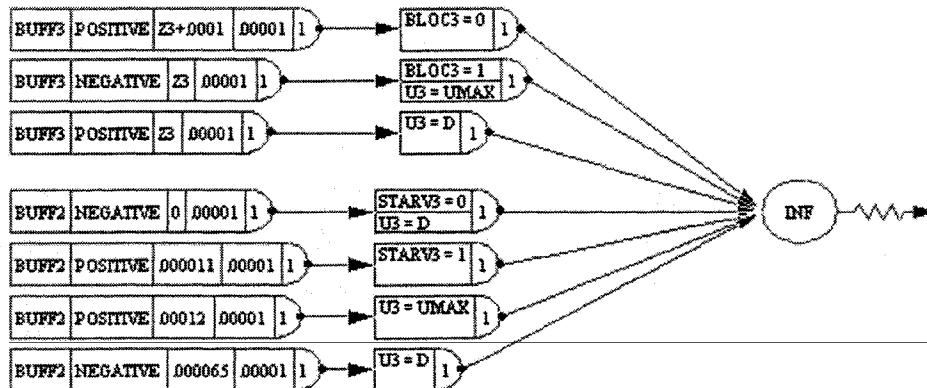
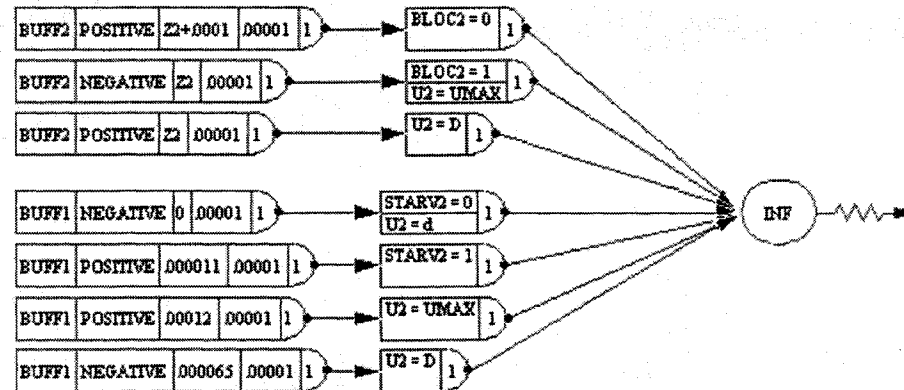
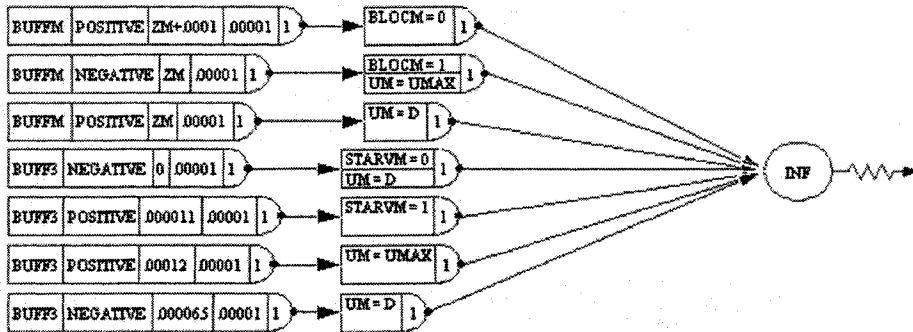
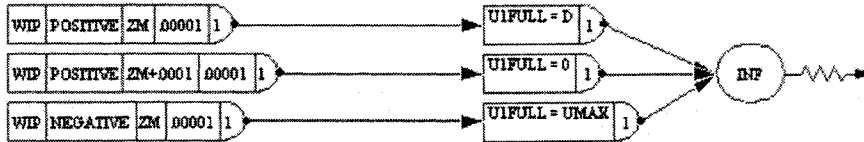
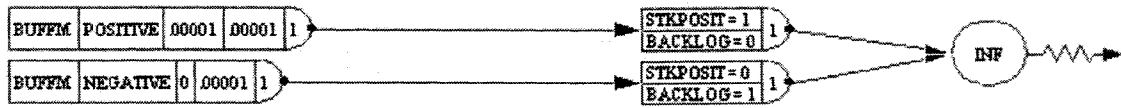
```
#include "vslam.h"
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#define m LL[0]          /* Nombre de machines déclarées
dans le fichier de contrôle*/
#define start XX[3*m+7]  /* Instant de début de
simulation*/
#define finish XX[3*m+8] /* Instant de fin de simulation */
#define duration XX[3*m+9] /* diff. entre "start" et
"finish"*/

void EVENT(int I)  {
switch (I)        {

    case 1:  start=clock(0);
            break;

    case 2:  finish=clock(0);
            duration=finish-start;
            break;

    return;
}
}
```

2) Fichier de contrôle

```

GEN,"Philippe Lavoie","MAITRISE",2004-08-20,60,YES,YES;
LIMITS,100,100,100,100,100,100;
;
EQUIVALENCE,{{TSIMUL,1001000},{TCLEAR,1000}};
;
SEEDS,{{1,YES},{2,YES},{3,YES},{4,YES},{5,YES},{6,YES},{7,YES},
{8,YES},{9,YES},{10,YES},{11,YES},{12,YES},{13,YES},{14,YES},{15,YES},
{16,YES},{17,YES},{18,YES},{20,YES},{19,YES},{21,YES},{22,YES},
{23,YES},{24,YES},{25,YES},{26,YES},{27,YES},{28,YES},{29,YES},{30,YES},
S}};SEEDS,{{31,YES},{32,YES},{33,YES},{34,YES},{35,YES},{36,YES},
{37,YES},{38,YES},{39,YES},{40,YES},{41,YES},{42,YES},{43,YES},
{44,YES},{45,YES}};
;
;NOMBRE DE MACHINES ET EQUIVALENCE
INTLC,{{LL[0],4}};
EQUIVALENCE,{{m,LL[0]}};
;
;Equivalences pour les facteurs de blocage, de penurie ou de panne.
EQUIVALENCE,{{PANNE1,LL[1]},{STARV1,LL[m+1]},{BLOC1,LL[2*m+1]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE2,LL[2]},{STARV2,LL[m+2]},{BLOC2,LL[2*m+2]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE3,LL[3]},{STARV3,LL[m+3]},{BLOC3,LL[2*m+3]}};
EQUIVALENCE,{{PANNEM,LL[M]},{STARVM,LL[2*M]},{BLOCM,LL[3*M]}};
EQUIVALENCE,{{BACKLOG,LL[3*M+2]},{STKPOSIT,LL[3*M+1]}};
;
EQUIVALENCE,{{ITER2,LL[3*m+5]},{ITER,LL[3*m+4]}};
;
;Equivalence pour la demande
EQUIVALENCE,{{D,XX[3*M+3]}};
;
;Equivalence pour les taux de panne, de reparation et de production max.
EQUIVALENCE,{{UMAX,XX[3*M+4]},{MTTF,XX[3*M+5]},{MTTR,XX[3*M+6]}};
};
;
;Equivalence pour les capacites des stocks
EQUIVALENCE,{{Z1,XX[1]},{Z2,XX[2]},{Z3,XX[3]},{ZM,XX[M]}};
;
;Equivalences pour les taux de production
EQUIVALENCE,{{U1,XX[M+1]},{U2,XX[M+2]},{U3,XX[M+3]},{UM,XX[2*M]},{
U1FULL,XX[3*M+7]}};
;
;Equivalences pour les inventaires et backlog

```

```

EQUIVALENCE,{{BUFFM,SS[M+2]},{BUFF3,SS[3+2]},{BUFF2,SS[2+2]},{BUFF1
,SS[1+2]}};
EQUIVALENCE,{{WIP,DD[2]}};
EQUIVALENCE,{{BKLOG,DD[1]}};
;
EQUIVALENCE,{{STREAM,LL[3*M+3]},{STREAM2,LL[3*M+3]+10}};
;
INTLC,{{PANNE1,1},{STARV1,1},{BLOC1,1}};
INTLC,{{PANNE2,1},{STARV2,1},{BLOC2,1}};
INTLC,{{PANNE3,1},{STARV3,1},{BLOC3,1}};
INTLC,{{PANNEM,1},{STARVM,1},{BLOCM,1},{BACKLOG,0},{STKPOSIT,1}};
INTLC,{{UM,2},{U3,2},{U2,2},{U1,2},{U1FULL,2}};
;
;INITIALISATION DES TAUX DE PANNE ET DE PRODUCTION
INTLC,{{D,1},{UMAX,1.1},{MTTF,1},{MTTR,1}};
;INITIALISATION DES CAPACITES
INTLC,{{Z1,1},{Z2,1},{Z3,1},{ZM,1}};
;
CONTINUOUS,2,m,.000000001,100,,WARNING,.0000001,.0000001;
;
;INITIALISATION DES NIVEAUX DE STOCK INITIAL
INTLC,{{BUFF1,.02},{BUFF2,.02},{BUFF3,.02},{BUFFM,.02}};
;
INITIALIZE,0.0,TSIMUL,YES,,NO;
MONTR,CLEAR,TCLEAR;
NETWORK,READ;
FIN;

```

3) Fonction état

```

#include "vslam.h"
#define m LL[0]          /* Nombre de machines déclarées dans le fichier
de contrôle*/
#define d XX[3*m+3]     /* demande */

void SWFUNC STATE(void)
{
    int i;

    /*Taux de production instantané de la machine 1*/
    if (XX[m+1]<=XX[3*m+7])    {
        /*Si l'en-cours total (wip) est inférieur à Zm*/

        XX[2*m+1]=XX[m+1]*LL[1]*LL[m+1]*LL[2*m+1];
        /*Valeur du taux de production*pannel*starv1*bloc1*/
    }

    else
        {
        XX[2*m+1]=XX[3*m+7]*LL[1]*LL[m+1]*LL[2*m+1];
        }

    /*Taux de production instantané des machines 2 à m-1*/
    for (i=2; i<=m;i++)    {
        XX[2*m+i]=XX[m+i]*LL[i]*LL[m+i]*LL[2*m+i];    }

    /*Variables d'état*/
    /* Variable d'état sur le stock de produit fini*/
    SS[m+2]=SSL[m+2] +(XX[3*m]-d)*DTNOW;

    /*Variables d'état les stocks 1 à m-1*/
    for (i=1; i<=m-1;i++)    {
        SS[i+2]=SSL[i+2]+(XX[2*m+i]-XX[2*m+i+1])*DTNOW;
    }

    /*Statistiques*/
    /*Équation différentielle du niveau de rupture*/

    DD[1]= -SS[m+2]*LL[3*m+2];

    /*Équation différentielle de l'inventaire*/

    DD[2]= SS[m+2]*LL[3*m+1];

    for (i=1; i<=m-1;i++)    {
        DD[2]= DD[2]+SS[i+2];
    }
    return;
}

```

4) Fonction EVENT

```
#include "vslam.h"
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#define m LL[0]          /* Nombre de machines déclarées
dans le fichier de contrôle*/
#define start XX[3*m+7]  /* Instant de début de
simulation*/
#define finish XX[3*m+8] /* Instant de fin de simulation */
#define duration XX[3*m+9] /* diff. entre "start" et
"finish"*/

void EVENT(int I)  {
switch (I)        {

    case 1:  start=clock(0);
             break;

    case 2:  finish=clock(0);
             duration=finish-start;
             break;

    return;
    }
}
```

ANNEXE 2

Explication détaillée des modèles de simulation

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

PAR
PHILIPPE LAVOIE

MODÈLE DE SIMULATION COMBINÉ DISCRET/CONTINU POUR LES LIGNES
DE PRODUCTION HOMOGÈNES A UN TYPE DE PRODUIT SOUS KANBAN,
CONWIP ET HYBRIDE

MONTRÉAL, LE 31 MARS 2006

1. INTRODUCTION

La présente annexe a comme objectif de présenter le fonctionnement des modèles de simulation combinés discret/continu développés par l'auteur dans le cadre du programme de Maîtrise en Génie mécanique de l'École de technologie supérieure. Le système modélisé est une ligne de production homogène constituée de plusieurs machines ou postes de travail disposés en tandem et produisant un seul type de pièce. L'objectif était de créer un modèle rapide permettant d'évaluer le niveau de performance de la ligne. Le modèle se devait d'être le plus rapide possible puisqu'il était utilisé dans des problèmes d'optimisation qui nécessitent des simulations nombreuses. C'est pour cette raison qu'un modèle combiné discret/continu a été préféré au modèle à événements discrets « traditionnel ». En modélisant le flux de matière comme étant continu, nous réduisons grandement la génération d'événements liés aux activités de production comme le début et la fin du traitement d'une pièce. Le nombre d'événements moindre nécessite un temps de calcul réduit pour le modèle. L'indicateur de performance utilisé est le coût moyen de possession et de rupture. Trois politiques de contrôle de la production ont été modélisées : Kanban, CONWIP et l'Hybride Kanban/CONWIP.

2. DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le système modélisé est une ligne de production composée de m ($m \geq 2$) machines, ou postes de travail, sujettes à des pannes aléatoire dépendant du temps. Le système est montré à la figure 1, avec M_i la machine $i=1, \dots, m$. Chaque machine peut être dans un ou l'autre de deux états (en fonction ou en panne notés 1 et 0 respectivement).

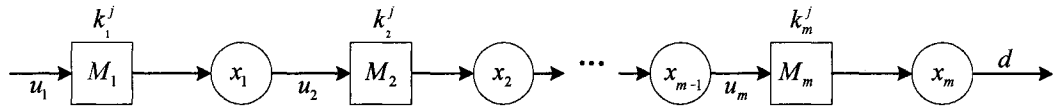


Figure 1 Une ligne à m machines et un type de pièce

Nous notons $u_i(t)$ le taux de production de la machine M_i et $x_i(t)$ la quantité de matière dans le stock tampon entre M_i et M_{i+1} , ($i=1, \dots, m-1$). Finalement, la différence entre la production cumulée de la ligne et la demande cumulée, nommé surplus, est notée $x_m(t)$. La dynamique des stocks peut être écrite comme suit :

$$\frac{d}{dt}(x_i(t)) = u_i(t) - u_{i+1}(t), \quad x_i(0) = x_i, \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(x_m(t)) = u_m(t) - u_{m+1}, \quad x_m(0) = x_m \quad (2)$$

avec $u_{m+1} := d$ le taux de la demande (constant).

3. MESURE DE PERFORMANCE

L'indicateur de performance utilisé est le coût moyen de possession et de rupture (éq. (3)).

$$\bar{C}(Z) = c^+ \bar{x}^+ + c^- \bar{x}^- \quad (3)$$

Nous posons l'hypothèse que toutes les demandes qui ne sont pas satisfaites sur le stock de produits finis sont différées (rupture). Aucune demande n'est perdue. Le coût de possession est attribué à l'inventaire positif. Sur l'horizon de simulation T, l'inventaire positif est calculé selon l'éq. (4) :

$$\bar{x}^+ = \int_0^T x^+(t) dt / T \quad (4)$$

avec x^+ défini selon l'éq. (5).

$$x^+(t) = \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t) + \max(x_m(t), 0) \quad (5)$$

Le coût de rupture est fonction du niveau de rupture moyen calculé selon l'éq. (6) :

$$\bar{x}^- = \int_0^T x^-(t) dt / T \quad (6)$$

avec x^- défini selon l'éq.(7).

$$x^-(t) = \max(0, -x_m(t)) \quad (7)$$

Le modèle de simulation évalue la valeur des équations (4) et (6). Ces valeurs sont alors multipliées par leur coût unitaire respectif une fois les simulations terminées.

4. MÉCANISME KANBAN

Le mécanisme Kanban consiste, pour la ligne à un seul produit, à assigner un niveau de stock critique ($Z_i, i = 1, \dots, m.$) à chaque stock tampon. Chaque machine tente alors de garder le stock tampon en aval de celle-ci plein. Ce mécanisme est illustré à la figure 2.

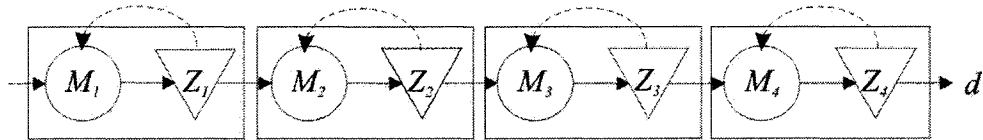


Figure 2 Schéma d'un mécanisme Kanban pour une ligne de production à 4 postes.

Si ce stock est plein, la machine produit au rythme de la machine suivante. Mathématiquement, cette politique est formulée à l'équation (8) :

$$u_i(\cdot) = \begin{cases} u_{\max} & \text{if } x_i(t) < Z_i \\ u_{i+1}(t) & \text{if } x_i(t) = Z_i \\ 0 & \text{if } x_i(t) > Z_i \end{cases} \quad i = 1, \dots, m. \quad (8)$$

avec u_{m+1} le taux de la demande de produits finis d . Le seuil $Z_i, i = 1, \dots, m.$ correspond également à la capacité du stock tampon puisqu'il ne pourra jamais contenir plus de matière que ce seuil. Le modèle de simulation est divisé en trois principales composantes : les réseaux Visual Slam, le fichier de contrôle et les fonctions en langage C. Ces composantes sont décrites dans les paragraphes suivants.

4.1. Réseaux visual slam

Les réseaux Visual Slam sont les réseaux de nœuds et de flèches créés à partir du logiciel AweSim. Ils sont regroupés en trois types différents dans le présent modèle : les réseaux de lecture et d'écriture, les réseaux de pannes et de réparations et les réseaux de

détection de seuils. Dans le fichier du modèle, ils se présentent dans le même ordre que décrit ici

4.1.1. Réseaux de lecture et d'écriture de données

Les réseaux de lecture et d'écriture de données servent à lire les données variables d'une simulation à l'autre et écrire les mesures de performance à la fin de chaque simulation. La figure 3 représente la vue d'ensemble du réseau de lecture et d'écriture des données.

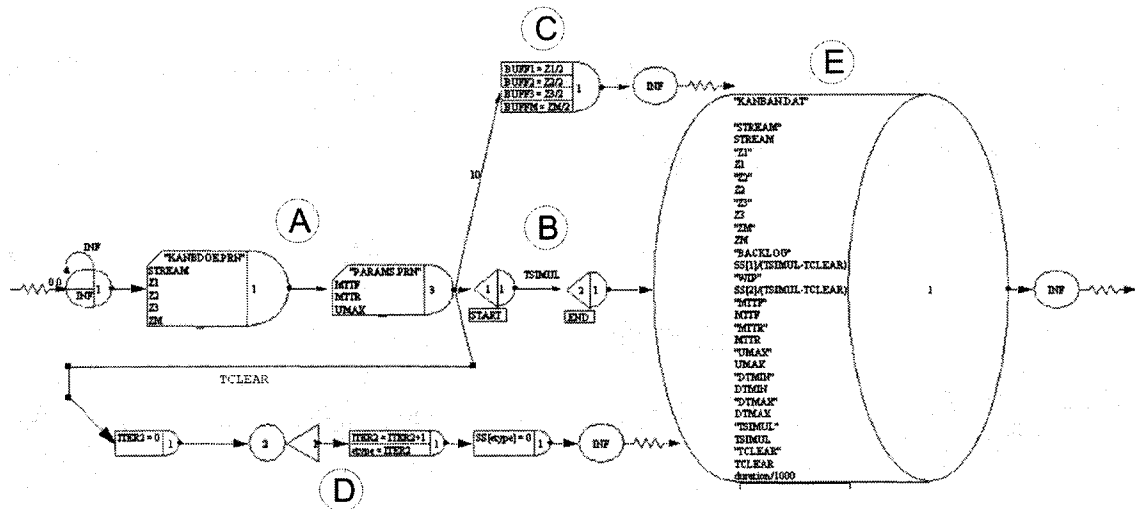


Figure 3 Réseaux de lecture et d'écriture

- A) Cette portion sert à lire les données variables à chaque simulation. Dans le cas présent, ces données sont les seuils critiques de chaque stock tampon et le stock de produits finis, MTTF et MTTR. Les fichiers d'entrée doivent être en format .prm « TEXTE, SPARATEUR ESPACE »
- B) Cette section sert à évaluer le temps de calcul nécessaire à la terminaison de chaque simulation. Le nœud START appelle la fonction EVENT (voir plus loin) avec le code d'événement 1, c'est-à-dire le moment de début de simulation. Le

nœud END appelle cette même fonction avec le code d'événement 2, c'est-à-dire la fin de la simulation.

- C) Cette branche a été rajoutée pour éliminer certains problèmes qui subvenaient lors de simulations pour des raisons inconnues. Il arrive parfois que le modèle s'emballe dans des boucles infinies d'événements ou qu'une erreur subvienne sans que nous ne sachions la raison. Ce nœud place le niveau de tous les stocks à la moitié de leur capacité après un temps fixé sur l'activité qui se rend à ce nœud. Lorsque le système donne les erreurs mentionnées plus haut, elles peuvent très souvent être réglées en ajustant le temps de l'activité qui mène à ce nœud.
- D) Cette branche sert à réinitialiser l'inventaire cumulatif (la portion intégrale de l'éq. (4)) et la rupture cumulative (la portion intégrale de l'éq. (6)) après le temps de réchauffement TCLEAR défini dans le fichier de contrôle. Les niveaux de stocks tampons au moment de la réinitialisation ne sont pas affectés par cette opération
- E) Cette portion du réseau sert à l'écriture des données. Pour des fins de « traçabilité » des résultats, plusieurs paramètres de la simulation sont écrits, en plus du niveau moyen d'inventaire et de rupture, à cette étape. Parmi ces données on retrouve le nombre source du générateur de nombres aléatoires (SEEDS), les seuils critiques $Z_i, i = 1, \dots, m.$, les spécifications de pas de temps minimum et maximum (DTMIN et DTMAX), MTTF, MTTR, le temps de simulation total (TSIMUL) et le temps de réchauffement (TCLEAR). Le niveau d'inventaire moyen est évalué en divisant l'inventaire cumulatif par le temps depuis la fin du réchauffement ($SS[2]/(TSIMUL-TCLEAR)$), idem pour le niveau de rupture ($SS[1]/(TSIMUL-TCLEAR)$). La durée (TSIMUL-TCLEAR) correspond à T dans les équations des parties précédentes. Les données sont écrites en format « TEXTE, SEPARATEUR ESPACE ».

4.1.2. Réseaux de pannes et réparation

La figure 4 montre les réseaux de panne et de réparation pour toutes les machines.

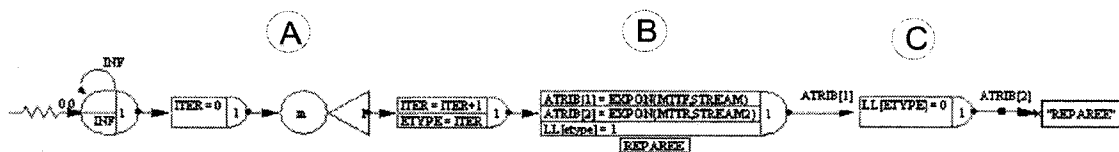


Figure 4 Réseaux de panne et de réparation

- A) Dans cette section du réseau, une entité est créée pour chaque machine du modèle. Elles sont ensuite identifiées (ETYPE) de 1 à m.
- B) Dans ce nœud ASSIGN, les entités se font attribuer les prochaines durées de bon fonctionnement et de réparation qui sont échantillonnées à partir des distributions aléatoires et enregistrées dans les variables d'entités ATTRIB[1] et ATTRIB[2] respectivement. L'état de la machine correspondant à l'entité dans ce nœud à cet instant est mis à 1 (état de marche).
- C) Après une activité d'une durée correspondant au temps de bon fonctionnement (ATTRIB[1]), l'état de la machine correspondant à l'entité dans le nœud ASSIGN à ce moment est mis à 0, l'état de panne de cette machine. Les entités sont ensuite retournées au nœud ASSIGN nommé REPAREE après une durée correspondant au temps de réparation préalablement échantillonné (ATTRIB[2]).

4.1.3. Réseaux de détection

Les réseaux de détection servent à générer des événements lorsque les variables continues franchissent certains seuils comme les seuils critiques $Z_i, i=1, \dots, m$. par exemple, ou lorsqu'elles franchissent 0.

Nous présentons ici les trois premiers groupes de réseaux DETECT du modèle. Ces réseaux se retrouvent dans tous les modèles car ils concernent les machines M_1 et M_m . Pour rajouter des machines au modèle, des groupes semblables au bloc C sont rajoutés à la suite en commençant par le bloc concernant la machine M_2 et en augmentant. Les petites valeurs qui sont additionnées aux seuils servent à éviter la confusion entre les intervalles de tolérance lorsqu'ils sont franchis.

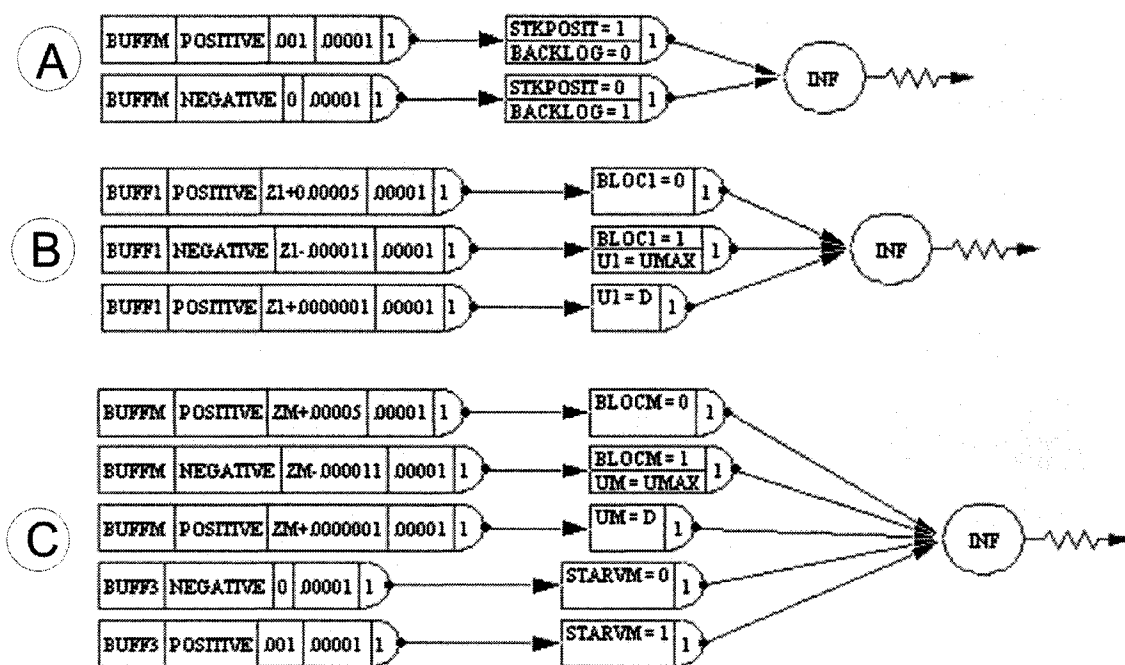


Figure 5 Réseaux de détection pour le mécanisme Kanban

- A) Ce groupe de nœuds sert à déterminer si le stock de produits finis a un niveau positif ou négatif. Les variables STKPOSIT et BACKLOG servent ensuite dans la fonction STATE pour l'intégration des variables cumulatives.

- B) Ce groupe de nœuds concerne la machine M_1 . Il a moins de composantes que les autres machines car nous avons posé comme hypothèse que l'approvisionnement de la première machine est ininterrompu, i.e. la matière première est considérée infinie. Ces nœuds suivent le niveau x_1 et génèrent un événement lorsque le seuil Z_1 est atteint, dépassé ou franchi négativement.
- C) Ce groupe de nœuds s'applique aux machines M_2 à M_m . Les trois premières lignes de ce groupe sont identiques au groupe précédent (point B). Les deux lignes additionnelles servent à surveiller l'état de l'approvisionnement de la machine. Des événements sont déclenchés lorsque $x_i, i = 1, \dots, m-1$ tombe à zéro ou passe dans le positif. La valeur de la variable binaire STARVi attitrée est déterminée en fonction de l'approvisionnement (0=vide, 1= non vide). Cette variable est ensuite réutilisée dans la fonction STATE pour déterminer les taux de production des machines. La dernière ligne de ce groupe détermine le seuil à partir duquel la machine suivante peut redémarrer après avoir dû cesser de produire pour cause de désamorçage (stock tampon aval vide).

4.2. Fichier de contrôle

Le fichier contrôle sert à donner les données nécessaires à la simulation comme le nombre de simulations, le temps total, le temps de réchauffement, les spécifications de pas de temps min. et max. (DTMIN et DTMAX) ainsi qu'à donner les équivalences textuelles des variables Visual Slam pour simplifier la compréhension. Le texte du fichier de contrôle est inclus et commenté dans les sections suivantes. Notons que le choix des indices des variables a été paramétré en fonction du nombre de machines m pour faciliter la modification du modèle lors de l'ajout de machines et l'implémentation de boucles dans la fonction STATE.

Initialisation du modèle, nom de l'auteur, Date et nombre de simulations.

```
GEN,"Philippe Lavoie","MAITRISE",2004-08-20,5,YES,YES;
```

Définition des limites des indices des différentes variables Visual Slam.

```
LIMITS,100,100,100,100,100,100;
```

Définition des nombres sources utilisés dans l'échantillonnage des nombre aléatoires (distributions de pannes et de réparations) Ce nombre source est défini dans le but d'utiliser la technique de nombres aléatoires communs (« common random numbers technique ») et ainsi réduire la variabilité dans la réponse.

```
SEEDS,{{ ,1,YES},{ ,2,YES},{ ,3,YES},{ ,4,YES},{ ,5,YES},{ ,6,YES},{ ,7,YES},{ ,8,YES},{ ,9,YES},{ ,10,YES},{ ,11,YES},{ ,12,YES},{ ,13,YES},{ ,14,YES},{ ,15,YES},{ ,16,YES},{ ,17,YES},{ ,18,YES},{ ,20,YES},{ ,19,YES},{ ,21,YES},{ ,22,YES},{ ,23,YES},{ ,24,YES},{ ,25,YES},{ ,26,YES},{ ,27,YES},{ ,28,YES},{ ,29,YES},{ ,30,YES},{ ,31,YES},{ ,32,YES},{ ,33,YES},{ ,34,YES},{ ,35,YES},{ ,36,YES},{ ,37,YES},{ ,38,YES},{ ,38,YES},{ ,39,YES},{ ,40,YES}};
```

Définition des équivalences textuelles avec les variables Visual Slam.

```
EQUIVALENCE,{{TSIMUL,1000000},{TCLEAR,0}};
;
;NOMBRE DE MACHINES ET EQUIVALENCE
INTLC,{{LL[0],4}};
EQUIVALENCE,{{m,LL[0]}};
;
EQUIVALENCE,{{PANNE1,LL[1]},{STARV1,LL[m+1]},{BLOC1,LL[2*m+1]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE2,LL[2]},{STARV2,LL[m+2]},{BLOC2,LL[2*m+2]}};
EQUIVALENCE,{{PANNE3,LL[3]},{STARV3,LL[m+3]},{BLOC3,LL[2*m+3]}};
EQUIVALENCE,{{PANNEM,LL[M]},{STARVM,LL[2*M]},{BLOCM,LL[3*M]}};
EQUIVALENCE,{{D,XX[3*M+3]}};
EQUIVALENCE,{{UMAX,XX[3*M+4]},{MTTF,XX[3*M+5]},{MTTR,XX[3*M+6]}};
EQUIVALENCE,{{Z1,XX[1]},{Z2,XX[2]},{Z3,XX[3]},{ZM,XX[M]}};
EQUIVALENCE,{{U1,XX[M+1]},{U2,XX[M+2]},{U3,XX[M+3]},{UM,XX[2*M]}};
EQUIVALENCE,{{BUFFM,SS[M+2]},{BUFF3,SS[3+2]},{BUFF2,SS[2+2]},{BUFF1,SS[1+2]}};
EQUIVALENCE,{{WIP,DD[2]}};
EQUIVALENCE,{{BKLOG,DD[1]}};
EQUIVALENCE,{{BACKLOG,LL[3*M+2]},{STKPOSIT,LL[3*M+1]}};
;
EQUIVALENCE,{{STREAM,LL[3*M+3]},{STREAM2,LL[3*M+3]+10}};
EQUIVALENCE,{{ITER2,LL[3*m+5]},{ITER,LL[3*m+4]}};
```

Variables utilisées pour le calcul du temps dans la fonction EVENT.

EQUIVALENCE,{{start,XX[3*m+7]},{finish,XX[3m+8]},{duration,XX[3*m+9]}};

La section suivante sert à initialiser les variables au début de la simulation. Cette opération est essentielle car la valeur par défaut des variables est 0 ce qui posait parfois certains problèmes. Les valeurs des taux de production doivent être supérieures à la demande pour ne pas poser problème. Nous recommandons de les mettre supérieures au taux de production max. Il est à noter que les paramètres seront lus dans les fichiers au début de la simulation et seront utilisées à l'appel suivant de la fonction STATE. La valeur donnée ici ne n'affectera pas les performances à long terme du système, d'autant plus que les statistiques sont réinitialisées après la période de réchauffement.

```

INTLC,{{PANNE1,1},{STARV1,1},{BLOC1,1}};
INTLC,{{PANNE2,1},{STARV2,1},{BLOC2,1}};
INTLC,{{PANNE3,1},{STARV3,1},{BLOC3,1}};
INTLC,{{PANNEM,1},{STARVM,1},{BLOCM,1},{BACKLOG,0},{STKPOSIT,1}};
INTLC,{{UM,2},{U3,2},{U2,2},{U1,2}};
;
;INITIALISATION DES TAUX DE PANNE ET DE PRODUCTION
INTLC,{{D,1},{UMAX,1},{MTTF,1},{MTTR,1}};
;
;INITIALISATION DES THRESHOLD
INTLC,{{Z1,1},{Z2,1},{Z3,1},{ZM,1}};
;
;INITIALISATION DES NIVEAUX DE STOCK INITIAL
INTLC,{{BUFF1,.05},{BUFF2,.05},{BUFF3,.05},{BUFFM,.05}};

```

L'énoncé CONTINUOUS plus bas donne les paramètres pour la simulation continue : définition du nombre de variables continues, DTMIN et DTMAX. Il est à noter que pour les modèles à 4 et 6 machines, des tests ont montré que le temps de calcul est le plus court lorsque DTMIN=MTTF. Le nombre de variables DD[] doit être gardé à un minimum puisque l'intégration de celles-ci exige un temps de calcul plus long. Le simple fait de leur allouer un indice dans la fonction CONTINUOUS augmente le temps de calcul de façon significative.

CONTINUOUS,2,m+1,.000001,MTTF,,WARNING,.0000001,.0000001;

L'énoncé RECORD sert à la définition des graphiques enregistrés. Ces courbes ne sont pas essentielles mais utiles pour la vérification du fonctionnement du modèle.

```
RECORD,,,TNOW,"TIME",{AWESIM},,TTBEG,TTFIN,{{BUFFM,"BUFFERM",
},{BUFF3,"BUFFER3", },{BUFF2,"BUFFER2", },{BUFF1,"BUFFER1", },{WIP,"WIP",
},{BKLOG,"BKLOG", }};
```

L'énoncé INITIALIZE sert à l'initialisation de la simulation et la définition du temps de simulation.

```
INITIALIZE,0.0,TSIMUL,YES,,NO;
NETWORK,READ;
FIN;
```

4.3. Fonctions en langage C

Pour la portion continue du modèle, la dynamique des variables est définie dans la fonction STATE écrite en langage C. De plus, une fonction EVENT est ajoutée pour évaluer le temps de calcul nécessaire pour chaque simulation.

4.3.1. Fonctions STATE

Les sections suivantes présentent les fonctions d'état (STATE) où sont décrites les équations différentielles décrivant la dynamique du système. Ce fichier est indépendant du nombre de machines. Les premières lignes de la fonction STATE servent à l'initialisation et la communication avec AweSim. Pour faciliter la compréhension, nous redonnons le nom textuel aux variables m (nombre de machines) et d (taux de la demande). Il est à noter que le langage C ne reconnaît pas les noms donnés aux variables par le biais des EQUIVALENCES du fichier de contrôle mais bien le nom original Visual Slam. L'équivalence doit être refaite au début de la fonction STATE si on désire s'en servir dans celle-ci.

```

#include "vslam.h"
#define m LL[0]          /* Nombre de machines déclarées dans le
fichier de contrôle*/
#define d XX[3*m+3]     /* taux de la demande */
void SWFUNC STATE(void)

```

La seconde partie sert à définir les taux de production des différentes machines à l'aide des valeurs de taux de production contrôlées par les réseaux de détection (variables $XX[2*m+i]$, $i=1, \dots, m$) et les variables logiques, PANNE $_i$ ($LL[i]$), STARV $_i$ ($LL[m+i]$) et BLOC $_i$ ($LL[2*m+i]$). Le calcul du taux de production effectif est imbriqué dans une boucle qui tient compte du nombre de machines défini dans le fichier contrôle pour éliminer les changements nécessaires par l'augmentation du nombre de machines.

```

{
    int i;

    /*Taux de production des machines 1 à m*/
    for (i=1; i<=m;i++)    {

        XX[2*m+i]=XX[m+i]*LL[i]*LL[m+i]*LL[2*m+i];    }

```

La section suivante sert à définir les variables d'état $SS[i+2]$ qui correspondent au niveau instantané des stocks. La machine M_i est définie seule et en premier puisqu'elle n'est pas suivie d'une autre machine mais bien du taux de la demande d . Les machines M_1 à M_{m-1} sont aussi imbriquées dans une boucle pour éliminer les modifications nécessaires à l'ajout de machines. Le niveau futur de la variable d'état est donné par $x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + (u_i(t) - u_{i+1}(t)) \cdot \Delta t$.

```

/*Variables d'état*/

/* Variable d'etat sur le stock de produit fini*/
SS[m+2]=SSL[m+2] + (XX[3*m]-d)*DTNOW;

/*Définition des variables d'etat pour les stocks 1 à m-1*/
for (i=1; i<=m-1;i++)    {
    SS[i+2]=SSL[i+2]+(XX[2*m+i]-XX[2*m+i+1])*DTNOW;
}

```

La dernière portion de la fonction STATE sert à définir les variables cumulatives qui seront intégrées pendant la simulation. La variable DD[1] correspond au niveau du backlog instantané alors que la variable DD[2] correspond au niveau d'en-cours instantané. Les multiplicateurs LL[3*m+2] et LL[3*m+1] correspondent aux variables binaires BACKLOG et STKPOSIT respectivement dans le fichier réseau et le fichier de contrôle. La fonction STATE pour un mécanisme et un indicateur est valide peu importe de nombre de machines grâce à la boucle « *for* » dans l'extrait suivant :

```

/*Statistiques*/

/*Équation différentielle du niveau de rupture*/
DD[1]= -SS[m+2]*LL[3*m+2];

/*Équation différentielle de l'inventaire*/
DD[2]= SS[m+2]*LL[3*m+1];

for (i=1; i<=m-1;i++) {
DD[2]= DD[2]+SS[i+2];
}

return;
}

```

4.3.2. Fonctions EVENT

La fonction EVENT sert à calculer le temps de calcul nécessaire en se servant de l'horloge interne de l'ordinateur. Elle retourne la durée (« duration ») en secondes. L'événement ayant comme code 1 est le début de la simulation et la fin a le code 2. Clock(0) est la fonction en langage C qui prend l'heure de l'horloge interne.

```

#include "vslam.h"
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#define m LL[0] /* Nombre de machines déclarées dans fich. contrôle*/
#define start XX[3*m+7] /* Instant de début de simulation*/
#define finish XX[3*m+8] /* Instant de fin de simulation */
#define duration XX[3*m+9] /* diff entre start et finish*/

void EVENT(int I) {
switch (I) {

```

```
case 1:    start=clock(0);  
          break;  
  
case 2:    finish=clock(0);  
          duration=finish-start;  
          break;  
  
return;  
}  
}
```

5. MÉCANISMES CONWIP ET HYBRIDE

Nous présentons dans cette section les réseaux Visual Slam, le fichier contrôle et les fonctions en langage C pour les modèles de simulation des mécanismes CONWIP et Hybride. Il est à noter que le modèle de simulation est identique pour Kanban et CONWIP. Pour obtenir les performances du mécanisme CONWIP, tous les seuils critiques des stocks doivent avoir la valeur de Z_m .

5.1. Réseaux Visual Slam

Nous présentons ici les réseaux de lecture et d'écriture, les réseaux de panne et de réparation ainsi que les réseaux de détection du modèle de simulation pour CONWIP et Hybride. Certains groupes de nœuds sont identiques au modèle du mécanisme Kanban. Le cas échéant, nous renvoyons le lecteur au paragraphe correspondant de la section 4 de la présente annexe.

5.1.1. Réseaux de lecture et d'écriture de données

Idem à section 4.1.1 à l'exception du point C. La valeur des niveaux de stock dans le nœud ASSIGN de la branche C diffère au mécanisme Kanban parce qu'il est possible que $\sum_{i=1}^m \frac{Z_i}{2} > Z_m$ ce qui ne devrait pas arriver avec ces mécanismes, l'inventaire étant limité en tout temps par Z_m . Les valeurs données au niveau des stocks tampons doivent donc tenir compte de cette contrainte. Pour éviter de toujours changer ces valeurs, on leur assigne une valeur suffisamment petite pour toujours satisfaire cette contrainte mais suffisamment grande pour ne pas interférer avec les réseaux de détection.

5.1.2. Réseaux de pannes et réparation

Idem à la section 4.1.2.

5.1.3. Réseaux de détection

Les réseaux de détection servent à générer des événements lorsque les variables continues franchissent certains seuils comme les seuils critiques $Z_i, i=1, \dots, m$. par exemple, ou lorsqu'elles franchissent 0. La disposition de ces nœuds a été choisie pour faciliter l'ajout de machines au modèle de simulation. Le bloc de nœuds DETECT à rajouter pour avoir une machine supplémentaire se fait à la suite de ceux qui sont déjà existants. Les blocs (A) et (B) sont identiques à la section 4.1.3. Les blocs C et D sont montrés à la figure

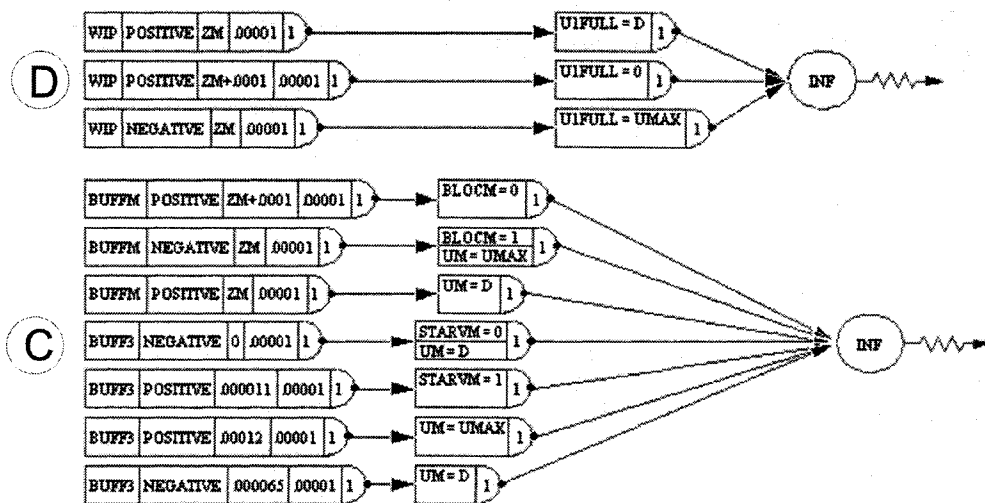


Figure 6 Blocs C et D des réseaux de détection pour CONWIP et Hybride

C) Le bloc C comporte 2 lignes supplémentaires par rapport au modèle Kanban. Ces lignes concernent la variable $Buff_{i-1}$ avec $i=1, \dots, m$. Elles servent à réguler le taux de production lorsque l'approvisionnement de la machine est faible et éviter un nombre

trop important d'événements. En effet, le taux d'entrée de matière dans la ligne est contrôlé par la machine M_1 . Lorsque la limite d'en-cours permis, déterminée par le seuil Z_m , est atteinte, la machine M_1 relâche de la matière dans le système au taux de la demande de produits finis d . Les stocks tampons ont alors tendance à se vider au profit du stock de produits finis et les machines se retrouveraient désamorçées. Si nous donnons une valeur très petite au seuil à partir duquel $STARV_i$ reprend la valeur 1, il ne prendra que très peu de temps avant que la machine redémarre, mais aussi très peu de temps avant que le stock ne se vide une fois de plus puisque le taux d'approvisionnement de la machine est inférieur à son taux de production. Cette boucle se répétera sans arrêt jusqu'à ce qu'un événement externe comme une panne ne survienne. Comme chaque arrêt et démarrage nécessite la génération de plusieurs événements et que ceux-ci nécessitent du temps de calcul, le temps de simulation s'en trouve dramatiquement augmenté et devient même beaucoup plus long que le modèle discret, ce qui fait alors perdre tout avantage à la simulation continue. Les deux dernières lignes du bloc C des réseaux DETECT ont été rajoutées pour réduire ces événements. Ils servent à changer le taux de production sous un certain seuil pour le poser égal au taux de la demande ce qui réduit les événements de désamorçage inutiles. Si le stock d'approvisionnement continue à augmenter, le taux de production est alors posé égal au taux de production max.

Un nouveau bloc s'ajoute également aux réseaux DETECT. Il s'agit du bloc D sur la figure 6. Il sert à contrôler le taux de production U1FULL de la machine M_1 en fonction du niveau de stock présent dans le système. Par exemple, lorsque l'en-cours atteint Z_m , le taux de production est limité au taux de la demande d . Lorsque le seuil Z_m est dépassé, le taux d'entrée de la matière est nul. Dans tous les autres cas, U1FULL est égal à UMAX. Le choix entre U1FULL (qui dépend du niveau de WIP total) et U1 (qui dépend du niveau de stock x_1) est effectué dans la fonction STATE.

5.2. Fichier de contrôle

Le fichier de contrôle pour les modèles CONWIP et Hybride est identique à la section 4.2 à l'exception de 2 ajouts : la définition de l'équivalence pour la variable U1FULL et son initialisation. Ces deux données ont été ajoutées à la suite des énoncés EQUIVALENCE existants.

;Equivalences pour les taux de production

**EQUIVALENCE,{{U1,XX[M+1]},{U2,XX[M+2]},{U3,XX[M+3]},{UM,XX[2*M]},
{U1FULL,XX[3*M+10]}};**

INTLC,{{UM,2},{U3,2},{U2,2},{U1,2},{U1FULL,2}};

5.3. Fonctions en langage C

Nous décrivons ici la fonction d'état (STATE) qui définit les équations différentielles du modèle et la fonction EVENT qui sert à calculer la durée de la simulation pour les mécanismes CONWIP et Hybride.

5.3.1. Fonction d'état

Les premières lignes de la fonction STATE servent pour l'initialisation et la communication avec AweSim. Pour faciliter la compréhension, nous redonnons le nom textuel aux variables m (nombre de machines) et d (taux de la demande). Il est à noter que le langage C ne reconnaît alors pas les noms donnés aux variables par le biais des EQUIVALENCES du fichier de contrôle mais bien le nom original Visual Slam. L'équivalence doit être refaite au début du fichier si on désire s'en servir.

```

#include "vslam.h"
#define m LL[0]          /* Nombre de machines déclarées dans le fichier
de contrôle*/
#define d XX[3*m+3]     /* demande */

void SWFUNC STATE(void)

```

La seconde partie sert à définir les taux de production des différentes machines à l'aide des valeurs contrôlées par les réseaux DETECT (variables $XX[2*m+i]$, $i=1, \dots, m$) et les variables binaires, $PANNE_i$ ($LL[i]$), $STARV_i$ ($LL[m+i]$) et $BLOC_i$ ($LL[2*m+i]$). Compte tenu que le taux de production est limité au taux de la demande lorsque la limite d'en-cours dans le système est atteinte, la machine M_1 nécessite un calcul indépendant des autres machines pour son taux de production. Le taux de production est conditionnel (boucle « if ») à la valeur des variables $U1$ qui dépend du niveau de x_1 et $UFULL1$ qui dépend de l'inventaire total dans le système. Le taux de production choisi est la valeur la plus faible entre les deux, et est ensuite multiplié par les variables logiques.

```

{
    /*Taux de production instantané de la machine 1*/
    if (XX[m+1]<=XX[3*m+7])      {
        /*Si l'en-cours total (wip) est inférieur à Zm*/
        XX[2*m+1]=XX[m+1]*LL[1]*LL[m+1]*LL[2*m+1];
        /* U1*panel*starv1*bloc1*/
    }
    else
        {
            /* Sinon*/
            XX[2*m+1]=XX[3*m+7]*LL[1]*LL[m+1]*LL[2*m+1];
        }
        /*UFULL1*panel*starv1*bloc1*/
}

```

Le calcul du taux de production effectif des machines 2 à m , du niveau instantané d'inventaire de chaque stock et l'équation différentielle de l'inventaire cumulatif sont imbriqués dans des boucle qui tiennent compte du nombre de machines défini dans le fichier contrôle. Le but de ces boucles est d'éliminer les modifications à apporter à la fonction STATE lorsqu'on augmente le nombre de machines du modèle. La même fonction STATE peut donc être utilisée peu importe le nombre de machines.

```

int i;

/*Taux de production instantané des machines 2 à m*/
for (i=2; i<=m;i++) {

XX[2*m+i]=XX[m+i]*LL[i]*LL[m+i]*LL[2*m+i];      }
/* Ui*pannel1*starv1*bloc1*/

```

Le calcul des niveaux des stocks et la définition des équations différentielles sont ensuite faits comme pour le modèle Kanban (section 4.3.1).

```

/*Variables d'état*/

/* Variable d'état sur le stock de produit fini*/
SS[m+2]=SSL[m+2] +(XX[3*m]-d)*DTNOW;

/*Variables d'état les stocks 1 à m-1*/

for (i=1; i<=m-1;i++) {
SS[i+2]=SSL[i+2]+(XX[2*m+i]-XX[2*m+i+1])*DTNOW;
}

/*Statistiques*/

/*Équation différentielle du niveau de rupture*/
DD[1]= -SS[m+2]*LL[3*m+2];

/*Équation différentielle de l'inventaire*/
DD[2]= SS[m+2]*LL[3*m+1];

for (i=1; i<=m-1;i++) {
DD[2]= DD[2]+SS[i+2];
}

return;
}

```

5.3.2. Fonctions EVENT

Idem à la section 4.3.2.

CONCLUSION

Les modèles de simulation combinés discrets/continus ont été présentés. Ces modèles permettent d'évaluer le niveau d'inventaire et le niveau de rupture moyen dans le but d'obtenir le coût moyen. Des modèles pour les mécanismes Kanban, CONWIP et hybride ont été construits.

BIBLIOGRAPHIE

- Akella, R., & Kumar, P. R. (1986). Optimal Control of Production Rate in a Failure Prone Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automatic Control, AC-31*(2), 116-126.
- Bai, S. X., & Gershwin, S. B. (1994). Scheduling manufacturing systems with work-in-process inventory control: Multiple-part-type systems. *International Journal of Production Research, 32*(2), 365-385.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- Baynat, B., & Dallery, Y. (1993a). Approximate Techniques for General Closed Queuing-Networks with Subnetworks Having Population Constraints. *European Journal of Operational Research, 69*(2), 250-264.
- Baynat, B., & Dallery, Y. (1993b). Decomposition Approximation Method for Closed Queuing-Networks with Fork/Join Subnetworks. *Decentralized and Distributed Systems, 39*, 199-210.
- Berkley, B. J. (1992). A review of the kanban production control research literature. *Production and Operations Management, 1*(4), 393-411.
- Bonvik, A. M. (1996). *Performance analysis of manufacturing systems under hybrid control policies*. Unpublished Thesis Ph. D. --Massachusetts Institute of Technology Sloan School of Management 1996.
- Bonvik, A. M., Couch, C. E., & Gershwin, S. B. (1997). Comparison of production-line control mechanisms. *International Journal of Production Research, 35*(3), 789-804.
- Bonvik, A. M., Dallery, Y., & Gershwin, S. B. (2000). Approximate analysis of production systems operated by a CONWIP/finite buffer hybrid control policy. *International Journal of Production Research, 38*(13), 2845-2869.
- Burman, M. H. (1995). *New results in flow line analysis*. Unpublished Thesis Ph. D. --Massachusetts Institute of Technology Dept. of Electrical Engineering and Computer Science 1995.
- Chiang, S. Y., Kuo, C. T., & Meerkov, S. M. (1999). *c-Bottlenecks in Serial Production Lines: Identification and application*. (No. CGR-99-05). Ann Arbor, Michigan: University of Michigan, Department of Electrical Engineering and Computer Science.

- Dallery, Y., David, R., & Xie, X. L. (1989). Approximate Analysis of Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(9), 943-953.
- Dallery, Y., & Le Bihan, H. (1999). An improved decomposition method for the analysis of production lines with unreliable machines and finite buffers. *International Journal of Production Research*, 37(5), 1093-1117.
- Dallery, Y., & Liberopoulos, G. (2000). Extended kanban control system: combining kanban and base stock. *Iie Transactions*, 32(4), 369-386.
- Di Mascolo, M., David, R., & Dallery, Y. (1991). Modeling and analysis of assembly systems with unreliable machines and finite buffers. *IIE Transactions*, 23(4), 315-330.
- Dobler, D. W., Lee, L., & Burt, D. N. (1990). *Purchasing and materials management text and cases* (5th ed.). New York ; Montréal: McGraw-Hill.
- Duri, C., Frein, Y., & Di Mascolo, M. (2000a). Comparison among three pull control policies: kanban, base stock, and generalized kanban. *Annals of Operations Research*, 93, 41-69.
- Duri, C., Frein, Y., & Lee, H. S. (2000b). Performance evaluation and design of a CONWIP system with inspections. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 219-229.
- Framinan, J. M., Gonzalez, P. L., & Ruiz-Usano, R. (2003). The CONWIP production control system: review and research issues. *Production Planning & Control*, 14(3), 255-265.
- Frein, Y., Commault, C., & Dallery, Y. (1996). Modeling and analysis of closed-loop production lines with unreliable machines and finite buffers. *Iie Transactions*, 28(7), 545-554.
- Frein, Y., DiMascolo, M., & Dallery, Y. (1995). On the design of generalized kanban control systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(9), 158-184.
- Gaury, E. G. A., Kleijnen, J. P. C., & Pierreval, H. (2001). A methodology to customize pull control systems. *Journal of the Operational Research Society*, 52(7), 789-799.
- Gaury, E. G. A., Pierreval, H., & Kleijnen, J. P. C. (2000). Evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(2), 157-167.

- Geraghty, J., & Heavey, C. (2004). A comparison of Hybrid Push/Pull and CONWIP/Pull production inventory control policies. *International Journal of Production Economics*, 91(1), 75-90.
- Gershwin, S. B. (1987). Efficient Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Tandem Queues with Finite Storage Space and Blocking. *Operations Research*, 35(2), 291-305.
- Gershwin, S. B. (1994). *Manufacturing systems engineering*. Englewood Cliffs, N.J.: PTR Prentice Hall.
- Gershwin, S. B. (1996). *How to design a production line that has a bottleneck*, from <http://web.mit.edu/manuf-sys/www/buffer-optimization.html>
- Gershwin, S. B., & Schick, I. C. (1979). Analytic Methods for Calculating Performance Measures of Production Lines with Buffer Storages. *Proc IEEE Conf Decis Control Incl Symp Adapt Processes 17th, Jan 10-12 1979*, 618-624.
- Gershwin, S. B., & Schick, I. C. (1980). *Continuous model of an unreliable two-stage material flow system with a finite interstage buffer*. Cambridge, Mass.: Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology.
- Gershwin, S. B., & Schick, I. C. (1983). Modeling and Analysis of Three-Stage Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers., 31(2), 354-380.
- Gershwin, S. B., & Schor, J. E. (2000). Efficient algorithms for buffer space allocation. *Annals of Operations Research, Performance Evaluation and Optimization of production Lines. International Workshop, 19-22 May 1997, 93*, 117-144.
- Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2003). Optimal production control problem in stochastic multiple-product multiple-machine manufacturing systems. *IIE Transactions*, 35(10), 941-952.
- Golany, B., Dar-El, E. M., & Zeev, N. (1999). Controlling shop floor operations in a multi-family, multi-cell manufacturing environment through constant work-in-process. *Iie Transactions*, 31(8), 771-781.
- Gstettner, S., & Kuhn, H. (1996). Analysis of production control systems kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*, 34(11), 3253-3273.
- Hillier, F. S., So, K. C., & Boling, R. W. (1993). Toward Characterizing the Optimal Allocation of Storage Space in Production Line Systems with Variable Processing Times. *Management Science*, 39(1), 126-133.

- Hillier, M. S. (2000). Characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *IIE Transactions*, 32(1), 1-8.
- Huang, M., Wang, D. W., & Ip, W. H. (1998). A simulation and comparative study of the CONWIP, Kanban and MRP production control systems in a cold rolling plant. *Production Planning & Control*, 9(8), 803-812.
- Karaesmen, F., & Dallery, Y. (2000). A performance comparison of pull type control mechanisms for multi-stage manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 68(1), 59-71.
- Kenné, J. P., & Boukas, E. K. (1997, June 1997). *Production Rate Control and Corrective Maintenance Planning Problem of a Failure Prone Manufacturing System*. Paper presented at the ACC conference, Albuquerque.
- Kenné, J. P., & Gharbi, A. (1999). Experimental design in production and maintenance control problem of a single machine, single product manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 37(3), 621-637.
- Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2001). A simulation optimization approach in production planning of failure prone manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12(5-6), 421-431.
- Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2004a). A simulation optimization based control policy for failure prone one-machine, two-product manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 46(2), 285-292.
- Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2004b). Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 46(4), 865-875.
- Kleijnen, J. P. C., & Gaury, E. (2003). Short-term robustness of production management systems: A case study. *European Journal of Operational Research*, 148(2), 452-465.
- Kochel, P., & Nielander, U. (2002). Kanban optimization by simulation and evolution. *Production Planning & Control*, 13(8), 725-734.
- Kushner, H. J., & Dupuis, P. G. (1992). *Numerical Methods for Stochastic Control Problems in Continuous Time*. New-York: Springer-Verlag.
- Lou, S., Sethi, S. P., & Zhang, Q. (1994). Optimal feedback production planning in a stochastic two-machine flowshop. *European Journal of Operational Research*, 73(2), 331-345.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments* (6th ed.). New York: Wiley.

- Muckstadt, J. A., & Tayur, S. R. (1995). A Comparison of Alternative Kanban Control Mechanisms .2. Experimental Results. *IIE Transactions*, 27(2), 151-161.
- Presman, E., Sethi, S., & Zhang, Q. (1995). Optimal Feedback Production Planning in a Stochastic N-machine Flowshop. *Automatica*, 31(9).
- Pritsker, A. A. B., & O'Reilly, J. J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSim* (2nd ed.). New York, N.Y., West Lafayette, Ind.: J. Wiley and Sons, Systems Publishing.
- Rioux, M. (2001). *Méthodologie d'expérimentation et de modélisation empirique appliquée à l'optimisation des stocks intermédiaires de systèmes de production*. École de technologie supérieure, Montréal.
- Roderick, L. M., Toland, J., & Rodriguez, F. P. (1994). A Simulation Study of Conwip Versus Mrp at Westinghouse. *Computers & Industrial Engineering*, 26(2), 237-242.
- Sadr, J., & Malhame, R. P. (2004). Decomposition/aggregation-based dynamic programming optimization of partially homogeneous unreliable transfer lines. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(1), 68-81.
- Schor, J. E. (1995). *Efficient algorithms for buffer allocation*. Unpublished Thesis M.S. - Massachusetts Institute of Technology Dept. of Electrical Engineering and Computer Science 1995.
- Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. J. (1990). CONWIP. A pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, 28(5), 879-894.
- Stevenson, W. J., & Hojati, M. (2001). *Production/operations management* (Canadian ed.). Toronto: McGraw-Hill Ryerson.
- Venkataraman, P. (2002). *Applied optimization with MATLAB programming*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.