

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL  
(CONCENTRATION EN PRODUCTIQUE)**

**PAR  
DANIEL BERGERON**

**COUPLAGE DE LA SIMULATION ET DE L'OPTIMISATION  
POUR UNE PLANIFICATION INTÉGRÉE DE LA  
PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES  
DE PRODUCTION FLEXIBLES**

**FÉVRIER 2012**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## SOMMAIRE

La réputation de la production en juste-à-temps n'est plus à faire. Depuis la fin des années 70, ce mode de production, visant à augmenter la productivité d'une entreprise en réduisant notamment la taille des stocks et les coûts qui y sont associés, n'a cessé de se populariser sur le continent américain. Si le juste-à-temps apporte son lot de solutions, il entraîne aussi son lot de difficultés. Ainsi, il peut être difficile, par exemple, pour une entreprise de dimensionner la taille des stocks entre deux machines. Une taille trop grande entraîne une faible réactivité en cas de production de pièces non-conformes, augmente le temps de passage, ainsi que les coûts de possession de ces stocks. À l'inverse, une taille trop petite diminue la robustesse de l'entreprise face à des défaillances des machines. Ces pannes peuvent entraîner un retard fort coûteux ou encore, rendre le plan de production actuellement en place inapproprié. La mise en place d'un plan de production d'urgence est alors requise et cet exercice peut s'avérer fort coûteux.

C'est dans cette perspective qu'un outil d'aide à la décision a été développé dans le cadre de ce mémoire. Cet outil, basé sur le couplage de la simulation et de l'optimisation, sert à aider les entreprises sur trois aspects :

1. Détermination de la taille des stocks entre deux machines;
2. Détermination de la stratégie de maintenance optimale à adopter;

3. Détermination d'un plan de production optimal qui tient compte a priori de la stratégie de maintenance mise en place.

Les résultats obtenus montrent la pertinence d'un tel outil pour faciliter la prise de décisions relatives à la production et à la maintenance. En plus d'une expansion de l'outil pour le rendre plus complet, le recours à un logiciel compagnon pour faciliter son accessibilité par les entreprises est d'ailleurs envisagé.

## REMERCIEMENTS

Par la présente, j'aimerais grandement remercier le Professeur Jocelyn Drolet, pour avoir eu la générosité d'accepter de prendre la relève à titre de directeur de mémoire à la dernière minute. J'aimerais également remercier le Professeur Mohamed Anouar Jamali pour sa grande passion, pour son dévouement et pour avoir cru en moi. J'aurai eu la chance de tisser une amitié dans le cadre de cette aventure. Je voudrais aussi remercier les gens qui auront pris le temps de corriger ce mémoire pour qu'il soit à son meilleur. Enfin, je voudrais remercier mes parents, Jean-Paul et Lydie, pour leur soutien indéfectible au cours de cette aventure, mais surtout, ma femme Vicky pour ses sourires et son amour sans bornes.

*Un problème sans solution est un problème mal posé.*

ALBERT EINSTEIN

## TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iv
TABLE DES MATIÈRES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 2 : DÉFINITION DES CONCEPTS ET REVUE DE LA LITTÉRATURE ....	5
2.1. Ligne de production .....	5
2.1.1. Les modèles à deux machines.....	7
2.1.2. Les modèles à trois machines .....	11
2.1.3. Les modèles à $M$ machines .....	12
2.1.4. Les modèles composés de machines parallèles .....	15
2.1.5. Les configurations complexes .....	17
2.2. Maintenance.....	21
2.2.1. Définition .....	21
2.2.2. Types de maintenance.....	21
2.2.3. Stratégies de maintenance.....	22

2.3. Simulation .....	28
2.4. Optimisation.....	29
2.5. Outil d'aide à la décision versus la littérature.....	31
 CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE.....	33
3.1. Conception du modèle .....	33
3.2. Choix de la simulation et de l'optimisation .....	35
3.3. Choix des logiciels.....	36
3.4. Construction du modèle de simulation .....	37
3.4.1. Hypothèses du modèle .....	38
3.5. Validation.....	40
3.6. Vérification .....	40
3.7. Production de résultats .....	41
3.7.1. L'optimisation.....	42
3.7.2. Nombre de simulations et de réplications.....	44
3.8. Analyse des résultats.....	45
3.9. Conclusion .....	45
 CHAPITRE 4 : MODÈLE À UNE MACHINE ET GÉNÉRALISATION.....	47
4.1. Le modèle à une machine fiable .....	48
4.1.1. Ordinogrammes pour un système à une machine fiable .....	55
4.1.2. Modèle Arena à une machine fiable .....	58
4.1.3. Résultats pour une machine fiable .....	59
4.2. Modèle pour une machine non fiable et généralisation .....	61
4.2.1. Ordinogamme du modèle à une machine non fiable et généralisation .	61

4.2.2. Modèle Arena à une machine non fiable et généralisation .....	68
4.2.3. Résultats pour une machine non fiable .....	68
4.2.4. Résultats pour plusieurs machines en série.....	74
4.3. Conclusion .....	79
 CHAPITRE 5 : ANALYSE APPROFONDIE DE L'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION.	80
5.1. Comparaison d'un plan intégré versus non intégré.....	80
5.2. Impact de la variabilité sur le modèle .....	84
5.3. Impact de stratégies opportunistes sur le modèle .....	85
 CHAPITRE 6 : CONCLUSION .....	88
 BIBLIOGRAPHIE .....	90
 ANNEXE .....	94

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 – Coûts pour chaque type de produits .....	49
Tableau 4.2 – Demande périodique pour les produits A et B .....	49
Tableau 4.3 - Comparaison des résultats pour le plan de production optimal .....	59
Tableau 4.4 - Comparaison des coûts théoriques et observés avec une distribution $G2, 1$ pour différentes valeurs de $T = k\tau; \tau = 1$ .....	70
Tableau 4.5 – Comparaison des coûts théoriques et observés avec une distribution $G2, 2$ pour différentes valeurs de $T = k\tau; \tau = 1$ .....	71
Tableau 4.6 – Solution initiale pour un système comportant deux machines non fiables ...	76
Tableau 4.7 – Solution finale pour un système comportant deux machines non fiables ....	77
Tableau 4.8 – Solution finale pour le système comportant quatre machines en série .....	79
Tableau 5.1 – Comparaison des coûts de production et de maintenance entre une solution intégrée et non intégrée .....	81

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Ligne de production type comprenant quatre machines .....	6
Figure 2.2 – Modèle de base composée de 2 machines .....	8
Figure 2.3 – Configuration parallèle .....	16
Figure 2.4 – Atelier monogamme hybride .....	18
Figure 2.5 – Assemblage et désassemblage .....	19
Figure 2.6 – Revue des principales stratégies de maintenance .....	24
Figure 2.7 – Classement de quelques algorithmes d'optimisation.....	31
Figure 3.1 – Échange d'information entre le module de simulation et le module d'optimisation .....	42
Figure 3.2 – Procédure pour la détermination de la solution initiale.....	44
Figure 4.1 – Ordinogramme représentant la demande .....	56
Figure 4.2 – Ordinogramme représentant le calcul des coûts de stockage et de retard .....	58
Figure 4.3 – Ordinogramme représentant la production pour un système comportant une ou plusieurs machines non fiables (partie 1).....	63

Figure 4.4 - Ordinogramme représentant la production pour un système comportant une ou plusieurs machines non fiables (partie 2).....	64
Figure 4.5 – Ordinogramme représentant la défaillance et la maintenance des machines pour un remplacement indépendant de type bloc.....	66
Figure 4.6 – Deux machines en série séparées par un stock tampon .....	75
Figure 4.7 – Quatre machines en série séparées par trois stocks tampons.....	78
Figure 5.1 – Comparaison du coût d'une solution intégrée par rapport à une solution non intégrée.....	83
Figure 5.2 – Comparaison du nombre moyen de retards par cycle de production.....	84
Figure 5.3 – Impact de la variabilité sur le coût total.....	85
Figure 5.4 – Comparaison du coût de deux stratégies de maintenance opportunistes et une stratégie de maintenance indépendante .....	87
Figure A.0.1 – Modèle Arena pour un système à une machine fiable .....	95
Figure A.0.2 – Modèle Arena illustrant le générateur de pannes pour des systèmes comportant une ou plusieurs machines .....	96

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

C'est lors du choc pétrolier de 1973 que les grands manufacturiers américains de l'automobile ont réalisé l'importance d'une production à flux tiré (production sur demande). Depuis ce temps, la méthode juste-à-temps, développée par Taiichi Ohno chez Toyota au milieu du siècle dernier, s'est peu à peu popularisée en Occident. Cela a, entre autres, pour avantages de réduire le stockage et les coûts qui y sont reliés (coûts financiers, assurances, espace de stockage, manutention, désuétude), de diminuer le temps de passage et d'augmenter la réactivité en cas de non-conformité. Cependant, cette réduction du stockage entre deux machines doit se faire avec vigilance. En effet, une taille de stock tampon (entre deux machines) trop faible entraîne une dépendance plus forte à la variabilité (pannes, variabilité du temps de cycle des machines et du temps de mise en course). Cette dépendance plus forte amène à son tour des risques bien tangibles : des retards pouvant causer à la fois une perte de clients et des pénalités financières. Il existe donc un niveau de stock tampon qui soit optimal et qui permette de minimiser les coûts de production et de stockage qui y sont associés.

Dans un autre ordre d'idées, de plus en plus d'entreprises réalisent les bénéfices qu'elles peuvent retirer de l'implantation d'une stratégie de maintenance. Cette stratégie de maintenance permet d'assurer le bon fonctionnement des machines, de détecter des problèmes avant qu'ils n'entraînent des défaillances importantes et aussi de contrôler les

coûts liés à la maintenance en limitant, entre autres, le nombre d'interventions devant être faites en urgence. Toutefois, encore trop peu d'entreprises accordent une place à la maintenance à l'intérieur même de leur plan de production. En plus de pouvoir être la source de conflits humains, cela a souvent pour impact de diminuer le nombre d'interventions de maintenance réelles par rapport au nombre d'interventions de maintenance requises.

Par ailleurs, à notre connaissance, il n'existe pas d'outil qui permette à une entreprise d'être guidée à la fois dans le choix de la taille des stocks tampons, dans l'évaluation d'une stratégie de maintenance adéquate et dans la détermination d'un plan de production, accordant une place aux interventions de maintenance a priori, tout en minimisant les coûts totaux. C'est donc essentiellement pour ces trois raisons que cet outil a été développé. Bien qu'il ne s'agisse encore que d'un prototype, ce mémoire relate le cheminement qui a été fait pour le développer. Une généralisation du travail de Aghezzaf, Jamali et Ait-Kadi (2007) a d'abord été effectuée pour le rendre utilisable avec plusieurs machines en série. Par la suite, des résultats ont été obtenus avec diverses stratégies de maintenance afin de les comparer entre elles. La contribution de ce travail réside donc dans la conception et le développement de cet outil d'aide à la décision.

Ainsi, cette recherche vise, d'une part, à développer un outil d'aide à la décision qui puisse guider les entreprises dans leurs choix relatifs à la production et à la maintenance. D'autre part, elle vise à comparer diverses stratégies de maintenance afin de sélectionner la stratégie

convenant le mieux au système étudié. Plus concrètement, cette recherche a pour objectifs de :

1. Développer un modèle de simulation de lignes de production assujetties à des défaillances aléatoires;
2. Coupler le modèle de simulation à un module d'optimisation de telle sorte que l'on puisse obtenir :
  - a. Le plan de production optimal qui tient compte des activités de maintenance préventive et corrective;
  - b. Le plan de maintenance optimal pour chacune des machines de la ligne de production;
  - c. La taille optimale des stocks tampons de la ligne de production;
3. Établir un plan expérimental qui permette de comparer différentes stratégies de maintenance pour une ligne de production donnée;
4. Analyser les résultats obtenus par la mise en œuvre du plan expérimental.

C'est donc pour répondre à ces objectifs que cette recherche a vu le jour. Cette recherche a d'ailleurs mené à la publication de deux articles, le premier ayant paru dans l'*International Journal of Product Development* Bergeron, Jamali et Yamamoto (2010), et le second ayant été présenté, et publié, dans le cadre du *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, qui s'est tenu du 3 au 5 juin 2009, à l'Institut V. A. Trapeznikov à Moscou, en Russie Bergeron, Jamali et Ait-Kadi (2009).

Les prochains chapitres seront divisés comme suit. Le chapitre 2 se consacre principalement à la théorie entourant le développement de l'outil. Une revue de la littérature s'y retrouve également afin de faire état des recherches qui ont déjà effectuées sur le sujet. Le chapitre 3 est dédié à la méthodologie adoptée dans le cadre de cette recherche. La généralisation du modèle de Aghezzaf, Jamali et al. (2007) est discutée dans le chapitre 4. Une analyse approfondie de l'outil d'aide à la décision est présentée au chapitre 5. Enfin, le chapitre 6 est consacré à la conclusion.

## CHAPITRE 2 : DÉFINITION DES CONCEPTS ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre vise à définir les principaux concepts entourant la production et la maintenance, et sur la façon de modéliser ces concepts. Même s'il est impossible de classer tous les concepts dans des sections bien définies parce qu'ils sont souvent interreliés, cela sera fait dans la mesure du possible dans le but d'éclairer au maximum le lecteur. Il est également à noter que, à moins d'un avis contraire, les définitions des concepts ont été tirées de l'ouvrage de Gershwin (2002).

### 2.1. Ligne de production

Une ligne de production est un réseau linéaire de postes de travail ou de machines ( $M_m, m \in \{1, \dots, K\}$ , où  $K$  est le nombre de machines contenues dans la ligne de production) séparées par des stocks tampons ( $B_{m,m+1}, m \in \{1, \dots, K - 1\}$ , où  $B_{m,m+1}$  correspond à la taille du stock tampon compris entre les machines  $m$  et  $m + 1$ ). Les produits qui y sont fabriqués arrivent en amont du système et sont traités sur la machine  $M_1$ , passent par le stock tampon  $B_{1,2}$ , puis par la machine  $M_2$ , et ainsi de suite jusqu'à ce que la dernière machine ( $M_K$ ) soit atteinte et que les produits fabriqués soient évacués vers l'entrepôt des produits finis.

La Figure 2.1 ci-dessous illustre une ligne de production type qui comprend quatre machines et trois stocks tampons.

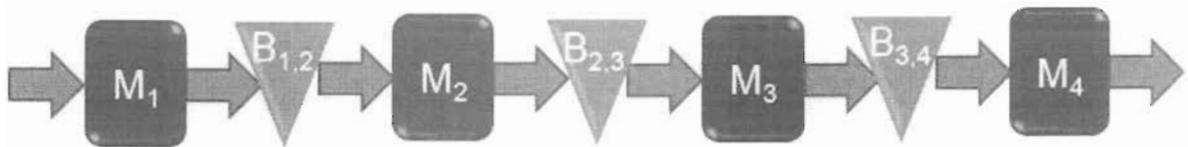


Figure 2.1 – Ligne de production type comprenant quatre machines

Dans la littérature, les modèles sont normalement classifiés en trois catégories :

- Modèles à états discrets et à temps discret
- Modèles à états discrets et à temps continu
- Modèles à états mixtes et à temps continu

Un modèle à états discrets est un modèle dans lequel des pièces discrètes sont produites (il est possible de compter les pièces dans les stocks tampons). De plus, les machines peuvent être soit dans un état opérationnel (en marche) ou en panne (en arrêt). Par opposition, dans un modèle à états mixtes, le niveau du stock tampon est continu (comme s'il contenait un liquide). Cependant, les états des machines sont toujours considérés comme étant discrets, d'où l'appellation « états mixtes ». Quand un modèle est à temps discret, cela signifie que le temps est divisé en intervalles de longueur équivalents. Dans ce cas, les événements (début ou fin de production, changement d'état d'une machine, etc.) sont synchronisés avec les limites de ces intervalles de temps. De façon à obtenir une bonne approximation d'un système manufacturier réel, ces intervalles de temps doivent être suffisamment courts. On prendra comme intervalle de temps, en général, le plus petit facteur commun du temps de production des différentes machines composant une ligne de production. Cela peut toutefois nous mener à un problème de taille importante. C'est pour cette raison que certains chercheurs ont préféré travailler avec des modèles à temps continu. Dans ces modèles,

toutes les machines peuvent produire des pièces ou tomber en panne à des temps différents. Cela procure aussi l'avantage de pouvoir attribuer des temps d'exécution ou de pannes basés sur des lois de distribution. De cette façon, les machines ne sont plus forcées d'être synchrones.

Par ailleurs, les machines ne sont pas toujours fiables, c'est-à-dire qu'il existe toujours une possibilité qu'elles puissent tomber en panne à un certain moment. Dans un tel cas, on dit que les machines peuvent tomber en panne en fonction du temps (ou *time-dependant failure*). Par opposition, les machines peuvent aussi être considérées comme pouvant tomber en panne après un certain nombre d'opérations (*operation-dependant failure*). Dans ce dernier cas seulement, les pannes ne peuvent se produire si les machines sont bloquées ou en état de famine. Une machine est considérée en état de famine si le stock tampon qui la précède est vide. Elle est considérée bloquée si le stock tampon qui la suit est plein. Enfin, les modèles de lignes de production peuvent être homogènes ou non homogènes. Le premier signifie que le temps d'exécution des machines est le même pour l'ensemble des machines, contrairement au second.

### 2.1.1. Les modèles à deux machines

Les modèles à 2 machines sont certainement les modèles les plus étudiés que l'on retrouve dans la littérature. Cela est dû principalement au fait qu'il s'agit de la structure d'intérêt la plus simple que l'on puisse trouver. Cette structure composée de deux machines séparées par un stock tampon peut aussi servir de modèle de base servant à mieux comprendre des configurations de systèmes de production plus complexes. La figure 2.2 illustre une telle

structure. Les carrés représentent les machines  $M_i$  ( $i = 1, 2$ ) et le triangle inversé correspond au stock tampon  $B_{1,2}$  séparant les deux machines. À moins qu'il n'en soit spécifié autrement, tous les modèles présentés dans cette section sont considérés exacts. De plus, tous les modèles présentés ici sont basés sur l'hypothèse que la première machine ne peut être en état de famine (il y a toujours de la matière première pour l'alimenter) et la dernière machine ne peut être bloquée (il y a toujours de l'espace où mettre les produits finis).

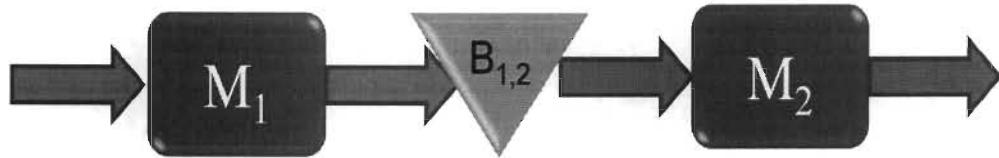


Figure 2.2 – Modèle de base composé de deux machines

Pour les modèles à temps discret, toutes les machines ont des temps d'exécution égaux et constants qui sont synchronisés. Le temps est échelonné de telle sorte qu'il nécessite une unité de temps pour une machine pour produire une pièce. Ainsi, chaque machine  $M_i$  produit une pièce à chaque unité de temps à moins quelle ne soit forcée au repos, soit par blocage ou famine, soit parce qu'elle est tombée en panne. Seule la non fiabilité des machines est aléatoire dans ce modèle. Cela est généralement représenté par une distribution géométrique. Buzacott (1967a) est généralement reconnu pour la popularisation d'un tel modèle en se basant sur le processus de Markov.

Gershwin (2002) présente dans son livre un tel modèle qui peut servir de pierre d'assise pour des lignes de production plus longues. Pour mesurer la performance d'un tel système, trois principaux indicateurs sont utilisés, soit l'efficacité, la probabilité de l'état de repos et le niveau moyen des stocks tampons. L'efficacité d'une machine est définie par la probabilité qu'une machine soit dans un état opérationnel et non en repos.

Dans son modèle, Buzacott (1967a) propose un modèle où la probabilité de défaillance dépend du nombre d'opérations effectuées sur une machine. Toutefois, il considère que la probabilité que deux machines tombent en panne lors du même cycle est négligeable. Artamonov (1977) présente un modèle similaire, mais en maintenant cependant que cette probabilité est non négligeable, au contraire. Tolio, Matta et Gershwin (2002) introduisent différents modes de défaillances dans leur modèle, ce qui signifie que chaque machine possède son propre temps moyen de bon fonctionnement (TMBF) et temps moyen de réparation (TMR).

En ce qui concerne les modèles à états discrets et à temps continu, de façon à rendre son modèle précédent plus réaliste, Buzacott (1972) introduit des temps d'exécution basés sur une loi de distribution. Il considère dans son modèle que toutes les machines ont le même taux de production et que le temps requis par une machine pour produire une pièce est basé sur une distribution exponentielle. La variabilité des temps d'exécution dans un tel modèle est élevée, ce qui a pour effet de réduire l'efficacité du système étant donné les blocages et les famines plus fréquents. Afin de remédier à cela, il propose un système homogène où toutes les machines ont un temps d'exécution basé sur la même distribution. Selon Burman

(1995), cette méthode n'est pas toujours précise. Gershwin et Berman (1981) présentent un modèle où la probabilité de défaillance avant qu'une pièce ne soit complétée est dépendante du temps requis pour fabriquer cette pièce. Dans leur article, ils démontrent également le principe de conservation des pièces (ou du flux).

Dans une autre étude, Berman (1982) élargit son travail précédent avec Gershwin. Plutôt que de recourir à une distribution exponentielle pour représenter le temps d'exécution, il s'appuie plutôt sur une distribution Erlang. Une machine peut ainsi être opérationnelle, en réparation ou en attente d'être réparée, par exemple. Même si ce modèle peut s'approcher davantage de la réalité, il n'a pas été, à notre connaissance, encore utilisé comme base pour des lignes de production comportant plus de deux machines. Sastry et Awate (1988), pour leur part, ont repris le travail précédent de Gershwin et Berman et ils y ont ajouté l'inspection et la remise en fabrication : lorsqu'une pièce est produite, elle est inspectée, et si elle échoue à l'inspection, elle est remise en fabrication.

Pour ce qui des modèles à états mixtes et à temps continu, alors que tous les modèles précédents considéraient des pièces discrètes, la présente section couvrira les modèles à production continue, où le niveau des stocks tampons est représenté par un nombre réel plutôt qu'un nombre entier. Gershwin et Schick (1980) ont développé un modèle où la probabilité de défaillance des machines dépend du nombre d'opérations effectuées sur ces machines et où la production est continue. Dans leur modèle, ils présument que le taux de pannes d'une machine est proportionnel à sa vitesse d'exécution. Leur modèle est souvent utilisé comme base pour des modèles plus imposants.

Si Gershwin et Schick étaient les premiers à présenter un tel modèle, Zimmern (1956) a été l'un des premiers à baser son modèle sur une production continue. À la différence de Gershwin et Schick, il considère que la probabilité de défaillance des machines dépend du temps de fonctionnement et où la vitesse d'exécution, le TMR ainsi que le TMBF sont différents pour les machines. Il montre également l'impact de la capacité des stocks tampons sur le taux de production d'une ligne à production continue. Sevast'yanov (1962) présente aussi un modèle où la probabilité de défaillance dépend du temps de fonctionnement des machines. Cependant, contrairement à Zimmern, il suggère que toutes les machines ont la même vitesse d'exécution et le même TMR. Cependant, une seule machine ne peut être en arrêt à la fois. Cela lui permet de généraliser son modèle pour des lignes comprenant plus de deux machines. Quant à Wijngaard (1979), il adopte une approche différente. Plutôt que d'évaluer directement la performance du système, il choisit d'évaluer le coût associé à chacun des états du système. Ainsi, chaque état se voit attribuer un coût par cycle. Burman (1995), dans sa thèse, mentionne que « *les modèles de Wijngaard et de Gershwin et Shick sont significativement plus importants que les autres modèles à deux machines à production continue (...) parce qu'ils ont été conçus de façon à permettre les techniques de décomposition* ».

### 2.1.2. Les modèles à trois machines

Peu de modèles à trois machines ont été recensés dans la littérature. Il est possible de mentionner les travaux de Buzacott (1967a), de Gershwin et Schick (1983) ainsi que de Coillard et Proth (1984). Cependant, afin d'avoir un modèle exact, ils sont forcés de réduire

le nombre d'équations en émettant différentes hypothèses. Cela peut mener à des modèles qui sont trop restrictifs pour être véritablement intéressants. Ainsi, comme les chercheurs doivent recourir à des approximations, ces modèles seront inclus dans la section des modèles à  $M$  machines.

### 2.1.3. Les modèles à $M$ machines

Les modèles de la présente section concernent ceux de trois machines ou plus. Deux techniques sont généralement reconnues pour estimer la performance de telles lignes de production. La première se nomme la technique de décomposition. C'est cette technique qui est illustrée à la figure 2.3.

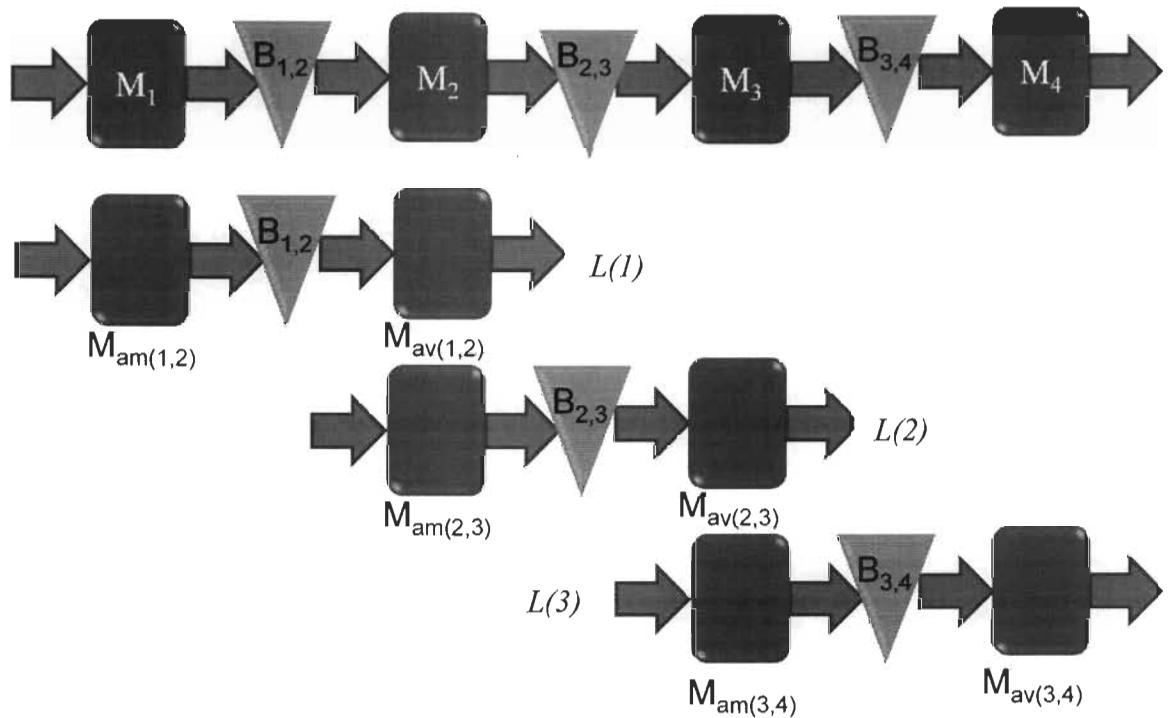


Figure 2.3 – Technique de décomposition pour les lignes de production comportant  $M$  machines

Cette technique est décrite dans l'article de Gershwin (1986). En s'appuyant sur le modèle exact comportant seulement deux machines, on décompose le modèle de  $M$  machines en  $(M - 1)$  modèles de deux machines. Notez que certaines machines apparaissent à deux reprises dans la décomposition et que les indices « am » et « av » servent à indiquer si la machine est située en amont ou en aval. Ces machines, souvent appelées « pseudo-machines » dans la littérature, doivent avoir les mêmes paramètres que la machine originale qu'elles représentent afin d'avoir un modèle le plus réaliste possible. Comme Gershwin (2002) l'a décrit dans son ouvrage, les paramètres doivent être choisis de telle sorte que :

- Le débit entrant et sortant du stock tampon  $B_{i,i+1}$  du sous-système  $L(i)$  doit être le même que celui du stock tampon  $B_{i,i+1}$  du système original
- La probabilité que le stock tampon du sous-système  $L(i)$  soit vide ou plein doit être la même que pour le système original
- La probabilité de reprise du débit entrant et sortant du stock tampon  $B_{i,i+1}$  du sous-système  $L(i)$  après une interruption (causée par une défaillance, par exemple) doit être la même que celle correspondant au système original
- Le niveau moyen de stock dans le stock tampon  $B_{i,i+1}$  du sous-système  $L(i)$  doit être équivalent à celui du stock tampon  $B_{i,i+1}$  du système original

Ces hypothèses sont des approximations qui permettent de simplifier suffisamment le problème afin de pouvoir le résoudre. Dallery, David et Xie (1988) ont développé un algorithme (souvent appelé DDX) pour faciliter la résolution de ce problème. Choong et

Gershwin (1987) ont, pour leur part, généralisé une méthodologie pour des lignes de production ayant des temps d'exécution aléatoires plutôt que synchronisés. Gershwin a également développé un modèle où les machines ont différentes vitesses d'exécution. Enfin, Burman (1995) a suggéré un algorithme DDX amélioré, appelé ADDX (pour *Accelerated DDX*). Ce dernier algorithme est supposé être plus rapide et plus fiable que l'algorithme DDX original.

La seconde méthode largement répandue dans la littérature pour estimer la performance des lignes de production s'appelle la méthode d'agrégation. Avec cette méthode, plutôt que de décomposer la ligne de production originale en différents sous-systèmes de deux machines, la méthode d'agrégation remplace le premier sous-système de deux machines de la ligne de production en une machine équivalente. Cette procédure est reprise en boucle jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul système composé de deux machines qui peut être résolu de façon numérique. Cette méthode est plus souvent utilisée pour des modèles plus complexes comme ceux incluant des boucles de remises en fabrication ou dans des systèmes où il y a assemblage de pièces provenant de deux machines distinctes en amont, par exemple. Ainsi, plusieurs chercheurs ont développé cette technique pour des lignes de production continue. De Koster (1987) fait partie de ceux-là. Dallery et Gershwin (1992) ont dit à propos de cette méthode : « *Appliquer la méthode d'agrégation est équivalent à appliquer une seule étape de l'algorithme DDX. Aussi, il est facile de trouver des exemples pour lesquels la méthode d'agrégation n'est pas précise.* »

Les auteurs de la méthode d'agrégation ont répliqué avec une méthode améliorée et plus complexe. Chiang, Kuo et Meerkov (2000) ont utilisé une nouvelle technique d'agrégation où ils se servent des probabilités de blocage et de famine du goulot d'étranglement de la ligne de production. Ils s'appuient également sur le principe de conservation tel que stipulé dans la méthode de décomposition. Ainsi, ils considèrent que le premier sous-système de deux machines de la ligne, composé de  $M_1$  et  $M_2$  et du stock tampon  $B_{i,i+1}$  peut être remplacé par une machine équivalente  $M_2^a$  où :

- Le temps moyen de fonctionnement de  $M_2^a$  est égal au temps moyen que  $M_2$  est en fonctionnement et non en famine
- Le temps moyen d'arrêt de  $M_2^a$  est égal au temps moyen que  $M_2$  est en panne ou bloquée
- Le débit (ou vitesse d'exécution) de  $M_2^a$  est égal au débit de  $M_2$

La méthode d'agrégation se poursuit avec le sous-système composé de  $M_2^a$  et de  $M_3$  et ainsi de suite jusqu'à ce que l'agrégation soit complétée.

#### 2.1.4. Les modèles composés de machines parallèles

Jusqu'à maintenant, il a été discuté uniquement des lignes de production en série. C'est d'ailleurs la configuration la plus étudiée dans la littérature. Plusieurs autres configurations existent. Parmi celles-ci, on peut noter la configuration parallèle qui est représentée à la Figure 2.4 ci-dessous. Cette configuration se retrouve en usine où plusieurs machines effectuent la même opération à un moment précis du procédé. Lorsqu'utilisée pour la (ou

les) machine(s) goulot(s) d'une entreprise, cette configuration présente l'avantage d'augmenter le taux de production de l'ensemble de la ligne. La machine goulot est la machine la plus lente, la plus sollicitée et/ou la plus sujette à défaillir d'une ligne de production.

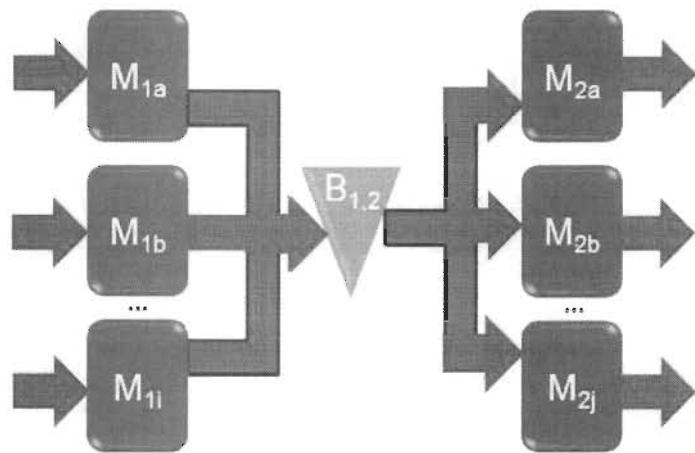


Figure 2.4 – Configuration parallèle

Ignall et Silver (1977) ont proposé un tel modèle dans lequel ils considèrent que les machines  $M_{1i}$  sont identiques. Ils ont adapté un modèle précédent présenté par Buzacott (1967b) dans lequel il détermine les limites lorsqu'il n'y a pas de stock tampon ou lorsque le stock tampon a une taille illimitée. Dans leur modèle, Ignall et Silver remplacent les différentes machines d'un sous-système donné par une machine équivalente dont la capacité est égale à la somme des capacités des machines individuelles. Cette approximation fonctionne aussi bien pour des modèles à états discrets et temps discret, à états discrets et temps continu que pour des modèles à états mixtes et temps continu.

Elsayed et Hwang (1984) ont été une étape plus loin en considérant un système composé de deux machines parallèles en amont du stock tampon et deux machines parallèles en aval du

stock tampon. Dans leur modèle, ils considèrent que les machines situées en amont ou en aval peuvent produire à la vitesse désirée. Ainsi, si par exemple, les deux machines situées en amont fonctionnent bien, elles peuvent produire à la moitié du taux de production désiré. Si, au contraire, l'une des machines tombe en panne, l'autre machine peut produire à la vitesse désirée. Ils ont également analysé une configuration où les machines peuvent être prêtes à prendre le relai d'une machine tombée en panne immédiatement ou après un certain délai seulement.

Ancelin et Semery (1987), Burman (1995) ainsi que Patchong et Willaeys (2001) ont tous utilisé une technique où les machines en parallèles peuvent être remplacées par une seule machine équivalente. Dans le cas d'Ancelin et Semery (1987), il s'agissait d'un modèle à états discrets. En ce qui concerne Burman (1995), il s'agissait plutôt d'un modèle où la production est continue. Patchong et Willaeys (2001) ont identifiés quelques cas dans le modèle de Ancelin et Semery (1987) où le TMR et la probabilité de défaillance des machines ne correspondaient pas à la réalité, en démontrant que le TMR de la machine équivalente d'un réseau de machines parallèles devrait augmenter à mesure que le taux de défaillance d'une machine de ce réseau augmente.

#### 2.1.5. Les configurations complexes

On regroupe l'ensemble des autres configurations sous le terme « configurations complexes ». Parmi celles-ci, il y a entre autres la configuration d'atelier monogamme hybride (représentée à la figure 2.5 ci-après), l'assemblage et le désassemblage (figure 2.6), des boucles de réparation des produits non-conformes et des lignes de production parallèles

(en opposition à des machines parallèles), pour ne nommer que celles-ci. Concernant les lignes de production parallèles, une seule étude a été recensée. Ce modèle, proposé par Li (2004b), se différencie substantiellement des modèles pour les machines parallèles. En effet, Li propose une méthode récursive qui permet de décomposer l'ensemble du système composé de lignes parallèles en différentes lignes de production individuelles. Pour y parvenir, il présume que l'ensemble des machines fonctionnent à une vitesse identique. Les probabilités de pannes et le TMR sont représentés par des lois exponentielles. Son approche suggère que des machines fictives soient introduites dans le système. Enfin, il utilise la méthode d'agrégation pour arriver à déterminer la performance du système.

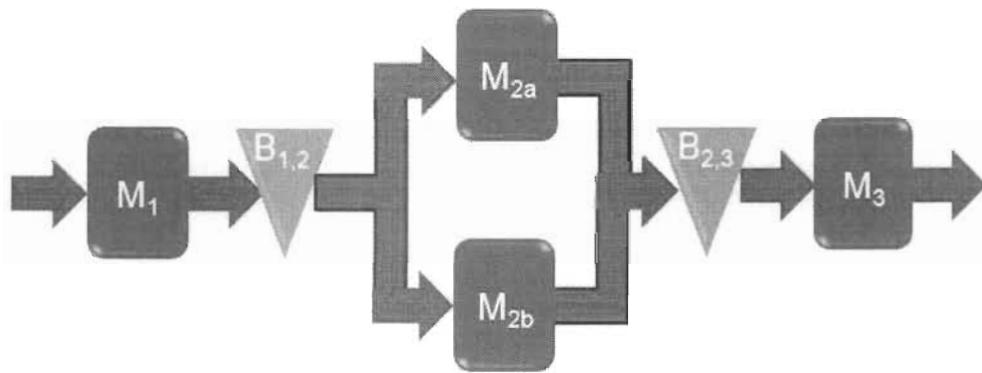


Figure 2.5 – Atelier monogamme hybride

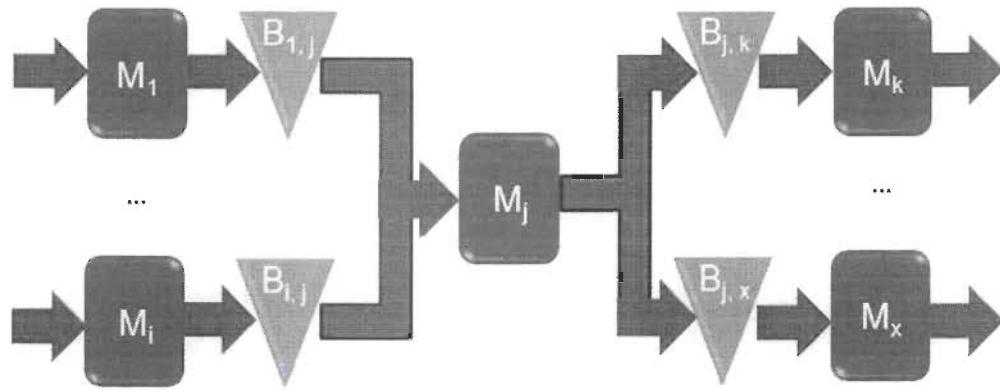


Figure 2.6 – Assemblage et désassemblage

Ce n'est que vers la décade 90 que les modèles d'assemblage et de désassemblage ont commencé à recevoir plus d'attention (Gershwin (1991); Gershwin (1991; Gershwin et Burman (2000); Helber (1998); Jeong et Kim (1998)). Le travail de Gershwin (1991) constitue une généralisation du modèle de décomposition tel que discuté précédemment. Cependant, le modèle qu'il propose est homogène et son algorithme ne semble pas être précis lorsque la taille des stocks tampons est importante. Jeong et Kim (1998) suggèrent deux algorithmes pour analyser la performance d'un modèle d'assemblage / désassemblage à états discrets et temps continu pour un modèle non homogène. Helber (1998) propose un modèle similaire où il utilise les méthodes DDX et ADDX. Il en conclue que la méthode ADDX est plus rapide et donne des résultats plus précis, même pour des stocks tampons de taille importante. Gershwin et Burman (2000), pour leur part, suggèrent une généralisation du travail de Gershwin (1991) pour une production continue dans un système non homogène. Pour y parvenir, ils utilisent une combinaison de l'algorithme Otero-DDX Gershwin (2002) et de l'ADDX qu'ils nomment l'algorithme A/D-DDX .

Quant aux boucles de remise en fabrication, elles sont souvent présentes dans l'industrie automobile. Ainsi, plutôt que de jeter les pièces défectueuses, une boucle de remise en fabrication sert à réintroduire ces pièces dans la ligne de production principale. Dans son travail, Helber (2000) fait un premier pas dans cette direction. Il considère le cas où certaines pièces ne sont pas réintroduites dans la ligne de production. Cela constitue une différence notable par rapport aux modèles où il y a désassemblage puisque, lors d'un désassemblage, une pièce se retrouve dans chacun des stocks tampons en aval. Dans le cas que Helber propose, un choix entre différents stocks tampons peut être fait. Son modèle est homogène. Helber et Jusic (2004) feront également un deuxième pas dans cette direction en s'attardant sur l'endroit, dans la chaîne de production, où les pièces défectueuses reviennent sur la ligne de production principale, après avoir été réparées. L'efficacité du système et le niveau des stocks tampons est déterminé sensiblement de la même façon que lors du premier travail de Helber en 2000.

Pour sa part, Li (2004a) a étudié les boucles de remise en fabrication en s'appuyant sur sa méthode qu'il a utilisée pour les lignes de production en parallèle. Qudeiri, Jamali et Yamamoto (2006) ont proposé une extension au modèle de Li afin de déterminer la taille optimale des stocks tampons d'un tel système en utilisant un algorithme génétique.

Un peu plus tard, Li (2005) est revenu à la charge avec une généralisation de sa méthode pour estimer l'efficacité des systèmes de production complexes formés à partir de n'importe laquelle des configurations discutées précédemment. De la même façon, Qudeiri,

Ramli, Yamamoto et al. (2007a) se sont servis du travail de Li pour déterminer la taille des stocks tampons optimale dans un tel système à partir d'un algorithme génétique.

## 2.2. Maintenance

### 2.2.1. Définition

La maintenance est définie comme suit par le GDT :

« Ensemble des opérations exécutées par un technicien spécialisé, dans le but de maintenir un système ou une partie du système dans un état de fonctionnement normal. Ces opérations comprennent non seulement l'entretien, mais aussi l'inspection périodique de l'équipement, le remplacement systématique d'organes ou de parties d'organes, l'installation de nouveaux matériels, leur mise en œuvre, la réparation et la remise en marche après les pannes. La maintenance exige des qualifications spéciales de la part des personnes qui l'assurent. »

Ainsi, alors qu'en anglais le mot *maintenance* comprend la maintenance et l'entretien, il s'agit de deux concepts bien différents dans la langue française, puisque l'entretien est l'une des tâches comprises dans la maintenance et ne requiert pas l'intervention d'un spécialiste, à l'opposé de la maintenance.

### 2.2.2. Types de maintenance

Il existe plusieurs types de maintenance. D'abord, il y a la maintenance corrective. Il s'agit de la maintenance qui est effectuée après la défaillance d'un système ou d'une partie d'un système dans le but de le remettre dans un état qui lui permet d'accomplir la fonction qui lui est affectée. Deuxième, on retrouve aussi la maintenance préventive. Il s'agit de la

maintenance qui est effectuée périodiquement dans le but d'assurer le bon fonctionnement et de dépister les éventuels problèmes d'un système, et des parties qui le composent, avant que ceux-ci n'entraînent la défaillance du système ou de ses parties. Enfin, la maintenance conditionnelle ou prédictive est un type de maintenance qui s'appuie sur des contrôles et/ou des mesures sur un système. Ces contrôles et/ou mesures permettent de détecter des défauts, d'analyser l'évolution de ces défauts et leur impact par rapport au système et d'intervenir au moment le plus opportun, soit avant que la défaillance du système n'arrive et en faisant en sorte que l'intervention gêne le moins possible la production. Cette maintenance est donc conditionnelle à l'état et/ou à l'usure. Par exemple, on pourra remplacer l'outil rotatif d'une fraiseuse si celui-ci atteint un certain niveau d'usure prédéfini.

### 2.2.3. Stratégies de maintenance

La stratégie de maintenance (ou politique de maintenance) est la stratégie mise en œuvre par une entreprise dans le but de :

- Maximiser la disponibilité d'un système;
- Réduire la fréquence des pannes;
- Réduire les coûts de maintenance.

Dans la littérature, les stratégies de maintenance sont divisées en deux grands groupes, celles pour les systèmes simples et celles pour les systèmes complexes, tel qu'illustré à la Figure 2.7. Les systèmes simples sont ceux qui se réduisent à un élément, ou à une machine, sans égard aux parties qui la compose. Par opposition, les systèmes complexes comprennent tous les autres systèmes, soient ceux qui contiennent plusieurs éléments en

série, en parallèle ou une combinaison de ces configurations. Si les pannes des éléments composant un système complexe sont considérées stochastiquement et économiquement indépendantes, alors on pourra utiliser une stratégie de maintenance liée aux systèmes simples, même s'il s'agit d'un système complexe. Dans le cas contraire, une stratégie opportuniste sera plus efficace. Jusqu'à récemment, les systèmes simples sont ceux qui ont reçu le plus d'attention dans la littérature. Voici, brièvement, une revue des principales stratégies de maintenance liées aux systèmes simples. La Figure 2.7 regroupe d'ailleurs les types de maintenance retrouvés dans la littérature pour des systèmes simples ou complexes. Il est à noter que les noms communs *élément*, *machine* et *composant* sont utilisés invariablement tout au long de cette section.

### **Remplacements de type âge**

La stratégie de remplacements de type âge, aussi appelée *age-replacement policy* ou ARP, est la stratégie la plus commune, la plus populaire et la plus simple trouvée dans la littérature. Selon cette stratégie, un élément est remplacé s'il atteint un âge  $T$  ou à la panne, selon celui qui arrive en premier. Il est à noter que  $T$  est une constante. De nombreuses variantes à cette stratégie existent. Par exemple, les actions de maintenance peuvent être des réparations minimales, des remplacements par du neuf, des remplacements par de l'usagé, etc. Une intervention de maintenance est dite minimale dans le cas où l'on remet l'élément défaillant dans l'état dans lequel il était tout juste avant la panne. Une intervention de maintenance peut être dite imparfaite dans le cas où l'intervention ne permet pas de maintenir ou d'améliorer l'état de la machine, mais, au contraire, la dégrade.

À titre d'exemple, on peut citer le cas où un technicien de maintenance remplace l'huile d'une machine par une autre huile qui ne lui convient pas. Par extension, la maintenance parfaite est l'opposé de la maintenance imparfaite.

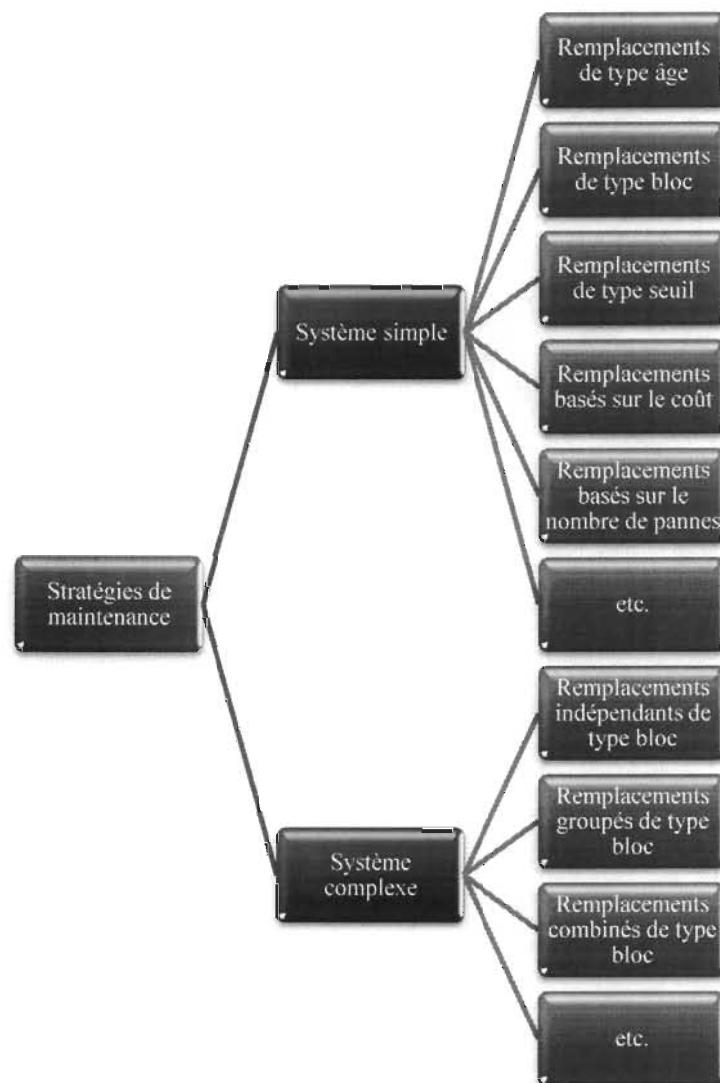


Figure 2.7 – Revue des principales stratégies de maintenance

### Remplacements de type bloc

La stratégie de remplacements de type bloc (*Block Replacement Policy* ou BRP) est la stratégie où un élément est remplacé préventivement à des intervalles  $kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) fixes dans le temps. En cas de panne, on effectue un remplacement correctif. La période  $T$  est considérée constante. Une stratégie équivalente existe pour les systèmes complexes (multi-composants). Cette stratégie offre l'avantage d'être très facile à utiliser sans gêner le plan de production. Cependant, elle présente le désavantage de forcer le remplacement préventif d'un composant même s'il vient tout juste d'être remplacé suite à une panne. Pour pallier cette lacune, une version adaptée a été développée. Cette version se nomme la stratégie de remplacements de type bloc modifiée (*Modified Block Replacement Policy* ou MBRP). Dans cette version modifiée, l'opération de maintenance préventive, planifiée pour  $, 2T, 3T, \dots$ , intervient seulement dans le cas où l'âge du composant est plus élevé qu'une certaine valeur de temps prédéfinie,  $b$ . Dans le cas où  $b = 0$ , la stratégie modifiée devient la même que la stratégie de base.

### Remplacements de type seuil

Pour la stratégie de remplacements de type seuil, le remplacement préventif a lieu lorsque l'usure, le taux de panne, le dommage accumulé ou tout autre seuil de tolérance a été atteint. Le remplacement correctif a également lieu à la panne. Pour cette stratégie, la stratégie de remplacement de type âge est un cas spécial où le seuil de tolérance est l'âge du composant.

### **Remplacements basés sur le coût**

Dans le cadre de cette politique de maintenance, un composant est réparé si le coût estimé est inférieur à un seuil. Dans le cas contraire, il est remplacé par du neuf. Le principal désavantage de cette stratégie tient du fait que, considérant un seuil financier lié à la réparation unitaire, un composant peut se voir réparer plusieurs fois en très peu de temps si, à chaque fois, le coût unitaire de réparation était inférieur au seuil, alors qu'il aurait été plus rentable de remplacer le composant en tenant compte des coûts à long terme. Certains auteurs ont toutefois trouvé des alternatives à ce désavantage. Par ailleurs, une variante de cette politique existe où le choix du remplacement par un composant neuf est basé sur le temps. Ainsi, si la réparation ne peut avoir lieu à l'intérieur d'un laps de temps déterminé, le composant est remplacé par un neuf.

### **Remplacements basés sur le nombre de pannes**

Dans le cadre de cette politique de maintenance, un remplacement par du neuf a lieu à la  $k^{\text{ième}}$  panne. Toutes les pannes précédentes entraînent une réparation minimale. Une variante de cette politique introduit un seuil de temps  $T$ . Si une  $k^{\text{ième}}$  panne survient avant un temps d'opération cumulé minimal  $T$ , le composant subira une réparation minimale et sera remplacé par un neuf à la prochaine panne. Si la  $k^{\text{ième}}$  panne survient après le temps  $T$ , le composant est alors remplacé par un neuf. Pour cette variante, si  $T = 0$ , on se retrouve en présence de la politique basée sur le nombre de pannes.

## **Remplacements indépendants de type bloc**

La politique de remplacements indépendants de type bloc (RIB) est la première politique de maintenance basée sur les systèmes multi-composants abordée dans ce chapitre. Cette politique est directement calquée sur la stratégie de maintenance BRP, à l'exception que chaque composant a sa propre périodicité de maintenance préventive  $T_i$ , où  $i$  est le numéro du composant. Ainsi, la maintenance préventive du composant  $i$  est effectuée aux instants  $kT_i$  ( $k = 1, 2, \dots$ ).

## **Remplacements groupés de type bloc**

Cette stratégie de remplacements groupés de type bloc (RGB), tout comme la prochaine et dernière stratégie présentée dans le cadre de ce mémoire, est opportuniste. Une stratégie opportuniste est une stratégie utilisée dans le cas où il y a lieu de croire qu'il est possible de réaliser un gain d'échelle, soit parce qu'il y a une dépendance stochastique, soit parce qu'il y a une dépendance économique. Par exemple, si, lorsqu'un composante A tombe en panne, les probabilités qu'une composante B tombe en panne double, alors il peut être intéressant de remplacer préventivement les composants A et B en même temps. De la même façon, si, lorsqu'une machine A tombe en panne, la ligne de production sur laquelle se trouve cette machine se retrouve arrêtée complètement, chercher à effectuer de la maintenance préventive sur les autres machines de la ligne de production peut permettre un gain important au niveau des coûts, conditionnellement à ce que les coûts de maintenance préventive soient moins élevés que les coûts de maintenance corrective, ce qui est généralement le cas. Donc, dans le cadre de cette stratégie de maintenance, on cherche à

remplacer préventivement tous les composants aux instants  $kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) et à remplacer seulement le composant défaillant lorsque celui-ci tombe en panne.

### **Remplacements combinés de type bloc**

La politique de remplacements combinés de type bloc (RCB) est la deuxième stratégie opportuniste présentée dans le cadre de cette recherche. Cette politique vise à remplacer de façon préventive tous les composants aux instants  $kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), mais également à remplacer tous les composants, même lorsqu'un seul de ceux-ci est défaillant.

### **2.3. Simulation**

Le Grand Dictionnaire terminologique définit la simulation comme la « représentation d'un système ou d'un procédé par un modèle obéissant aux mêmes lois que les phénomènes que l'on veut étudier et qui est ensuite soumis aux phénomènes que l'on veut décrire ». Un modèle analytique y est plutôt défini comme « l'analyse de données procédant de façon deductive, à partir de principes fondés sur l'expérience et l'observation précise, et favorisant l'aide à la décision ».

Un modèle de simulation sert donc à aller chercher une meilleure compréhension d'un système, en l'occurrence une usine, en permettant de mesurer la performance d'un système dans des conditions précises, conditionnellement à ce que le dit modèle obéit aux mêmes lois que la usine étudiée ne le fait. Certes, le modèle analytique sera plus précis. Les modèles analytiques sont aussi moins longs à développer, contrairement aux modèles de simulation. Cependant, pour traiter de problèmes larges et complexes, son utilisation est

plus restreinte. Plusieurs logiciels existent sur le marché et permettent de développer des modèles de simulation. On peut entre autres mentionner Arena Simulation, ProModel, , Simio, Simul8, Witness, Automod, Anylogic et Flexsim qui comptent parmi les plus utilisés.

## 2.4. Optimisation

L'optimisation est définie comme la « recherche de la solution qui permet de générer le meilleur résultat pour toute l'organisation parmi les solutions possibles d'un problème, compte tenu des contraintes ou des critères que l'on s'est fixés<sup>1</sup> ». Ainsi, si le modèle de simulation permet de reproduire le système étudié, en lui fournissant divers jeux de paramètres correspondant chacun à une solution possible, on peut parvenir à obtenir une ou plusieurs solutions qui s'avèrent être aussi près d'une solution optimale que possible. C'est précisément le rôle du module d'optimisation. Il communique avec le modèle de simulation afin de comparer diverses solutions. Cependant, dans le cas où le nombre de solutions possibles est très grand, on doit recourir à un algorithme d'optimisation qui va permettre de converger plus rapidement vers la ou les solutions optimales.

Il existe plusieurs algorithmes d'optimisation. Notons l'algorithme génétique, la colonie de fourmis et la méthode « Scatter Search » qui sont basés sur des populations ainsi que le recuit simulé et la recherche tabou qui sont plutôt basés sur de solutions uniques. Tous ces algorithmes font partie des métaheuristiques, c'est-à-dire des algorithmes d'optimisation

---

<sup>1</sup> Le Grand Dictionnaire terminologique, [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com), 2008.

dont la solution retenue ne sera pas nécessairement optimale, mais possiblement quasi-optimale, en opposition à des algorithmes exacts comme le *Branch and Bound* ou la programmation dynamique. La Figure 2.8 illustre un classement de ces algorithmes. OptQuest est un exemple de logiciel d'optimisation qui peut être utilisé en combinaison avec différents logiciels de simulation, que ce soit Arena Simulation, ProModel ou FlexSim. Le logiciel OptQuest est basé sur la combinaison de deux algorithmes métahéuristiques, soient la recherche taboue ainsi que la méthode « Scatter Search ». Dans ce logiciel, la recherche taboue est utilisée comme mémoire du module d'optimisation en empêchant de réévaluer des solutions déjà évaluées et en jaugeant la diversification ainsi que l'intensification des recherches. La méthode « Scatter Search », pour sa part, ressemble beaucoup à l'algorithme génétique. Elle est basée sur une population, produit de nouveaux éléments à partir d'une combinaison des éléments existants, mais, contrairement à l'algorithme génétique, cette combinaison n'est pas le fruit du hasard. Elle s'appuie plutôt sur une stratégie probabiliste tenant compte de l'historique des résultats obtenus.

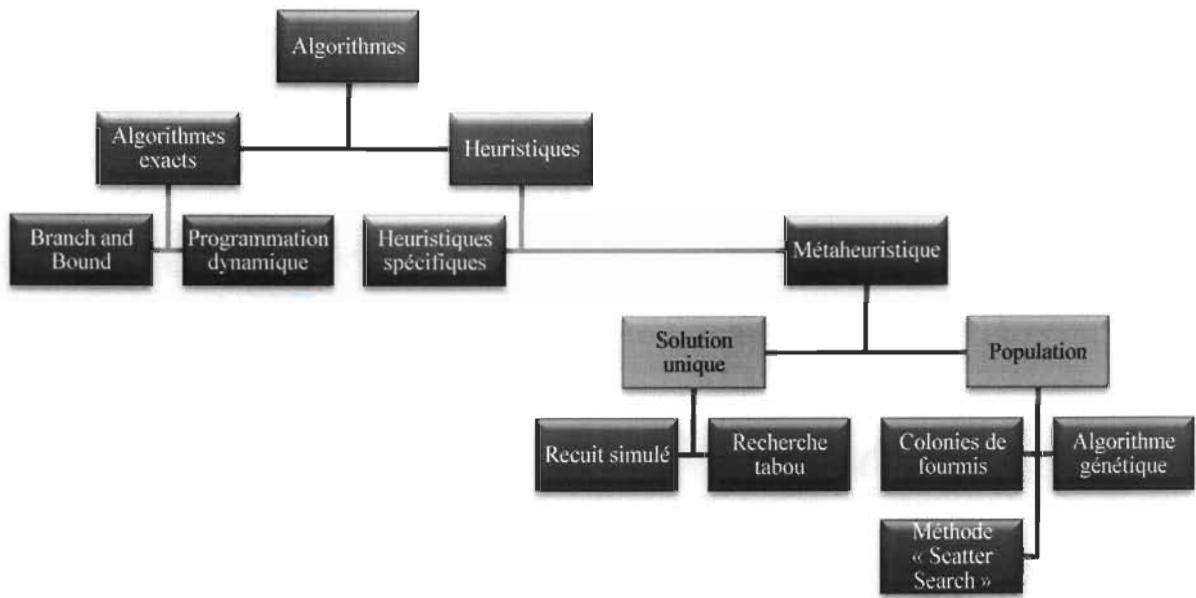


Figure 2.8 – Classement de quelques algorithmes d’optimisation

## 2.5. Outil d'aide à la décision versus la littérature

Si plusieurs travaux portent sur le sujet dans la littérature, il en existe très peu portant précisément sur le couplage de la simulation et de l'optimisation pour une planification intégrée de la production et de la maintenance des systèmes de production flexibles comme outil d'aide à la décision. Plusieurs modèles analytiques ont été développés au cours des dernières décennies. D'ailleurs, il en est largement fait mention dans notre article publié récemment Bergeron, Jamali et al. (2010). Cependant, aucun modèle n'a été répertorié dans la littérature où un outil d'aide à la décision complet était proposé. Certes, les travaux de Qudeiri, Ramli et al. (2007a) abondent dans ce sens. Par contre, la principale limite de ce modèle réside dans le fait qu'il n'est utilisable que dans un système homogène. De plus, on

ne cherche pas, dans ce modèle, à trouver la périodicité optimale de la préventive pour maintenir les machines en bon état, ce qui pourrait permettre de limiter la taille des stocks tampons. Enfin, il ne permet pas à tous les utilisateurs issus du milieu manufacturier et qui ne sont pas en lien avec le milieu de la recherche de l'utiliser facilement. Cette recherche n'a pas la prétention de le faire, mais propose néanmoins une exploration dans cette direction, de telle sorte qu'une interface utilisateur puisse éventuellement s'y greffer. Ainsi, un utilisateur n'aurait qu'à entrer les différents paramètres du système qu'il veut simuler et optimiser (nombre de machines, configurations, lois de distribution pour le temps de production, les pannes, le temps de maintenance préventive ou corrective, etc.), afin de pouvoir obtenir un plan intégré de production et de maintenance qui soit robuste, de même que la taille optimale des stocks tampons entre chacune des machines de la ligne de production. Un tel outil d'aide à la décision serait également flexible. L'utilisateur pourrait avoir le choix entre différentes stratégies de maintenance (ex. RIB, RGB ou RCB).

En ce sens, à notre connaissance, aucun article répertorié dans la littérature n'a présenté une telle approche. Cette recherche s'inscrit donc dans cette optique, et vise à combler ce vide laissé par les autres chercheurs de ce domaine.

## CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre couvre la démarche utilisée pour développer l'outil d'aide à la décision. Ainsi, dans un premier temps, on y discutera de la construction du modèle. Par la suite, tour à tour, il sera discuté du choix de la simulation et de l'optimisation comme instruments pour le développement de l'outil d'aide à la décision, du choix des logiciels, des ordinogrammes, de la construction du modèle, de la validation et de la vérification. Enfin, l'analyse des résultats sera présentée.

### **3.1. Conception du modèle**

Concrètement, ce que cette recherche vise, c'est de faire une preuve de concept d'un outil permettant d'aider les gens issus du milieu manufacturier à prendre de meilleures décisions en termes de :

- Planification de la production; soit identifier à quel moment fabriquer des produits donnés afin de respecter les délais de livraison pour une demande établie pour ces produits de telle sorte que l'on minimise les coûts de production
- Planification de la maintenance; soit identifier à quel moment effectuer la maintenance préventive – moins onéreuse que la maintenance corrective – de telle sorte que :
  - l'on diminue le nombre de pannes qui nuisent à l'échéancier de production;

- l'on minimise les coûts de maintenance, les retards de livraison (pour cause de machines en panne) et les coûts qui y sont associés
- Dimensionnement de la taille des stocks tampons; soit identifier la taille des stocks tampons qui permettent de limiter les ruptures de production lors d'une panne sans pour autant faire du surstock et augmenter les coûts qui y sont associés
- Choix de la meilleure stratégie de maintenance à adopter; soit identifier la meilleure stratégie de maintenance qui permet de diminuer l'impact des pannes sur la production et qui permet, du même coup, de minimiser les coûts associés à la maintenance et à la production
- Quantité de techniciens de maintenance requis; soit identifier le bon nombre de techniciens afin de réussir à maintenir l'équipement et à corriger les pannes tout en minimisant les coûts de maintenance

La portée de cette recherche se limite au quatre premiers points ci-haut mentionnés.

Par ailleurs, le concept proposé s'appuie sur une combinaison des travaux de Qudeiri, Ramli et al. (2007a) et d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007). Ainsi, on se sert de la simulation pour créer des lignes de production types (de deux machines, puis quatre machines). Et puis, comme dans le cadre des travaux de Qudeiri, Ramli et al. (2007a), on se sert de l'optimisation pour déterminer la taille optimale des stocks tampons, entre autres. Le module d'optimisation est également utile pour aider l'utilisateur de l'outil à planifier sa production tout en tenant compte du plan de maintenance.

D'un autre côté, les travaux d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007) servent de base en ce qui concerne le plan de production et de maintenance. En effet, une généralisation de ces travaux permet d'appliquer leur approche à une ligne de production comportant plusieurs machines. Les détails concernant la conception du modèle seront abordés lors du chapitre suivant.

### **3.2. Choix de la simulation et de l'optimisation**

Le choix du couplage de la simulation et de l'optimisation est favorisé à la modélisation analytique comme instrument pour développer l'outil d'aide à la décision. Ce choix est motivé par le fait que le couplage de la simulation et de l'optimisation :

- permet de voir facilement l'impact d'éléments critiques en chaîne;
- rend facile l'ajustement des différents paramètres pour répondre à des besoins réels en industrie (lois de distribution, nombre de machines, etc.)
- favorise l'ajout d'extensions futures (personnel de maintenance limité, maintenance imparfaite, interface utilisateur, etc.)

Effectivement, d'une part, il est possible de voir, sur un modèle combinant la simulation et l'optimisation, l'impact sur les délais de production de, par exemple, plusieurs pannes survenant successivement dans un intervalle de temps. Cet impact est moins facile à obtenir avec un modèle analytique. D'autre part, le recours au couplage simulation/optimisation est privilégié par rapport à un modèle analytique, puisqu'il y sera plus facile d'y analyser un système manufacturier complexe dans lequel on considérerait, par exemple, un personnel

de maintenance limité ou l'intégration de la qualité à la production et à la maintenance. Par intégration de la qualité, on entend ajouter celle-ci au présent modèle. Le modèle résultant serait donc un modèle intégrant les trois piliers retrouvés en milieu manufacturier, soient la production, la maintenance et la qualité. Ces trois éléments sont interreliés. L'ajout de la qualité permettrait ainsi de renseigner sur l'état d'une machine, par exemple. Ainsi, une machine dont le taux de rejets (mauvaise qualité) croît de façon importante constituerait une machine défaillante ou sur le point de défaillir. Un tel événement aurait un impact à la fois sur la production et la maintenance.

En contrepartie, un modèle combinant la simulation et l'optimisation peut nécessiter un certain temps à développer, surtout si le modèle est volumineux. Le recours à des processeurs informatiques plus puissants, la mise en œuvre de bonnes pratiques pour alléger le modèle de simulation et la programmation d'un algorithme d'optimisation spécifique à la problématique étudiée sont autant de solutions pour limiter l'impact de cet inconvénient.

### **3.3. Choix des logiciels**

Pour la simulation, le choix s'est porté sur le logiciel Arena Simulation de l'éditeur Rockwell Automation pour effectuer le travail. Bien que d'autres logiciels auraient pu être choisis, ce dernier a été préféré parce qu'il est polyvalent, facile à utiliser, présente les bonnes fonctionnalités pour développer notre outil d'aide à la décision. Parmi ces avantages, notons sa capacité d'interfaçage avec d'autres logiciels. Ce dernier avantage est primordial si l'on souhaite pousser le concept plus loin avec l'ajout d'une interface utilisateur. Dans le

même ordre d'idées, le choix du logiciel d'optimisation s'est porté sur OptQuest parce qu'il est déjà intégré à Arena Simulation et qu'il est facile d'utilisation.

Pour la construction du modèle de simulation, des ordinogrammes sont développés avant d'utiliser le logiciel Arena afin de simplifier au maximum le modèle, le rendant ainsi plus léger. Ces ordinogrammes, pouvant aussi être appelés logigrammes, seront détaillés dans le chapitre suivant.

### **3.4. Construction du modèle de simulation**

À partir des ordinogrammes, l'étape suivante consiste à construire le modèle de simulation, puis à associer les variables de contrôle et les réponses au module d'optimisation. Ces variables de contrôle sont les matrices de :

- Périodicité de maintenance préventive pour chacune des machines (ou l'ensemble des machines, selon la stratégie de maintenance utilisée);
- Taille des stocks tampons situés entre chaque paire de machines;
- Plan de production tenant compte des deux autres variables.

Ces variables de contrôle constituent la base du modèle. À partir du module d'optimisation, il est possible d'évaluer rapidement la performance de diverses valeurs de ces variables de contrôle, afin de retenir une solution meilleure que les autres. Cette mesure de la performance est effectuée à partir de la somme des coûts de production, des coûts de maintenance et des coûts liés à la taille des stocks tampons. Le détail de ces coûts sera donné au chapitre suivant.

### 3.4.1. Hypothèses du modèle

La construction du modèle de simulation repose inévitablement sur un certain nombre d'hypothèses. Dans le modèle étudié, les machines sont reconnues avoir trois états : en fonctionnement (production), en panne ou en attente. Ces machines placées dans une ligne de production de type atelier monogamme sont assujetties à des défaillances aléatoires selon une loi de distribution connue et basée sur l'historique de pannes de ces machines. N'importe quelle distribution de pannes peut être utilisée lors de la modélisation. Dans le cadre de cette recherche, une loi gamma est cependant retenue afin de faciliter la validation de notre modèle de simulation.

Aussi, les pannes d'une machine surviennent en fonction du temps (*time-dependant failures*) et non en fonction de l'utilisation de cette machine (*operation-dependant failures*). Ce choix a été fait puisque nous estimons qu'il serait plus facile pour un utilisateur provenant du milieu manufacturier de déterminer la probabilité de défaillance des machines de son entreprise en se basant sur l'historique de pannes qu'en se basant sur l'utilisation des machines.

Par ailleurs, les pannes sont considérées indépendantes entre elles et détectables immédiatement. De plus, les activités de maintenance préventives et correctives sont considérées parfaites et le personnel de maintenance est considéré illimité. On considère illimité le personnel de maintenance puisque, en pratique, le personnel de maintenance d'une entreprise est souvent affecté à différentes tâches de soutien à la production (entretien, modifications de l'équipement, réparations qui n'ont pas d'impact immédiat sur la

production en cours, etc.) et fait d'une panne de machines sa priorité. La probabilité que deux ou même trois pannes ne surviennent en même temps est faible et, même lorsque cela arrive, on trouve généralement le moyen de répartir les différents effectifs de maintenance pour répondre aux deux ou trois pannes qui sont survenues. Cette affirmation nous amène à considérer cette approximation comme étant juste.

Dans un autre ordre d'idées, le temps et le coût d'une action de maintenance corrective sont considérés supérieurs au temps et au coût d'une action de maintenance préventive. Alors que les coûts sont considérés fixes, les temps des actions de maintenance sont déterminés à l'avance.

Par ailleurs, on considère que la qualité de production est parfaite (pas de produits défectueux). La production s'effectue par flux tiré. Cette production répond donc à une demande qui est considérée connue. Cette dernière hypothèse n'est pas si restrictive compte tenu du fait que dans bien des entreprises manufacturières, la production répond à divers P.O. (ou *Purchase Orders*) et donc, à une demande connue pour une période donnée.

Dans le modèle de simulation à plusieurs machines, une machine peut être mise en attente, soit parce qu'il n'y a pas de pièces dans le stock tampon situé en amont de cette machine ou, soit parce qu'il n'y a pas de production prévue dans le plan de production. Une machine peut également être mise en attente parce qu'elle est bloquée. Une machine sera bloquée si le stock tampon en aval de cette machine est plein. Il est à noter que la dernière machine ne peut être bloquée. Enfin, les pièces fabriquées sont considérées semblables. Ainsi, des pièces de type A et des pièces de type B, par exemple, vont partager le même espace

tampon entre deux machines. Si un stock tampon est limité à cinq pièces au maximum, cette quantité correspond donc au nombre de pièces de type A plus le nombre de pièces de type B (plus le nombre de pièces de type C, le cas échéant) qu'il est possible d'accueillir en même temps.

Dans un autre ordre d'idées, pour le modèle de simulation à plusieurs machines en série, on considère une variabilité de ce temps de cycle basé sur une loi normale. Cette distribution a été choisie parce qu'elle représente bien ce qui peut être retrouvé en industrie. Le temps de mise en course lors d'un changement de production d'une pièce de type A vers une pièce de type B, ou inversement, est considéré négligeable, mais un coût fixe lui est tout de même attribué.

### **3.5. Validation**

Suite à la construction du modèle de simulation, il vient ensuite l'étape de la validation. Cette étape sert à s'assurer que le modèle fonctionne bien, c'est-à-dire que le modèle produit des résultats qui sont cohérents. Dans le cas contraire, on retourne à l'étape précédente, voire à l'étape de la construction des ordinogrammes afin d'apporter les modifications nécessaires qui s'imposent.

### **3.6. Vérification**

Le modèle peut produire des résultats cohérents, mais ces résultats ne sont pas nécessairement représentatifs de la réalité. Dans le cadre de cette recherche, la vérification sera faite à partir de résultats présents dans la littérature scientifique.

### 3.7. Production de résultats

Une fois le modèle de simulation validé et vérifié, l'étape suivante consiste à intégrer l'optimisation. Le module d'optimisation OptQuest fournit une solution initiale combinant les trois matrices de périodicité de la maintenance préventive  $[T_i]$ , de taille des stocks tampons  $[B_i]$  et de plan de production  $[PP]$ , au module de simulation Arena. Cette solution est évaluée par le module de simulation qui retourne le résultat (somme des coûts de production et des coûts de maintenance) au module d'optimisation. Cette « communication » entre les modules de simulation et d'optimisation s'effectue par elle-même sans que nous n'ayons à intervenir. Il s'agit d'identifier dans le module d'optimisation quelles sont les variables de contrôle, quelle est la réponse (somme des coûts), quelle est la fonction à minimiser (somme des coûts) et à quelles contraintes est soumis le modèle (les contraintes seront présentées au prochain chapitre). La Figure 3.1 illustre quelle information est échangée entre le module de simulation et le module d'optimisation.

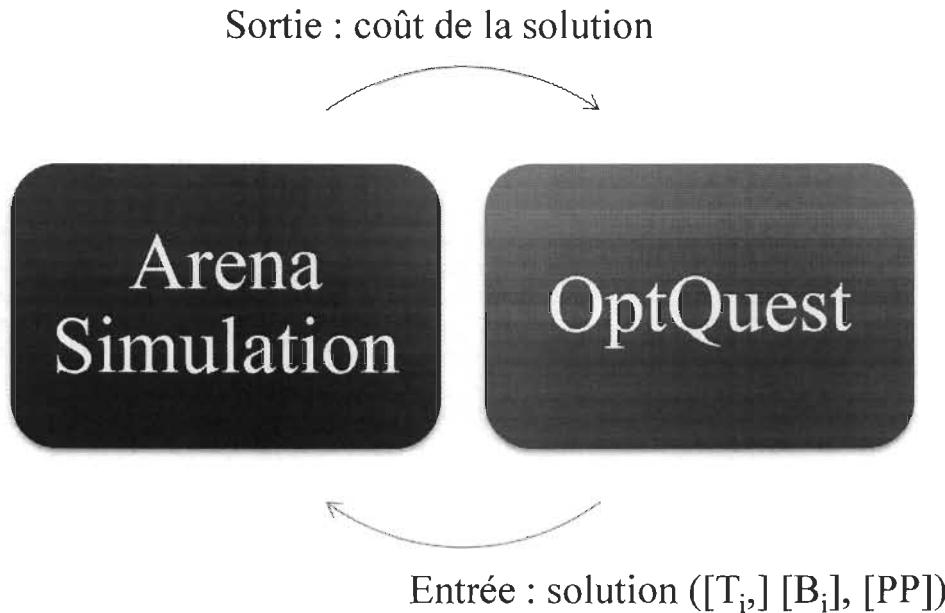


Figure 3.1 – Échange d’information entre le module de simulation et le module d’optimisation

### 3.7.1. L’optimisation

Le module d’optimisation, basé sur l’algorithme Scatter Search (SS), ainsi que sur la recherche taboue, cherche à proposer des solutions toujours meilleures, jusqu’à ce que l’on obtienne une solution optimale ou quasi-optimale. Ce module requiert une solution initiale pour fonctionner. Certes, cette solution initiale pourrait être sélectionnée aléatoirement. Toutefois, afin de réduire l’espace de recherche et, conséquemment, le temps d’optimisation, on cherchera à déterminer une solution initiale qui soit le plus près possible de la solution optimale. Pour y parvenir, on procède par phases. On cherchera d’abord à déterminer la matrice de la périodicité optimale de la maintenance préventive qui permette de réduire les coûts de maintenance (phase 1). À partir de la valeur obtenue, on cherchera ensuite à déterminer la matrice de la taille optimale des stocks tampons (phase 2). Ces deux

premières matrices constituent la solution initiale pour la détermination de la matrice de plan de production optimal (phase 3). Une fois ces trois « matrices optimales » en main, il est désormais possible de former une solution initiale (phase 4). À partir de cette solution initiale, on cherche à la fois à améliorer les trois matrices obtenues afin d'avoir une solution finale qui soit supérieure à toutes les solutions obtenues précédemment.

Afin de valider la robustesse de cette procédure, on pourra comparer la solution finale obtenue précédemment avec celle obtenue à partir d'une solution initiale déterminée aléatoirement. Si cette dernière méthode produit des résultats supérieurs ou, qu'encore, que ces résultats sont obtenus plus rapidement dans la majorité des cas, on conclura que cette procédure n'est pas convenable. La figure 3.2 illustre cette procédure. Chacune des phases, représentées par les nombres 1 à 4, constitue un ensemble « solution – coût de la solution » tel qu'illustré à la figure 3.1.

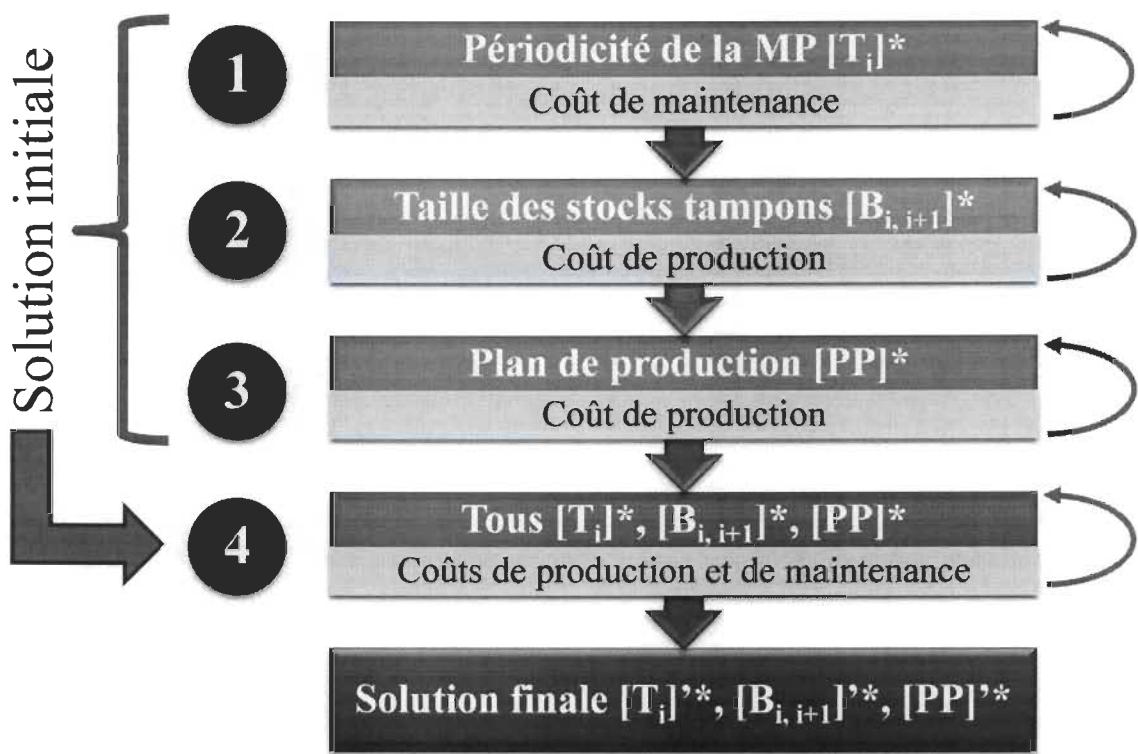


Figure 3.2 – Procédure pour la détermination de la solution initiale

### 3.7.2. Nombre de simulations et de réplications

Afin d'obtenir un bon équilibre entre la durée d'une simulation et la fiabilité des résultats obtenus, un nombre de trois réplications par simulation a été considéré. La longueur d'une réplication est déterminée de telle sorte que, sur un ensemble de 20 réplications, l'ensemble des résultats obtenus sont à l'intérieur d'une marge de 2 %. Le nombre de simulations est fixé par le module d'optimisation : s'il n'y a aucune amélioration du résultat pendant 100 simulations consécutives, le processus est arrêté. Sur les 25 meilleures solutions, on effectue alors 7 réplications supplémentaires pour chacune de ces solutions, de telle sorte

que l'on ait 10 réPLICATIONS pour chacune des 25 meilleures solutions. La solution devenue la meilleure suite à ce processus est alors considérée comme la solution la plus près de la solution optimale correspondant au cas donné.

### **3.8. Analyse des résultats**

L'analyse des résultats constitue la dernière étape de la méthodologie. Elle consiste à s'assurer que la solution obtenue est plausible. Pour ce faire, on compare les résultats obtenus (en termes de coûts de production, de coûts de maintenance et de coûts liés à la taille des stocks tampons) avec un estimé. Une discussion suit afin d'expliquer les résultats obtenus.

### **3.9. Conclusion**

En somme, cette méthodologie vise à obtenir des résultats qui sont plausibles, utilisables et que l'on puisse répéter. On peut la résumer comme suit :

Paramètres de la recherche :

- Demande connue sur un horizon donné
- Nombre donné de machines organisées en atelier monogamme
- Caractéristiques des machines connues (temps d'exécution, pannes, etc.)
- Durée des maintenances préventives et correctives connues
- Stratégies de maintenances connues

Variables de contrôle :

- Périodicité de la maintenance préventive
- Plan de production
- Taille des stocks tampons

Mesure de la performance :

- Coût total de la production (incluant les pénalités pour les retards et le coût lié aux stocks tampons) et de la maintenance

Le chapitre suivant présente le modèle à une machine en détails, puis on cherchera à le généraliser dans le cas de plusieurs machines.

## CHAPITRE 4 : MODÈLE À UNE MACHINE ET GÉNÉRALISATION

Le modèle présenté dans le cadre de ce mémoire est un modèle de système manufacturier multi-produits où le plan de production tient compte de la maintenance préventive et corrective. Ainsi, chaque machine du système est assujettie à des défaillances aléatoires selon une loi de distribution donnée. Dans un cas réel, ces distributions pourraient être déterminées à partir de l'historique de pannes de ces machines. Lorsqu'une défaillance survient, une activité de réparation minimale est effectuée. Une activité de maintenance préventive sur une machine entraîne le renouvellement de cette machine. Chaque activité de maintenance, préventive ou corrective, est effectuée à un coût fixe. Le coût imposé pour une activité de maintenance corrective est plus élevé que pour une activité de maintenance préventive. De plus, à la fin de chaque période de l'horizon de planification prévu, un coût d'entreposage est appliqué sur les stocks en présence à ce moment dans le système. La demande est connue en avance pour chaque type de produits. Un coût fixe de mise en course est imposé à chaque changement de lot. La taille des lots est déterminée au moment de l'élaboration du plan de production. Afin de minimiser le nombre de produits livrés en retard, un coût de pénalité élevé est attribué lorsque cet événement survient.

Le modèle proposé est développé avec le logiciel Arena Simulation. Le logiciel OptQuest sert de module d'optimisation. Une solution sera considérée optimale si elle permet de :

- obtenir la périodicité optimale de maintenance préventive de chaque machine;
- donner la taille optimale de chaque stock tampon du système;
- procurer à l'usager de l'outil d'aide à la décision le plan de production optimal permettant de faire fonctionner le système à un coût de production, de maintenance et de taille de stocks tampons minimal.

#### **4.1. Le modèle à une machine fiable**

Le modèle de base s'appuie sur le modèle proposé par Aghezzaf, Jamali et al. (2007), c'est-à-dire qu'il contient une seule machine ( $M_1$ ) et deux types de produits (A et B). Le modèle pourrait en comprendre beaucoup plus sans problème, mais, pour des fins de validation, tel qu'expliqué dans notre méthodologie, seulement deux produits ont été illustrés dans ce cas-ci.

À la différence du modèle d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007), l'horizon de planification ( $H$ ) considéré ne se limite pas à un cycle de 8 périodes ( $\tau$ ) de durées égales, mais compte plutôt 625 cycles (ou 5000 périodes) de telle sorte qu'il soit possible d'obtenir des coûts de production et de maintenance qui soient basés sur une moyenne par cycle. Ce nombre a été retenu parce qu'il a permis d'obtenir des résultats reproductibles à l'intérieur d'une marge d'erreur de 2 %.

À chaque période de base  $\tau$ , une demande prédéfinie  $d_{it}$  doit être satisfaite. Le système de production a une capacité nominale fixe égale à  $C_{max}$  pour chacune des machines à chaque période et chaque activité de maintenance, préventive ou corrective, gruge une partie de

cette capacité. Dans le cas présent où l'on considère seulement une machine,  $C_{max}$  est fixé à 15, ce qui signifie qu'il que  $\tau/15$  unités de temps sont disponibles pour produire une unité. Le tableau 4.1 présente le coût de mise en course, le coût de production, le coût d'entreposage ainsi que le coût de retard pour chaque type de produit.

Type de produit	Coût de mise en course	Coût de production (coût unitaire)	Coût d'entreposage (coût unitaire / période)	Pénalité pour retard (coût unitaire / période)
A et B	25	5	2	100

Tableau 4.1 – Coûts pour chaque type de produits

Hormis la pénalité pour les retards, ces coûts sont exactement les mêmes que ceux présentés dans l'article d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007), ceci étant pour faciliter la validation de notre modèle. La pénalité pour les retards est un coût induit afin de forcer le module d'optimisation à minimiser les retards autant que possible. La notion de retard n'était pas considérée dans Aghezzaf, Jamali et al. (2007). Une opération de mise en course est effectuée initialement ainsi qu'avant chaque lot.

De même, en ce qui concerne la demande pour les produits A et B à chacune des périodes d'un cycle, les données utilisées sont les mêmes que celles retrouvées dans l'article cité précédemment, tel qu'illustré au Tableau 4.2.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8
Demande pour le produit A	2	3	2	3	2	3	2	3
Demande pour le produit B	3	2	3	2	3	2	3	2

Tableau 4.2 – Demande périodique pour les produits A et B

Les différents paramètres du modèle sont :

$f_{it}$	Coût fixe de mise en course pour produire le produit $i$ à la période $t$
$p_{it}$	Coût variable pour produire une unité du produit $i$ à la période $t$
$h_{it}$	Coût variable pour entreposer une unité du produit $i$ à la fin de la période $t$
$w_{it}$	Coût variable de retarder une unité du produit $i$ à la fin de la période $t$
$\tau$	Durée de chaque période de base
$N$	Nombre de périodes de longueur fixe $\tau$ dans un cycle $S$
$s$	Nombre de cycles de longueur fixe $S$ sur l'horizon donné $H$
$b$	Coût fixe d'allocation d'une unité d'espace tampon dans un stock tampon
$c_p$	Coût de chaque activité de maintenance préventive
$c_r$	Coût de chaque activité de maintenance corrective ( $c_p \leq c_r$ )
$L_p$	Capacité de la machine consommée durant une activité de maintenance préventive
$L_r$	Capacité de la machine consommée durant une activité de maintenance corrective
$C_m(t)$	Fonction définissant la capacité disponible à la période $t$
$C_{max}$	Capacité maximale de production pour chaque période de base $\tau$
$M$	Nombre de machines
$H$	Horizon (égale $sN\tau$ )
$P$	Nombre de produits (A est le produit $i = 1$ , B le produit $i = 2, \dots$ )

et les variables du modèle sont :

- $y_{it}$  Variable binaire ( $y_{it}$  égale 1 si une unité du produit  $i$  est fabriquée après une unité de n'importe quelle autre produit  $i$  au cours de la période  $t$ ,  $y_{it}$  égale 0 autrement)
- $x_{it}$  Quantité du produit  $i$  fabriquée à la période  $t$
- $I_{it}$  Stock du produit  $i$  à la fin de la période  $t$
- $z_{it}$  Quantité du produit  $i$  en retard à la fin de la période  $t$  (soit la quantité de produits non livrés à l'intérieur des délais prévus par la demande pour chacune des périodes)
- $B_{m,m+1}$  Taille du stock tampon placé entre les machines  $m$  et  $m + 1$  (incluant un espace tampon sur la machine  $m$ )
- $T_m$  Longueur du cycle de maintenance préventive sur la machine  $m$
- $Q(T_m)$  Nombre d'activités de maintenance préventive sur un cycle  $S$  considérant un cycle de maintenance préventive  $T_m$  pour la machine  $m$
- $R(T_m)$  Nombre d'activités de maintenance corrective sur un cycle  $S$  considérant un cycle de maintenance préventive  $T_m$  pour la machine  $m$

Le coût de production ( $PC$ ) se calcule de la façon suivante :

$$PC = \sum_{t \in H} \left( \sum_{i \in P} (f_{it}y_{it} + p_{it}x_{it} + h_{it}I_{it} + w_{it}z_{it}) \right) / s$$

Textuellement, cette équation se traduit par la moyenne sur un cycle de la somme des coûts de mise en course, de fabrication unitaire, d'entreposage et de retard pour tous les produits.

Le coût de maintenance ( $MC$ ), pour sa part, se calcule de la façon suivante :

$$MC = c_p \cdot \sum_{m=1}^M Q(T_m) + c_r \cdot \sum_{m=1}^M R(T_m) / s$$

Cette équation se traduit par la moyenne sur un cycle de la somme des coûts de maintenance préventive et des coûts de maintenance corrective. Enfin, les coûts d'allocation d'espaces tampons sont déterminés par :

$$BC = b \cdot \sum_{m=1}^M B_{m,m+1}$$

Ces trois équations de coûts mènent à la fonction objective suivante :

$$\text{Min } Z = PC + MC + BC \quad (1)$$

sujette aux contraintes :

$$\sum_{t \in S} x_{it} = \sum_{t \in S} d_{it} \quad \text{pour } i \in P \quad (2)$$

$$x_{it} + I_{it-1} - I_{it} \geq d_{it} \quad \text{pour } t \in S \text{ et } i \in P \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P} x_{it} \leq C_m(t) \quad \text{pour } t \in S \text{ et } m \in M \quad (4)$$

$$x_{it}, I_{it}, z_{it}, T_m \geq 0 \quad \text{pour } t \in H \text{ et } i \in P \quad (5)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \text{pour } t \in H \text{ et } i \in P \quad (6)$$

$$B_{m,m+1} \geq 1 \quad \text{pour } m \in M \quad (7)$$

La contrainte (2) force la production d'exactement le nombre de produits de type  $i$  requis par la demande  $d$  sur le cycle  $S$ . La contrainte (3) permet d'assurer l'équilibre quantité produite et quantité en stock versus la demande à chaque période  $t$ . La contrainte (4) limite la production à la capacité de la machine  $C_m(t)$  pour la période  $t$ . Les contraintes (5) et (6) sont des contraintes de non-négativité. La contrainte (7) assure un stock tampon, entre chaque paire de machines, d'au moins une unité.

Ainsi, chacune des variables est en relation avec les autres dans le modèle. Par exemple, pour minimiser les coûts, on pourrait chercher à réduire la taille des stocks tampons au minimum (1 unité). Par contre, en cas de panne, l'ensemble de la ligne de production se verrait immédiatement arrêté et la probabilité que des produits soient livrés en retard deviendra importante.

De ces équations, on peut donc retenir que le module d'optimisation cherchera à :

- Trouver l'équilibre entre le coût lié au nombre de mises en course et le coût d'entreposage;
- Trouver l'équilibre entre le coût lié à la taille des stocks tampons et le coût lié au nombre de produits livrés en retard;
- Trouver l'équilibre entre le coût lié au nombre d'interventions de maintenance préventive et le coût lié au nombre d'interventions de maintenance corrective;
- Trouver l'équilibre entre le coût lié aux interventions de maintenance préventive et la taille des stocks tampons.

Lorsqu'une activité de maintenance préventive intervient sur une machine  $m$  durant une période  $t$ , la capacité restante disponible  $C_m(t)$  pour chaque période peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$C_m(t) = C_{max} - L_p - L_r \int_0^t r_m(u + (t-1)\tau) du \quad (4.1)$$

Prenez note que la fonction  $r_m(t)$  correspond au taux de pannes considéré connu d'une machine  $m$  donnée. Par ailleurs, puisqu'une action de maintenance préventive n'est nécessaire seulement qu'une fois à tous les cycles de maintenance préventive  $T_m$  pour une machine donnée  $m$ , pour toutes les autres périodes  $t$  où il n'y a pas d'activité de maintenance préventive, la capacité restante de la machine  $C_m(t)$  peut être calculée de la façon suivante :

$$C_m(t) = C_{max} - L_r \int_0^t r_m(u + (t-1)\tau) du \quad (4.2)$$

Le taux de pannes d'une machine donnée  $m$  au temps  $t$  est défini par :

$$r_m(t) = \frac{f_m(t)}{1 - F_m(t)} \quad (4.3)$$

où  $f_m(t)$  et  $F_m(t)$  correspondent, respectivement, à la fonction de densité de probabilité de pannes et à la fonction de distribution cumulative de la machine  $m$ . À titre d'exemple, dans le cas que la loi de distribution de pannes d'une machine est donnée par la distribution gamma  $G(2,1)$ , on obtiendrait :

$$r_m(t) = \frac{t}{t+1} \quad (4.4)$$

Dans le cas actuel, la loi de distribution gamma a été retenue pour caractériser la probabilité de défaillances des machines. Deux principaux ensembles de paramètres sont utilisés, soient  $G(2, 1)$  et  $G(2, 2)$ . Si cette loi de distribution avec ces paramètres a été retenue, il est à noter que n'importe qu'elle autre loi aurait pu également convenir et que ces paramètres-ci ont été retenus afin de faciliter la validation du modèle à une machine avec le modèle d'Aghezzaf et al. (2007).

Enfin, pour les fins de notre modèle de simulation, il a été considéré, tout comme le modèle d'Aghezzaf et al. (2007) que, alors qu'il faut une unité de temps pour effectuer une intervention de maintenance préventive, il faut en moyenne cinq fois plus de temps pour effectuer une intervention de maintenance corrective. À la différence du modèle d'Aghezzaf, toutefois, nous avons fait varier ces temps selon une loi normale pour rendre le modèle plus réaliste. Cette loi de distribution a été choisie parce qu'elle se compare plutôt bien avec ce que l'on peut trouver en milieu manufacturier.

Les sous-sections suivantes présentent les ordinogrammes et la modélisation Arena pour un modèle général. Il sera ensuite discuté des résultats pour une machine fiable, puis pour une machine non fiable. Ces résultats seront comparés avec ceux trouvés dans la littérature. Enfin, la section suivante couvrira la généralisation pour plusieurs machines du modèle à une machine non fiable. Ordinogrammes pour un système à une machine fiable

La figure 4.1 illustre l'ordinogramme représentant la demande  $d$  pour les produits  $i \in P$  sur le cycle  $S$ .

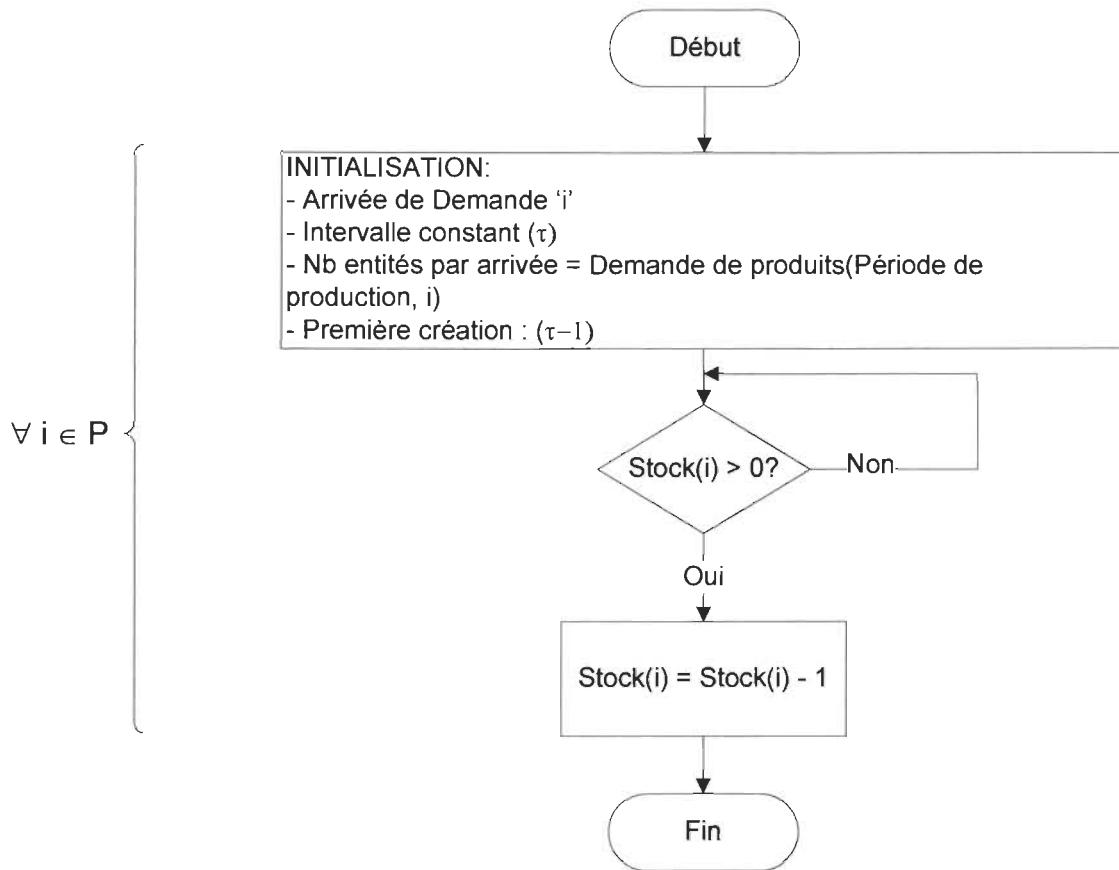


Figure 4.1 – Ordinogramme représentant la demande

La demande  $d$  pour les produits est considérée connue. Cette demande est représentée à l'aide d'une matrice « Demande de produits » de dimensions  $N \times P$ , c'est-à-dire une matrice dont la longueur  $N$  est définie par le nombre de périodes de longueur fixe  $\tau$  comprises au cours d'un cycle  $S$ , et dont la largeur  $P$  est définie par le nombre de produits  $P$ . À chaque fin de période  $\tau$ , soit à l'instant  $k\tau - 1$  (où  $k = 1, 2, 3, \dots$ ), des entités sont créées en fonction de la matrice « Demande de produits ». Chaque entité est appelée à récupérer exactement un produit donné  $i \in P$  de la matrice « Stock ». Si le stock pour ce produit  $i$  est vide, alors l'entité est retenue jusqu'à ce qu'une unité soit produite. Un coût de

pénalité est ajouté au coût de production pour chaque demande qui n'est pas satisfaite dans les délais prévus. Cette pénalité est également cumulative à chaque période. Dans le cas où, au contraire, il reste des unités du produit  $i$  en stock, le stock  $i$  est alors débité d'une unité.

La figure 4.2 représente l'ordinogramme du calcul des coûts de stockage et de retard. Cette partie du modèle fonctionne selon le principe suivant. À chaque intervalle  $\tau$ , soit immédiatement après que les entités représentant la demande aient « récupéré » leurs produits, une entité « évaluateur » entre dans le système et compte le nombre de pièces actuellement en stock (matrice « Stock »), ainsi que le nombre d'entités « Demande » qui n'ont pu récupérer leur produit, faute de stock. Le coût de stockage cumulatif sera égal au coût de stockage cumulé plus le coût unitaire de stockage multiplié par le stock de chaque produit. De la même façon, le coût de retard cumulatif sera égal au coût de retard cumulé auquel on ajoute le nombre de clients actuellement non desservis multiplié par le coût unitaire de pénalité pour les retards. Il faut toutefois ajouter que le calcul du coût de retard est superflu dans la mesure où la machine est considérée fiable, mais deviendra utile dans le cas contraire.

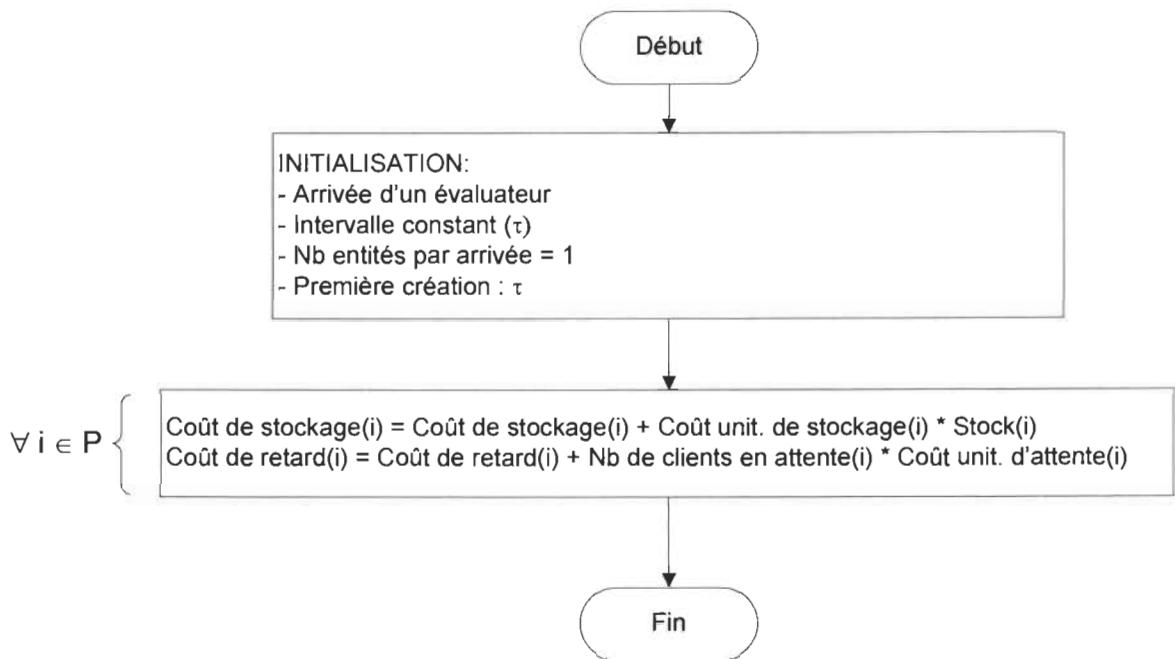


Figure 4.2 – Ordinogramme représentant le calcul des coûts de stockage et de retard

Par ailleurs, l'ordinogramme représentant la production d'un système à une machine fiable est superflu dans ces conditions, puisque l'on y retrouve ni stocks tampons, ni défaillances.

#### 4.1.2. Modèle Arena à une machine fiable

Le modèle Arena correspondant aux ordinogrammes précédemment illustré se trouve à la figure A.0.1 (en Annexe A). La partie du haut du modèle représente la demande. La partie centrale représente la production, tandis que la partie du bas sert au calcul des différents coûts.

#### 4.1.3. Résultats pour une machine fiable

Dans le cas d'un système comportant une machine fiable, seul le plan de production optimal est à obtenir puisqu'il n'y a pas de maintenance à effectuer (la machine ne peut tomber en panne) et il n'y a pas non plus de stock tampon (il y a une seule machine). Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007) tel qu'illustré dans le tableau 5.3. Les résultats ont été obtenus avec une capacité maximale  $C_{max}$  égale à 15.

Aghezzaf et al. (2007)	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	Coût
Production	Produit A	5	0	7	0	0	8	0	0	100
	Produit B	10	0	0	0	10	0	0	0	100
Stockage	Produit A	3	0	5	2	0	5	3	0	36
	Produit B	7	5	2	0	7	5	2	0	56
Mise en course	Produit A	1	0	1	0	0	1	0	0	75
	Produit B	1	0	0	0	1	0	0	0	50
Coût total de production										<b>417</b>
Résultats obtenus	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	Coût
Production	Produit A	7	0	0	3	10	0	0	0	100
	Produit B	3	2	5	0	3	2	3	2	100
Stockage	Produit A	5	2	0	0	8	5	3	0	46
	Produit B	0	0	2	0	0	0	0	0	4
Mise en course	Produit A	1	0	0	1	0	0	0	0	50
	Produit B	1	0	0	0	1	0	0	0	50
Coût total de production										<b>350</b>

Tableau 4.3 - Comparaison des résultats pour le plan de production optimal

La partie du haut du Tableau 4.3 illustre les résultats obtenus par Aghezzaf, Jamali et al. (2007) alors que la partie du bas indique les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire. Il s'avère que, dans les deux cas, les coûts de production à la fin du cycle sont les mêmes, ce qui est logique puisque la demande est de 10 produits A et 10 produits B au coût de 5 unités chacun dans les deux cas. Toutefois, on peut noter un coût de stockage qui diffère

considérablement d'un cas à l'autre. Il y a aussi une mise en course supplémentaire effectuée dans le plan de production optimal proposé par Aghezzaf, Jamali et al. (2007). Or cette différence semble résider dans le fait que, dans leur plan de production, un coût de mise en course a été imposé à chaque fois qu'il y a production au cours d'une période, à la différence du présent modèle. En effet, on considère, pour le modèle présenté ici, que le coût de mise en course s'impose seulement lors de la production initiale ainsi qu'à toutes les fois où l'unité produite en cours est d'un type différent du type de l'unité précédente. Cette différence notable, que nous croyons plus proche de la réalité, permet de présenter un gain considérable au niveau des coûts de production en étalant cette production dans le temps plutôt qu'en la concentrant. Effectivement, si on prend l'exemple d'une matrice dans une presse, cette matrice demeurera dans la presse jusqu'à ce qu'une autre matrice soit requise pour répondre à la demande. La presse ne se retrouvera pas sans matrice seulement parce qu'il n'y a pas de production en cours. Cette façon de faire permet d'économiser des coûts de mise en course et, par extension, de stockage. Il est aussi plus avantageux de produire pour répondre à la demande plutôt que de produire pour stocker en prévision d'une demande à venir. Par contre, il est important de noter que si la façon de calculer ces coûts était exactement la même que celle employée par Aghezzaf, Jamali et al. (2007), les résultats obtenus auraient été exactement les mêmes.

## 4.2. Modèle pour une machine non fiable et généralisation

### 4.2.1. Ordinogamme du modèle à une machine non fiable et généralisation

Les ordinogrammes présentés précédemment sont généraux et sont donc applicables autant pour une machine fiable que pour une machine non fiable. Ainsi, la demande et le calcul des coûts seront traités exactement de la même façon, à l'exception près que le calcul des coûts intégrera également le calcul des coûts de maintenance, tel que montré par l'équation du coût de maintenance ( $MC$ ) présentée au début de ce chapitre.

L'ordinogramme illustré aux Figure 4.3 et 4.4 représente la production pour un système où les machines sont considérées non fiables. Il a été divisé en deux sections (parties 1 et 2) pour faciliter la lecture. Après la période d'initialisation, on cherche à vérifier si la pièce demandée par le plan de production est du même type que la dernière qui a été produite. Si tel n'est pas le cas, on procède à une mise en course dont le temps est considéré négligeable, mais où un coût fixe est applicable. Par la suite, on cherche à savoir si le premier stock tampon est plein. Il faut noter qu'il n'y a pas de stocks tampons dans le cas où le système ne comporte qu'une seule machine, auquel cas la pièce en cours (c.-à-d. l'en-cours) est en attente que la machine se libère pour y prendre place. L'en-cours se comporte exactement de la même façon dans le cas qu'un stock tampon est présent et plein. Dès qu'un emplacement dans le stock tampon se libère, l'en-cours se place en file d'attente dans le tampon jusqu'à ce que la machine se libère et puisse accepter cet en-cours. Le temps de production peut être considéré fixe, ou encore suivre une loi de distribution (comme une loi normale), tel qu'illustré dans l'ordinogramme. Un emplacement d'un stock tampon ne se

libère qu'une fois un en-cours qu'il contient a complété son processus sur la machine qui suit. La ressource « Machine » nécessaire au processus n'est utilisé que pendant le temps de production.

La partie 2 de l'ordinogramme, présentée à la Figure 4.4, illustre la suite logique de l'ordinogramme pour un système comportant  $M$  machines et  $M - 1$  stocks tampons. À la toute fin, le stock pour chacun des types de produits et le coût de production, sont compilés.

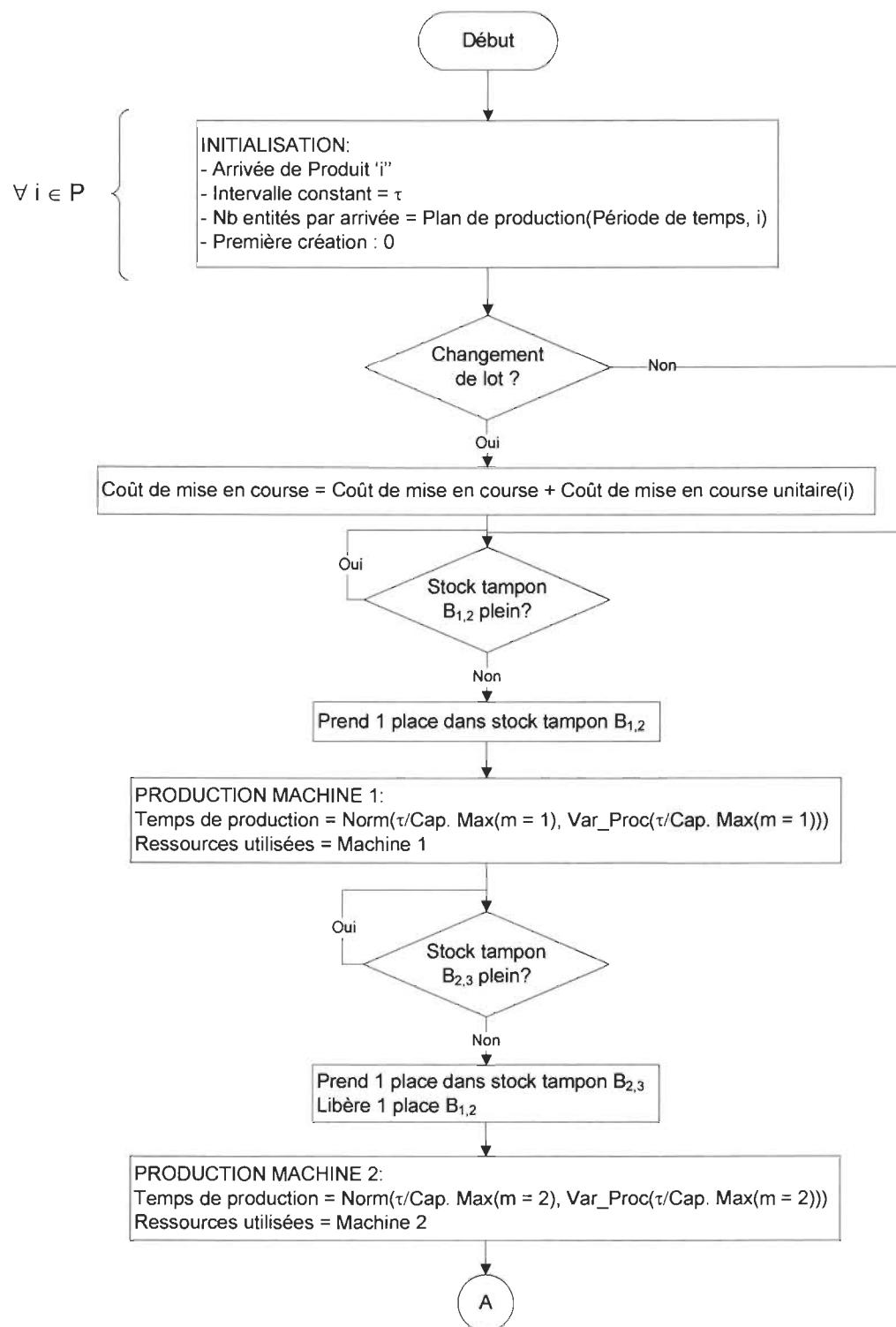


Figure 4.3 – Ordinogramme représentant la production pour un système comportant une ou plusieurs machines non fiables (partie 1)

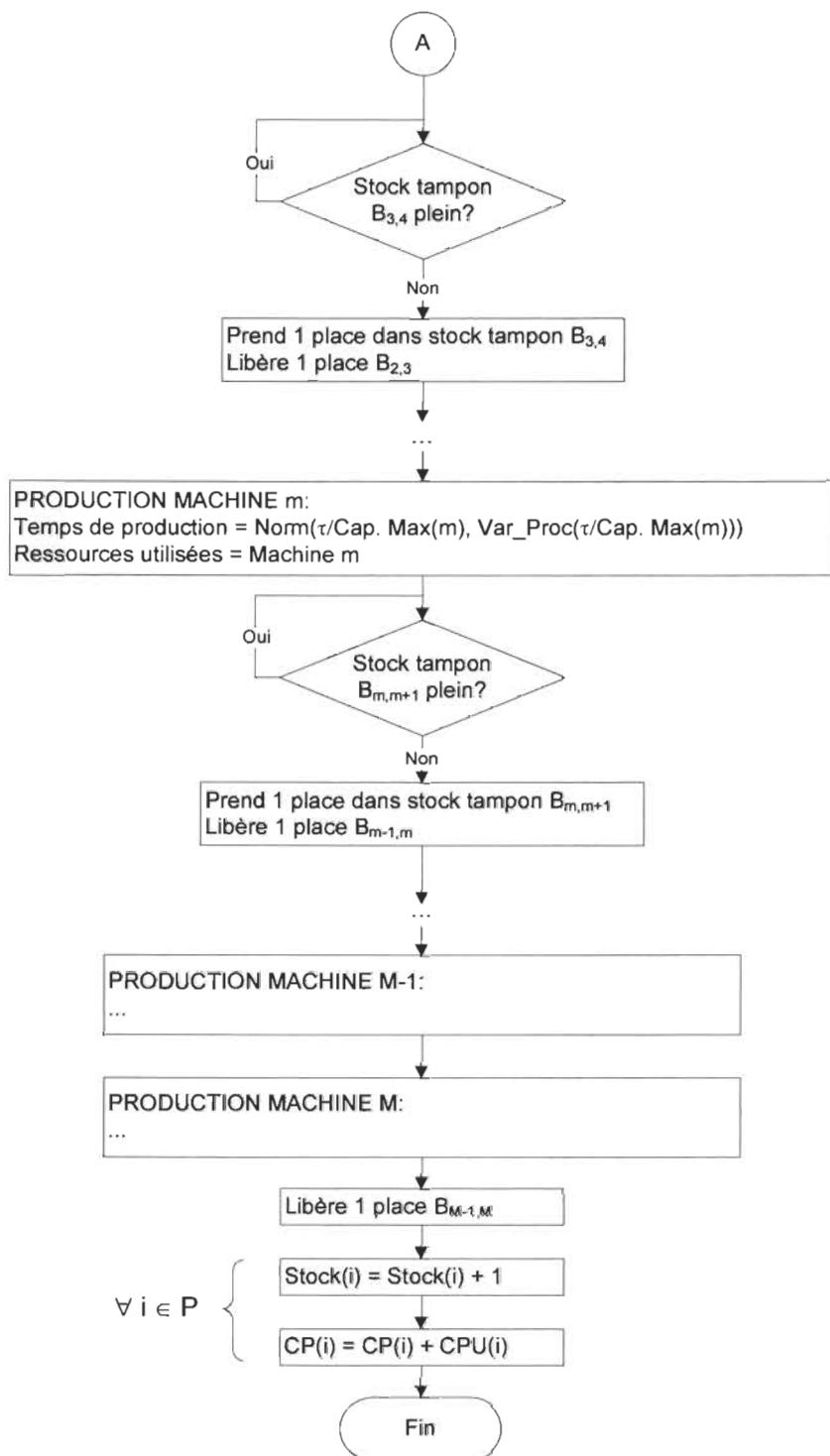


Figure 4.4 - Ordinogramme représentant la production pour un système comportant une ou plusieurs machines non fiables (partie 2)

Enfin, l'ordinogramme illustrant le temps de défaillance et les différentes maintenances préventives ou correctives inhérentes est présenté à la Figure 4.5. Ici, l'ordinogramme présenté constitue une généralisation pour un cas à plusieurs machines. Dans le cas où une le système ne comprend qu'une seule machine, la logique illustrée se rapprochera d'un remplacement de type bloc (BRP). Dans le cas où le système étudié comporte plusieurs machines, on parlera alors de remplacement indépendant de type bloc (RIB). On considère alors que la défaillance d'une machine est indépendante de celle des autres machines, si ce n'est qu'elle nuit à la production en affectant la ou les machines en amont ou en aval, allant même jusqu'à forcer le blocage et/ou la famine des autres machines si la maintenance corrective inhérente devait perdurer. Cette maintenance préventive et/ou corrective n'affecte en rien le plan de maintenance prévu pour les autres machines.

L'ordinogramme de la Figure 4.5 représente la défaillance et la maintenance des machines pour un remplacement indépendant de type bloc. Après la période d'initialisation, un temps de panne indépendant est généré pour chacune des machines par le « Générateur de pannes ». Ce temps de panne est défini par une loi de distribution. Ici, une loi gamma a été employée pour les fins de ce mémoire, afin de pouvoir valider notre modèle en comparant nos résultats avec ceux d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007).



Figure 4.5 – Ordinogramme représentant la défaillance et la maintenance des machines pour un remplacement indépendant de type bloc

Une fois la panne attribuée à chacune des machines, on détermine si ce temps de panne est prévu après la maintenance préventive prévue sur une machine  $m$ . Si tel est le cas, l'entité

ayant générée la panne sur la machine  $m$  attendra que le temps de la maintenance préventive survienne. Dans le cas contraire, il attendra la maintenance corrective. Les temps de maintenances préventive (MP) et corrective (MC) peuvent être fixes, ou encore être déterminés selon une loi de distribution. Dans le cas illustré, une loi de distribution normale a été retenue.

Une fois la maintenance préventive ou corrective effectuée, on ajuste le nombre de maintenances effectuées et les coûts associés sont mis à jour. L'entité enregistre également le moment de la prochaine maintenance préventive prévue.

Pour que la logique soit complète, il est important de considérer le temps écoulé depuis la dernière maintenance préventive sur une machine  $m$  donnée. Ce temps est calculé par :

$$Nb\ de\ périodes\ écoulées(m) = Période\ de\ temps - Dernière\ MP(m) \quad (4.5)$$

pour  $m \in M$ .

De même, pour déterminer la période de temps en cours, on utilisera la variable  $TNOW$ , qui indique le temps écoulé du simulateur depuis le début de la simulation :

$$Période\ de\ temps = AINT\left(\frac{TNOW}{\tau}\right) + 1 \quad (4.6)$$

où  $AINT$  permet de ne garder que la partie entière obtenue et de laisser tomber les décimales. Ainsi, *Période de temps* sera toujours un entier.

#### 4.2.2. Modèle Arena à une machine non fiable et généralisation

Le modèle Arena obtenu pour un système comportant une machine non fiable sera semblable à celui obtenu pour une machine fiable. La différence principale réside dans la présence du module de défaillance et de maintenance des machines qui s'est ajouté. Ce dernier est illustré à l'annexe A.0.2.

#### 4.2.3. Résultats pour une machine non fiable

Dans le cas d'une machine non fiable, il n'y a pas de stock tampon à considérer. Cependant, une maintenance préventive est requise si cette machine est sujette à une défaillance aléatoire. Dans de pareils cas, la distribution des pannes de la machine au fil du temps peut être représentée par une loi de distribution Weibull ou Gamma, par exemple. Afin de poursuivre la comparaison avec l'article d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007) et, du même coup, valider notre modèle, les lois de distribution utilisées étaient les mêmes, soient les distributions gamma  $G(2, 1)$  et  $G(2, 2)$ . Les Tableau 4.4 et 4.5 illustrent les résultats obtenus.

Les coûts de maintenance théoriques présentés dans le Tableau 4.4 et 4.5 ont été corrigés par rapport à ceux présentés dans l'article d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007). Les valeurs corrigées sont pour  $k \in \{3, 5, 6, 7\}$ , parce que les auteurs n'ont pas tenu compte du caractère cyclique de la maintenance préventive. Ainsi, si les valeurs étaient valables pour un cycle, elles devenaient faussées à partir du cycle suivant. Pour cette raison, les valeurs présentées ici peuvent différer de celles de l'article d'Aghezzaf et al. (2007). De plus, dans

les résultats présentés dans l'article, les valeurs de capacité disponible sont valables pour  $G(2, 2)$ , alors que les coûts de maintenance et les coûts de production correspondants ne sont valables que pour  $G(2, 1)$ . C'est pour cette raison que les deux tableaux corrigés sont présentés intégralement dans ce mémoire. Cela explique aussi pourquoi les coûts de production théoriques pour  $G(2, 2)$  ne sont pas présentés : les auteurs d'Aghezzaf et al. (2007) n'ont pas fait mention du plan de production obtenu dans ce cas.

Période	Capacité théorique disponible à chaque période pour différentes valeurs de $T$							
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$
1	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47
2	12.47	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.47	12.47	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
4	12.47	12.03	12.47	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12
5	12.47	12.47	12.03	12.47	10.91	10.91	10.91	10.91
6	12.47	12.03	11.44	12.03	12.47	10.77	10.77	10.77
7	12.47	12.47	12.47	11.44	12.03	12.47	10.67	10.67
8	12.47	12.03	12.03	11.12	11.44	12.03	12.47	10.59
Coût de maintenance	309.92	238.19	225.28	<b>223.34</b>	224.46	226.52	228.82	231.10
Coût de production <sup>3</sup>	<b>431.06</b>	433.76	443.48	436.84	434.28	447.28	447.28	444.28
Coût total	740.98	671.95	668.76	<b>660.18</b>	660.80	673.80	676.10	675.38

Résultats obtenus	Capacité disponible observée à chaque période pour différentes valeurs de $T$							
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$
1	12.46	12.46	12.46	12.46	12.46	12.46	12.46	12.46
2	12.46	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99
3	12.46	12.46	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
4	12.46	11.99	12.46	11.09	11.09	11.09	11.09	11.09
5	12.46	12.46	11.99	12.46	10.90	10.90	10.90	10.90
6	12.46	11.99	11.40	11.99	12.46	10.66	10.66	10.66
7	12.46	12.46	12.46	11.40	11.99	12.46	10.72	10.72
8	12.46	11.99	11.99	11.09	11.40	11.99	12.46	10.48
Coût de maintenance	310.51	239.63	227.12	<b>225.14</b>	226.09	229.01	230.56	233.41
Coût de production	<b>376.08</b>	376.79	380.53	378.27	379.00	378.35	379.55	381.56
Coût total	686.59	616.42	607.65	<b>603.41</b>	605.10	607.36	610.11	614.97

Tableau 4.4 - Comparaison des coûts théoriques et observés avec une distribution  $G(2, 1)$  pour différentes valeurs de  $T = kt; \tau = 1$

<sup>2</sup> Seuls les résultats corrigés sont présentés ici.

<sup>3</sup> Ces valeurs sont fournies à titre indicatif seulement. Elles ne peuvent servir à des fins de comparaison avec nos résultats puisque le plan de production obtenu est différent pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le cas de la machine fiable et parce que nos coûts de production tiennent compte des coûts de retard moyens.

Aghezzaf et al. (2007) <sup>4</sup>		Capacité théorique disponible à chaque période pour différentes valeurs de $T$							
Période		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$
1		9.49	9.49	9.49	9.49	9.49	9.49	9.49	9.49
2		9.49	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55
3		9.49	9.49	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68
4		9.49	7.55	9.49	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26
5		9.49	9.49	7.55	9.49	6.00	6.00	6.00	6.00
6		9.49	7.55	6.68	7.55	9.49	5.84	5.84	5.84
7		9.49	9.49	9.49	6.68	7.55	9.49	5.72	5.72
8		9.49	7.55	7.55	6.26	6.68	7.55	9.49	5.63
Coût de maintenance		476.39	<b>446.68</b>	453.05	462.19	470.52	477.64	483.68	488.84
Coût de production <sup>5</sup>		n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Coût total		n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

Résultats obtenus		Capacité disponible observée à chaque période pour différentes valeurs de $T$							
Période		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$
1		9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48
2		9.48	7.48	7.48	7.48	7.48	7.48	7.48	7.48
3		9.48	9.48	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58
4		9.48	7.48	9.48	6.21	6.21	6.21	6.21	6.21
5		9.48	9.48	7.48	9.48	6.08	6.08	6.08	6.08
6		9.48	7.48	6.58	7.48	9.48	5.79	5.79	5.79
7		9.48	9.48	9.48	6.58	7.48	9.48	5.63	5.63
8		9.48	7.48	7.48	6.21	6.58	7.48	9.48	5.64
Coût de maintenance		477.64	<b>449.81</b>	457.23	466.15	472.96	480.22	486.71	491.44
Coût de production		<b>373.53</b>	375.32	374.90	387.73	378.55	381.69	387.04	393.85
Coût total		851.17	<b>825.13</b>	832.13	853.88	851.51	861.91	873.75	885.29

Tableau 4.5 – Comparaison des coûts théoriques et observés avec une distribution  $G(2, 2)$  pour différentes valeurs de  $T = kt; \tau = 1$

<sup>4</sup> Seuls les résultats corrigés sont présentés ici.

<sup>5</sup> Ces valeurs n'étaient pas disponibles.

Les tableaux se lisent de la façon suivante : les lignes où il n'est pas fait mention des coûts représentent la capacité disponible d'une machine dans le cas où l'on adopte une stratégie de maintenance préventive avec réparation minimale en cas de panne. Dans un tel cas, si on effectue une maintenance préventive sur la machine, cette dernière se retrouve renouvelée. Par contre, dans le cas où une activité de maintenance corrective est effectuée, la machine est remise en fonctionnement exactement dans l'état où elle était avant de tomber en panne. La machine demeure donc dans le même état de dégradation. Ainsi, plus une machine passera de temps sans subir de maintenance préventive, plus elle sera dégradée et plus elle sera sujette à tomber en panne. La maintenance corrective nécessitant beaucoup plus de temps (5 unités de temps) qu'une maintenance préventive (1 unité de temps) parce que les techniciens de maintenance n'ont pas de temps pour la planifier, la capacité disponible de la machine tend à diminuer à chaque période tant qu'il n'y a pas de maintenance préventive. Par exemple, lorsque  $k = 2$ , cela signifie que la maintenance préventive est effectuée à toutes les deux périodes. D'après l'équation (4.1), une unité de temps est consommée pour la maintenance préventive. Le nombre de pannes moyen attendu lors de la première période dans le cas d'une distribution de pannes  $G(2, 1)$  est de 0,3069. En multipliant ce nombre par la capacité grugée lors d'une activité de maintenance corrective (5 unités), on obtient 1,5345. Enfin, en calculant  $C_{max}$  (15 unités) moins la capacité consommée par la maintenance préventive (1 unité) moins la capacité consommée par la maintenance corrective (1,5345 unités), on obtient la valeur 12,47. On procède de la même façon pour calculer toutes les valeurs théoriques. En comparant ces résultats avec ceux obtenus par la simulation, on se rend compte que les résultats obtenus sont très près des résultats

théoriques puisque la marge d'erreur est à l'intérieur de 2 %. Il en va de même pour les coûts de maintenance.

En ce qui concerne les coûts de production, les résultats obtenus diffèrent considérablement de ceux obtenus par Aghezzaf, Jamali et al. (2007). D'une part, cela est attribuable au même fait que cité dans le cas de la machine fiable, c'est-à-dire que le plan de production optimal qu'ils ont obtenu tient compte d'un coût de mise en course à chaque période de production, contrairement à nous. D'autre part, les coûts de production que nous présentons tiennent compte du coût de retard, à la différence d'Aghezzaf, Jamali et al. (2007). En effet, il est possible que, sur les 625 cycles d'une réPLICATION de la simulation, il arrive au cours d'un même cycle que la machine tombe en panne plus souvent que prévu (ce qui est possible en réalité). Or, dans un tel cas, il est probable que les produits soient livrés en retard par rapport à la demande et qu'une pénalité soit appliquée. Certes, le coût engendré par cette pénalité est réparti sur la moyenne des coûts pour l'ensemble des 625 cycles. Il n'en demeure pas moins que cela fait augmenter légèrement le coût de production. Toutefois, notre modèle, en tenant compte d'une pénalité pour le retard qui soit peu probable (mais réaliste), se rapproche davantage d'un cas réel, que le modèle analytique développé avec lequel les résultats sont comparés.

Maintenant que la base du modèle est bien établie et qu'on voit bien que les résultats concordent avec ceux présents dans la littérature, la section suivante couvrira la généralisation de ce modèle à un nombre de machines plus élevé. Certes, les équations et les ordinogrammes pour cette généralisation ont déjà été établis, il n'en demeure pas moins

que cela affecte le modèle Arena, puisqu'il faudra désormais tenir compte de la taille des stocks tampons entre chaque paire de machines.

#### 4.2.4. Résultats pour plusieurs machines en série

Pour la généralisation du modèle à une machine, après la présentation de l'ordinogramme qui illustre les différences marquant un modèle à une machine par rapport à un modèle comportant plusieurs machines de type atelier monogamme, deux exemples sont présentés. Le premier exemple présenté est un cas avec deux machines en série et le second exemple présenté comporte quatre machines en série. Pour ces deux exemples, les valeurs utilisées sont les mêmes que dans le cas à une machine. La seule exception possible est que la valeur de  $C_{max}$  passe à 20 dans le cas où il y a quatre machines en série, parce qu'il prend quatre fois plus de temps pour fabriquer une seule unité et parce que les probabilités qu'il y ait plus d'une panne sur le parcours de fabrication d'une seule unité est fort probable, étant donné les caractéristiques de pannes sévères attribuées aux machines. Cette façon de faire rend donc le modèle plus réaliste.

#### **Exemple pour le cas de deux machines en série**

Dans le cas où deux machines sont placées en série, afin d'augmenter la variabilité, les deux machines présentent des caractéristiques de pannes différentes : l'une présente une distribution gamma  $G(2, 1)$  et la seconde présente une distribution gamma  $G(2, 2)$ . Un stock tampon sépare les deux machines, tel qu'illustré à la Figure 4.6. Tous les paramètres de coûts (mise en course = 25, coût unitaire de production = 5/unité, coût d'entreposage =

2/unité/période, pénalité pour délai = 100/unité/période, coût d'une maintenance préventive = 28, coût d'une maintenance corrective = 35, coût pour un emplacement tampon = 2/emplacement) et de durées (maintenance préventive = 1, maintenance corrective = 5) sont demeurés les mêmes. La capacité de production est restée fixe à 15 unités par période. Enfin, la stratégie de maintenance utilisée était la stratégie de remplacement indépendant de type bloc (RIB).

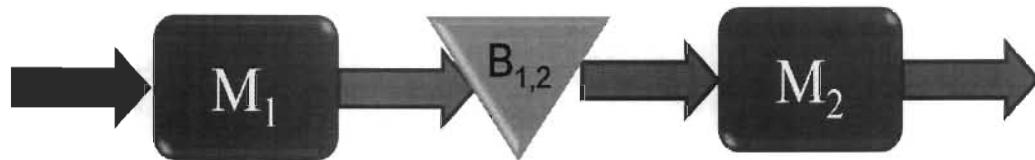


Figure 4.6 – Deux machines en série séparées par un stock tampon

Le Tableau 4.6 illustre la solution initiale obtenue, c'est-à-dire en forçant le module d'optimisation à :

- Obtenir la meilleure périodicité de maintenance;
- Obtenir, en ayant fixé la périodicité de maintenance à la valeur obtenue précédemment, la meilleure taille de stock tampon;
- Obtenir, en ayant fixé la périodicité de maintenance et la taille de stock tampon aux valeurs obtenues précédemment, le meilleur plan de production possible.

La solution initiale obtenue dans un pareil cas se traduit donc comme suit :

- Le nombre de produits A fabriqués à la période 1 devraient être de 2 à la période 1, 3 à la période 2, etc.;

- Le nombre de produits B fabriqués à la période 1 devraient être de 8 à la période 1, 0 à la période 2, etc.;
- La taille du stock tampon devrait être fixée à 5;
- La machine 1 devrait se voir effectuer une tâche de maintenance préventive à toutes les 4 périodes;
- La machine 2 devrait être maintenue préventivement à toutes les 2 périodes;
- Le coût total moyen associé à cette solution est considéré être 1105 en tenant compte des probabilités qu'il y ait des pénalités dues aux retards provoqués par les défaillances des machines.

Solution initiale	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	Coût
Plan de production	Produit A	2	3	5	2	0	3	2	3	
	Produit B	8	0	0	6	6	0	0	0	
Taille du stock tampon					[5]					
Plan de maintenance					[4, 2]					
										Coût total <b>1105</b>

Tableau 4.6 – Solution initiale pour un système comportant deux machines non fiables

La solution finale est obtenue en forçant le module d'optimisation à trouver une meilleure solution, en considérant la solution initiale comme solution de départ. Cette solution est illustrée dans le Tableau 4.7. En y regardant de plus près, on constate que la solution finale

obtenue est meilleure que la solution initiale. Le plan de production a été légèrement modifié et la périodicité de maintenance préventive pour la machine 1 a été ramenée à toutes les 3 périodes plutôt qu'à toutes les 4 périodes. Cette solution présente un coût total de 1092, comparativement à 1105 pour la solution initiale.

Solution finale	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	Coût
Plan de production	Produit A	2	3	7	0	0	3	2	3	
	Produit B	8	0	0	6	6	0	0	0	
Taille du stock tampon					[5]					
Plan de maintenance					[3, 2]					
										Coût total <b>1092</b>

Tableau 4.7 – Solution finale pour un système comportant deux machines non fiables

### Exemple pour le cas de quatre machines en série

Pour le cas de quatre machines en série, trois stocks tampons séparent chaque paire de machines, tel qu'illustré à la Figure 4.7. La façon de procéder est exactement la même que pour le système ne comprenant que deux machines en série. Le temps requis par le module d'optimisation pour obtenir la solution finale a toutefois doublé, passant d'environ 20 minutes pour un système comportant deux machines à 40 minutes pour le système actuel et ce, sur un Pentium IV avec processeur simple cœur de 2 GHz. Tous les paramètres sont demeurés inchangés par rapport au modèle comportant deux machines en série, à l'exception que la capacité de production des machines est passée à 20 unités par période.

De plus, les probabilités de défaillance des machines sont représentées par des distributions gamma  $G(2, 1)$  pour les machines 1, 2 et 4 et  $G(2, 2)$  pour la machine 3.

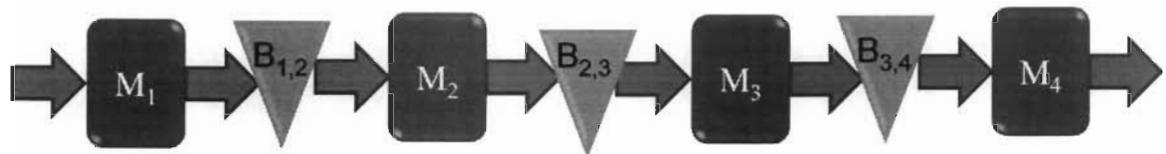


Figure 4.7 – Quatre machines en série séparées par trois stocks tampons

Dans le but d'alléger le texte et de faciliter la compréhension du lecteur, seul le tableau illustrant la solution finale est présenté ici. Il s'agit du Tableau 4.1 illustré ci-dessous. Le plan de production ressemble beaucoup à celui obtenu pour le système à deux machines. La taille des stocks tampons est respectivement de 2, 1 et 4 pour les stocks tampons 1, 2 et 3. Enfin, la périodicité de la maintenance préventive a été fixée à 4 périodes pour les machines 1, 2 et 4 et à toutes les 2 périodes pour la machine 3. Le coût total de la solution est nécessairement plus élevé que pour les modèles présentant un plus petit nombre de machines, étant donné qu'il y a plus de machines qui tombent en panne et parce que les probabilités de retard sont plus élevées. Ce résultat est également cohérent avec les résultats obtenus précédemment. Entre autres, on peut remarquer que la machine dont la probabilité de défaillance est la plus élevée est celle dont la périodicité de maintenance est la plus petite. Par ailleurs, il est important de mentionner que le coût total de la solution peut être répété et que la réponse obtenue sera contenue dans une marge de 2%.

Solution finale	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	Coût
Plan de production	Produit A	2	4	6	0	0	3	2	3	
	Produit B	8	0	0	2	10	0	0	0	
Taille du stock tampon							[2, 1, 4]			
Plan de maintenance							[4, 4, 2, 4]			
										Coût total <b>1508</b>

Tableau 4.8 – Solution finale pour le système comportant quatre machines en série

### 4.3. Conclusion

Les résultats obtenus démontrent la qualité d'un tel outil d'aide à la décision. Toutefois, il serait valable de se questionner sur le gain réel d'un tel outil et sur sa robustesse. Le chapitre suivant apporte une réponse à ces questions.

## CHAPITRE 5 : ANALYSE APPROFONDIE DE L'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Le chapitre précédent a démontré le fonctionnement de l'outil d'aide à la décision et ce, autant pour un système comportant une seule machine fiable que pour un système comportant quatre machines séparées par trois stocks tampons. Dans ce chapitre, le lecteur sera invité à constater la pertinence d'un tel outil en comparant notamment les résultats obtenus avec un plan de maintenance et de production intégré versus un plan non intégré. Ce chapitre mettra également en lumière l'impact de la variabilité du temps de procédé et du temps des activités de maintenance préventive et corrective sur le coût total des solutions. Enfin, deux stratégies de maintenance opportunistes (remplacement groupés de type bloc (RGB) et remplacement combinés de type bloc (RCB)) seront comparées avec la stratégie de remplacement indépendant de type bloc (RIB) employée jusqu'à maintenant.

### 5.1. Comparaison d'un plan intégré versus non intégré

Afin de valider la pertinence de l'outil d'aide à la décision, on a cherché à comparer le coût d'une solution où le plan de production ne serait pas intégré avec le plan de maintenance. Par « intégré », on entend que, dans le plan de production, une place est accordée pour effectuer les interventions de maintenance préventive et corrective. La « place » (ou délai) accordée pour la maintenance corrective est basée sur la probabilité de défaillance des machines. Le module d'optimisation cherchera donc à minimiser le coût total (coût de production + coût de maintenance). Lorsque, au contraire, les plans de production et de

maintenance ne sont pas « intégrés », le module d'optimisation va chercher à minimiser les coûts de production ou de maintenance en les considérant comme deux éléments distincts. On se retrouvera donc avec un plan de production quasi-optimal et un plan de maintenance quasi-optimal, mais le premier n'accorde pas de place au second pour effectuer ses interventions.

Pour effectuer la comparaison des coûts entre le modèle « intégré » et le modèle « non intégré », le modèle de quatre machines en série séparées par trois stocks tampons, présenté au dernier chapitre, a été utilisé. La stratégie de maintenance RIB a été employée. Enfin, les distributions gamma  $G(2, 1)$  et  $G(2, 2)$  ont été utilisées en alternance pour les machines 1 à 4, soit  $G(2, 1)$  pour les machines 1 et 3 et  $G(2, 2)$  pour les machines 2 et 4. Étant donné que deux des quatre machines sont très peu fiables comparativement à une seule lors de l'exemple présenté au dernier chapitre, il est normal de s'attendre à ce que le coût total de la solution optimale soit plus élevé que celui présenté au dernier chapitre. Le Tableau 5.1 illustre ces résultats.

Solution finale	Coût de production	Coût de maintenance	Coût total
Plan non intégré	850	1 344	2 194
Plan intégré	444	1 336	1 780

Tableau 5.1 – Comparaison des coûts de production et de maintenance entre une solution intégrée et non intégrée

En jetant un coup d'œil rapide au tableau, on se rend rapidement compte que le coût de maintenance est sensiblement le même, que le plan soit intégré ou non. Par contre, lorsque

l'on regarde le coût de production, on constate qu'il est beaucoup plus élevé dans le cas d'un plan non intégré. Or il s'avère que le coût de production est composé, entre autres, de la pénalité imposée lorsque des produits sont livrés en retard au client. Étant donné que le plan de production optimal est obtenu de façon complètement indépendante du plan de maintenance optimal dans le cas de la solution non intégrée, on se retrouve inévitablement avec des conflits dans le plan de production lorsque les machines se retrouvent en état de panne. Ces conflits entraînent un retard de livraison pour un certain nombre de produits qui, à leur tour, engendrent des coûts (ou pénalités) parce qu'ils ne sont pas livrés à temps au client. La Figure 5.1 illustre graphiquement la comparaison entre ceux deux résultats. On y voit qu'un plan intégré entraîne une économie de 19 % par rapport à un plan non intégré, ce résultat étant bien sûr basé sur les paramètres entrés pour les fins de ce modèle. Il pourrait être intéressant de comparer ces deux cas avec des paramètres qui tiennent compte d'une situation réelle.

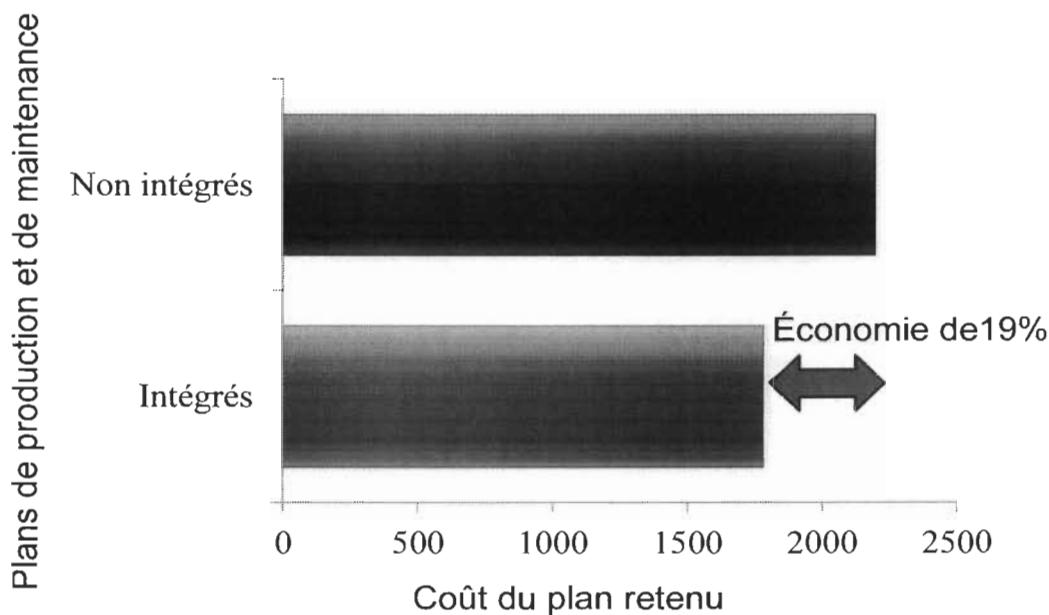


Figure 5.1 – Comparaison du coût d'une solution intégrée par rapport à une solution non intégrée

Si l'on regarde plus précisément du côté des retards dont il est fait mention, on se rend compte effectivement qu'il s'agit là de la principale cause de cette hausse vertigineuse des coûts de production. La Figure 5.2 illustre la comparaison entre le nombre de produits moyens en retard sur un cycle de production pour un plan de production et de maintenance intégré en comparaison avec un même plan qui ne serait pas intégré. Alors qu'avec le plan non intégré on retrouve une moyenne de 4,77 retards par cycle de production, on retrouve seulement 0,56 retards dans le cas où le plan est intégré. Il s'agit d'une amélioration de 88 %. Sans avancer qu'une telle intégration pourrait produire des résultats aussi spectaculaires dans une entreprise réelle, il ne fait toutefois aucun doute qu'un tel outil d'aide à la décision pourrait valoir la peine d'être utilisé avec une entreprise réelle.

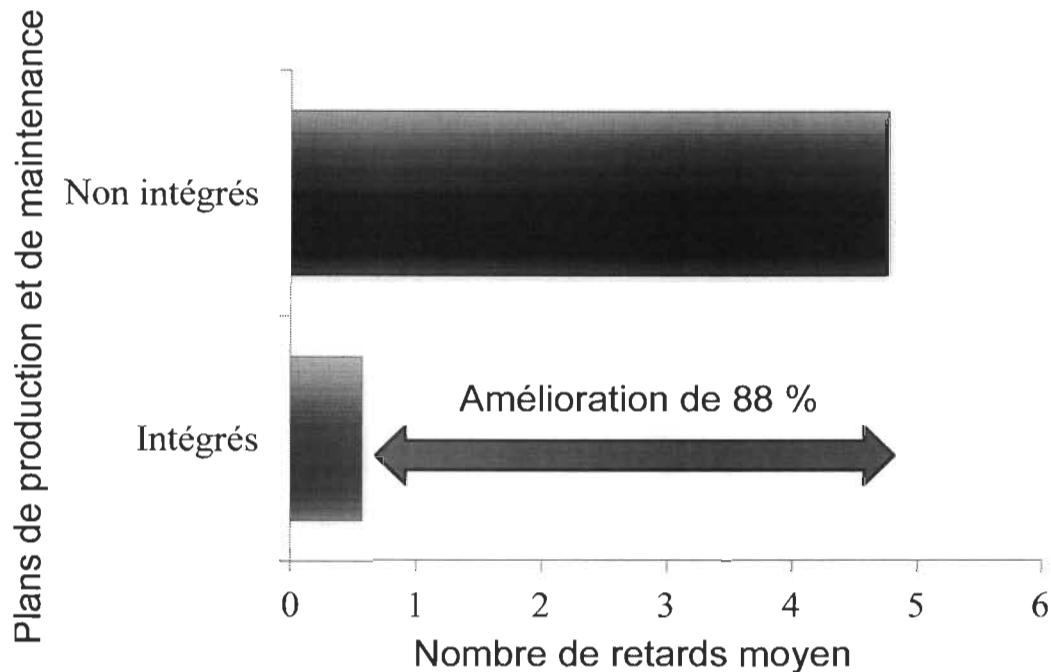


Figure 5.2 – Comparaison du nombre moyen de retards par cycle de production

### 5.2. Impact de la variabilité sur le modèle

Afin de vérifier la robustesse de notre modèle, le même modèle de quatre machines en série (avec les mêmes paramètres) utilisé à la section précédente a été repris. Cette fois-ci, on a cherché à établir de quelle façon réagirait le modèle dans le cas où on augmentait la variabilité du temps de maintenance et celle du temps de procédé (qui étaient nulles jusqu'à maintenant). Comme on pouvait s'y attendre, la variabilité du temps de maintenance, illustrée par la courbe la plus prononcée dans la Figure 5.3, a un impact plus important sur le coût total que la variabilité du temps de procédé. Effectivement, des temps de maintenance préventive et de maintenance corrective variables, représentés, par exemple, par une loi de distribution normale, généreraient des retards plus importants dans la

livraison des produits qu'un temps de procédé des machines qui aurait une variabilité similaire. D'ailleurs, les courbes de variabilité obtenues suivent toutes deux une courbe de tendance polynomiale d'ordre 2 (représentée par une ligne fine).

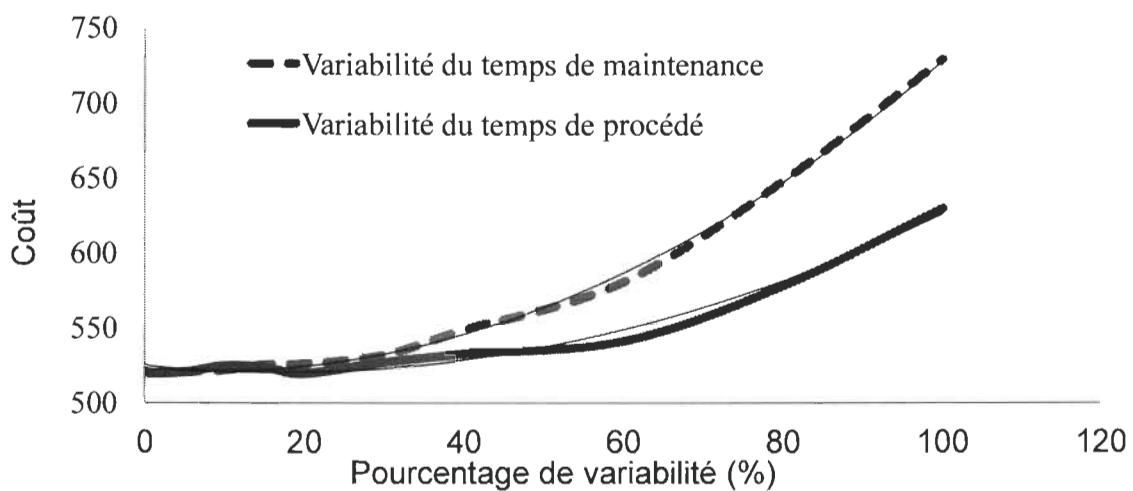


Figure 5.3 – Impact de la variabilité sur le coût total

### 5.3. Impact de stratégies opportunistes sur le modèle

Le dernier point, qui a été étudié dans le cadre cette recherche, consiste à évaluer l'impact de deux stratégies opportunistes, soient une stratégie opportuniste de remplacements groupés de type bloc (RGB), ainsi qu'une stratégie opportuniste de remplacements combinés de type bloc (RCB), sur le coût total d'une solution. Autrement dit, on cherchait à savoir s'il serait avantageux, pour le modèle considéré de quatre machines et trois stocks tampons étudié dans ce chapitre, de profiter de la maintenance préventive d'une machine pour faire de la maintenance préventive sur toutes les machines au même moment (cas

RGB), ou encore, de profiter d'une maintenance préventive ou corrective d'une machine, pour faire de la maintenance préventive sur les autres machines (cas RCB).

La Figure 5.4 illustre les résultats obtenus. On y voit clairement que, pour les paramètres utilisés, la stratégie de remplacements combinés de type bloc (RCB) serait la stratégie de maintenance opportuniste la plus avantageuse. Par contre, il faut tenir compte du fait qu'il faut avoir recours à une main-d'œuvre suffisante pour penser utiliser une telle stratégie. Cette option n'est peut-être pas à la portée de toutes les entreprises. Il faudrait, encore une fois, utiliser des données réelles avant de trancher si cette solution est la plus avantageuse pour une entreprise donnée. Il est toutefois intéressant de constater que cet outil d'aide à la décision peut être pertinent pour répondre à ce genre de questions dans une entreprise.

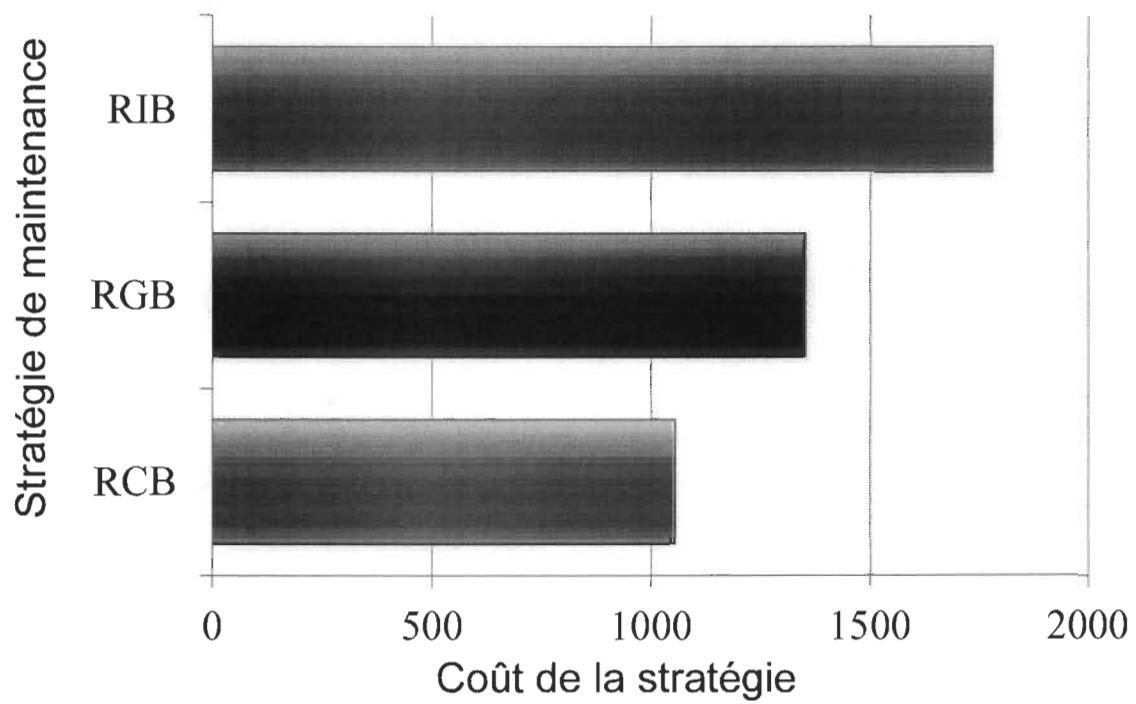


Figure 5.4 – Comparaison du coût de deux stratégies de maintenance opportunistes et une stratégie de maintenance indépendante

## CHAPITRE 6 : CONCLUSION

En somme, cette recherche aura permis de jeter les bases d'un outil d'aide à la décision basé sur un couplage de la simulation et de l'optimisation qui soit fonctionnel, valide et robuste. Dans le chapitre 2, suite à une couverture de la théorie qui soutient cette recherche, il a été discuté du fait qu'aucun outil d'aide à la décision de ce genre n'a déjà été présenté. Cet outil est unique en ce sens qu'il permet d'obtenir, à partir des caractéristiques intrinsèques des éléments composant une ligne de production (caractéristiques de défaillance des machines, temps et coûts de production et de maintenance, etc.), un plan intégré qui comprend :

- Le plan de production quasi-optimal
- La périodicité quasi-optimale de maintenance des machines
- La taille des stocks tampons quasi-optimale entre chaque paire de machines

De plus, cet outil d'aide à la décision est utilisable avec différentes stratégies de maintenance.

Le chapitre 3 met en lumière la méthodologie employée dans le cadre de cette recherche. Dans le chapitre 4, un modèle de base à une machine est développé, validé avec un modèle analytique existant dans la littérature, puis est généralisé pour une ligne de production comportant plusieurs machines. Enfin, dans le chapitre 5, on cherche à vérifier que les

résultats obtenus avec l'outil sont cohérents et qu'il est plus avantageux d'avoir un plan de production et de maintenance intégré que l'inverse. De même, il est démontré que l'outil produit des résultats fiables malgré le fait qu'on introduise une variabilité du temps de maintenance ou du temps de procédé des machines. Finalement, la flexibilité de l'outil quant au choix de la stratégie de maintenance employée est démontrée à la fin de ce chapitre.

Cette recherche aura conduit vers deux publications, soient Bergeron, Jamali et al. (2010) et Bergeron, Jamali et al. (2009). Cette dernière a eu lieu dans le cadre d'une conférence internationale qui s'est déroulée en Russie et où les résultats de cette recherche ont pu être présentés.

Cette recherche a jeté les bases d'un outil d'aide à la décision qui serait fort utile pour les entreprises d'aujourd'hui. Il serait toutefois intéressant de poursuivre la recherche pour généraliser l'outil pour des systèmes de production présentant des configurations plus complexes. De plus, il serait également intéressant de développer une interface utilisateur qui permettrait à un utilisateur d'une entreprise de pouvoir utiliser cet outil d'aide à la décision aisément.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aghezzaf, E. H., M. A. Jamali and D. Ait-Kadi (2007). "An integrated production and preventive maintenance planning model." European Journal of Operational Research **181**(2): 679-685.
- Ancelin, B. and A. Semery (1987). "Calcul de la productivité d'une ligne intégrée de fabrication: CALIF, une méthode analytique industrielle." RAIRO APII **21**: 209-238.
- Artamonov, G. T. (1977). "Productivity of a two-instrument discrete processing line in the presence of failures." Cybernetics and Systems Analysis **12**(3): 464-468.
- Bergeron, D., M. A. Jamali and D. Ait-Kadi (2009). Coupling Simulation and Optimization for an Integrated Production and Maintenance Planning in Manufacturing Systems. 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Moscow, Russia, IFAC.
- Bergeron, D., M. A. Jamali and H. Yamamoto (2010). "Modelling and analysis of manufacturing systems: a review of existing models." International Journal of Product Development **10**(1): 16.
- Berman, O. (1982). "Efficiency and production rate of a transfer line with two machines and a finite storage buffer." European Journal of Operational Research **9**: 295-308.
- Burman, M. H. (1995). New Results in Flow Line Analysis. Cambridge, MIT. **PhD**.
- Buzacott, J. A. (1967a). Markov chain analysis of automatic transfer line with buffer stock. Dept. of Eng. Prod., University of Birmingham. **PhD**.
- Buzacott, J. A. (1967b). "Automatic transfer lines with buffer stocks." International Journal of Production Research **5**: 182-200.
- Buzacott, J. A. (1972). "The effect of station breakdowns and random processing times on the capacity of flow lines." AIIE Transactions **4**: 308-312.
- Chiang, S.-Y., C.-T. Kuo and S. M. Meerkov (2000). "DT-bottlenecks in serial production lines: theory and application." IEEE Transactions on Robotics and Automation **16**(5): 567-580.
- Choong, Y. F. and S. B. Gershwin (1987). "A decomposition method for the approximate evaluation of capacitated transfer lines with unreliable machines and random processing times." IIE Transactions **19**: 150-159.

- Coillard, P. and J.-M. Proth (1984). "Sur l'effet des stocks tampons dans une fabrication en ligne." Rev. Belge Statist. Inform. et Recherche Opér. **24**: 3-27.
- Dallery, Y., R. David and X.-L. Xie (1988). "An efficient algorithm for analysis of transfer lines with unreliable machines and finite buffers." IIE Transactions **20**: 280-283.
- Dallery, Y. and S. B. Gershwin (1992). "Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results." Queueing Systems **12**: 3-94.
- De Koster, M. B. M. (1987). "Estimation of line efficiency by aggregation." International Journal of Production Research **25**: 615-626.
- Elsayed, E. A. and C. C. Hwang (1984). Analysis of manufacturing systems with buffer storage and redundant machines. Dept. of Ind. Eng., Rutgers University.
- Gershwin, S. B. (1986). "An 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. (1991). "Assembly/disassembly systems: An efficient decomposition algorithm for tree-structured networks." IIE Transactions **23**: 302-314.
- Gershwin, S. B. (2002). Manufacturing Systems Engineering. Cambridge.
- Gershwin, S. B. and O. Berman (1981). "Analysis of transfer lines consisting of two unreliable machines with random processing times and finite storage buffers." AIIE Transactions **13**: 127-135.
- Gershwin, S. B. and M. H. Burman (2000). "A decomposition method for analyzing inhomogeneous assembly/disassembly systems." Annals of Operations Research **93**: 91-115.
- Gershwin, S. B. and I. C. Schick (1980). Continuous model of an unreliable two-stage material flow system with a finite interstage buffer. Cambridge, Massachussets, Massachussets Institute of Technology.
- Gershwin, S. B. and I. C. Schick (1983). "Modeling and analysis of three-stage transfer lines with unreliable machines and finite buffers." Operational Research **31**: 354-380.
- Helber, S. (1998). "Decomposition of unreliable assembly/disassembly networks with limited buffer capacity and random processing times." European Journal of Operational Research **109**: 24-42.
- Helber, S. (2000). "Approximate analysis of unreliable transfer lines with splits in the flow of material." Annals of Operations Research **93**: 217-243.

- Helber, S. and H. Jusic (2004). "A New Decomposition Approach for Non-Cyclic Continuous Material Flow Lines with a Merging Flow of Material." Annals of Operations Research **125**(1): 117-139.
- Ignall, E. and A. Silver (1977). "The output of a two-stage system with unreliable machines and limited storage." AIIE Transactions **9**: 183-188.
- Jeong, K.-C. and Y.-D. Kim (1998). "Performance analysis of assembly/disassembly systems with unreliable machines and random processing times." IIE Transactions **30**: 41-53.
- Li, J. (2004a). Performance analysis of production systems with rework loops. Warren, MI, General Motors Research & Development Center: 1-39.
- Li, J. (2004b). "Modeling and analysis of manufacturing systems with parallel lines." Automatic Control, IEEE Transactions on **49**(10): 1824-1832.
- Li, J. (2005). "Overlapping Decomposition: A System-Theoretic Method for Modeling and Analysis of Complex Manufacturing Systems." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering **2**(1): 40-53.
- Patchong, A. and D. Willaeyns (2001). "Modeling and analysis of an unreliable flow line composed of parallel-machine stages." IIE Transactions **33**(7): 559-568.
- Qudeiri, J. E. A., M. A. Jamali and H. Yamamoto (2006). Buffer Size Decision for the Flexible Transfer Line with Rework Paths Using Genetic Algorithms. Intelligent Manufacturing Systems Laboratory. Gifu, Gifu University.
- Qudeiri, J. E. A., R. Ramli, H. Yamamoto, et al. (2007a). Deciding Buffer Size in a Complex Production System Using a GA - Production Simulation Based Method. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. Beijing, China.
- Sastray, B. L. N. and P. G. Awate (1988). "Analysis of a two station flow-line with machine processing subject to inspection and rework." Opsearch **25**: 89-97.
- Sevast'yanov, B. A. (1962). "Influence of storage bin capacity on the average standstill time of a production line." Theory Prob. Appl. **7**: 429-438.
- Tolio, T., A. Matta and S. B. Gershwin (2002). "Analysis of two-machine lines with multiple failure modes." IIE Transactions **34**: 51-62.
- Wijngaard, J. (1979). "The effect of interstage buffer storage on the output of two unreliable production units in series with different production rates." AIIE Transactions **11**: 42-47.

Zimmern, B. (1956). "Études de la propagation des arrêts aléatoires dans les chaînes de production." Revue de Statistique Appliquée 4(1): 85-104.

## ANNEXE

Schémas du modèle de simulation

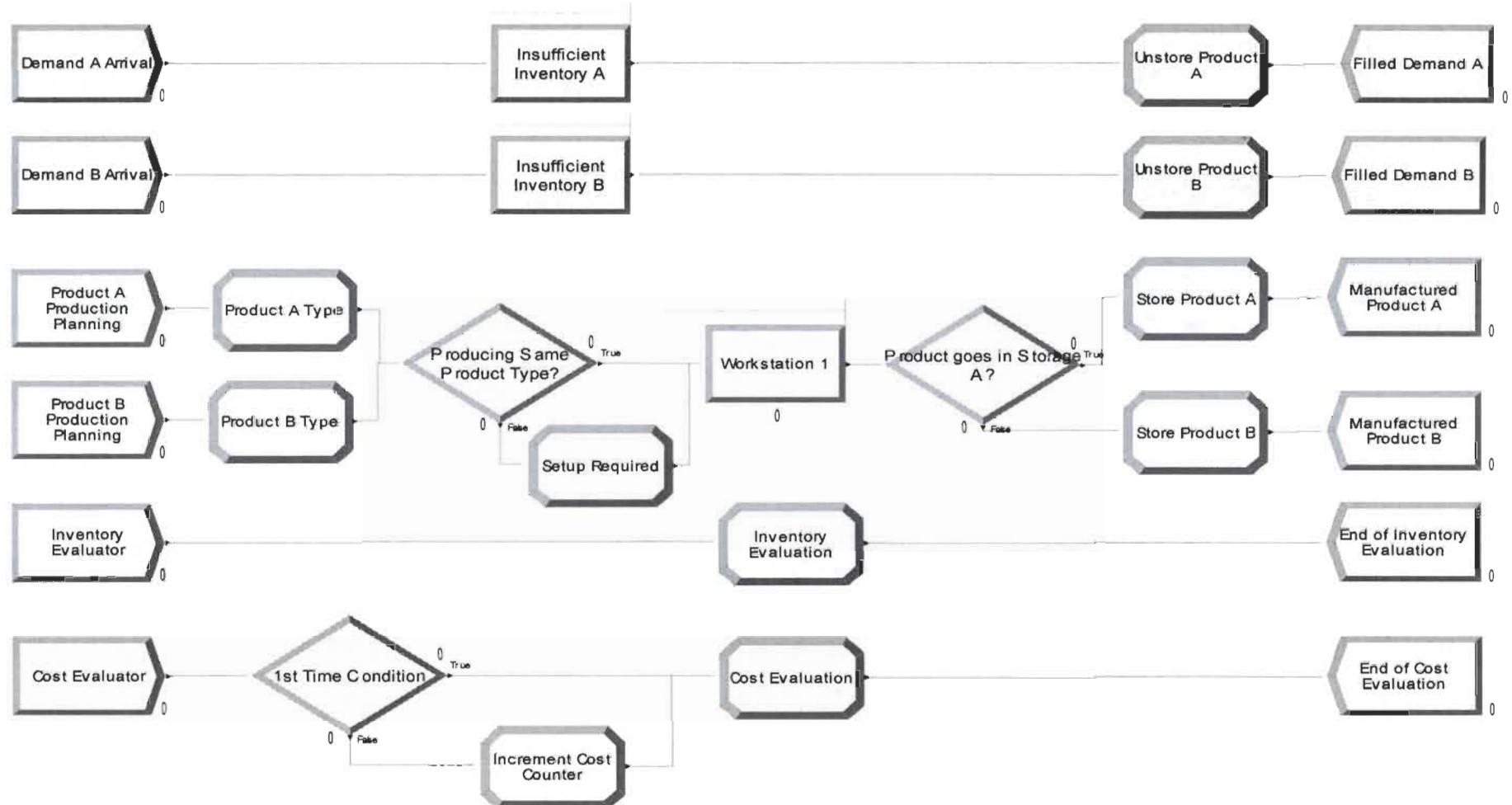


Figure A.0.1 – Modèle Arena pour un système à une machine fiable

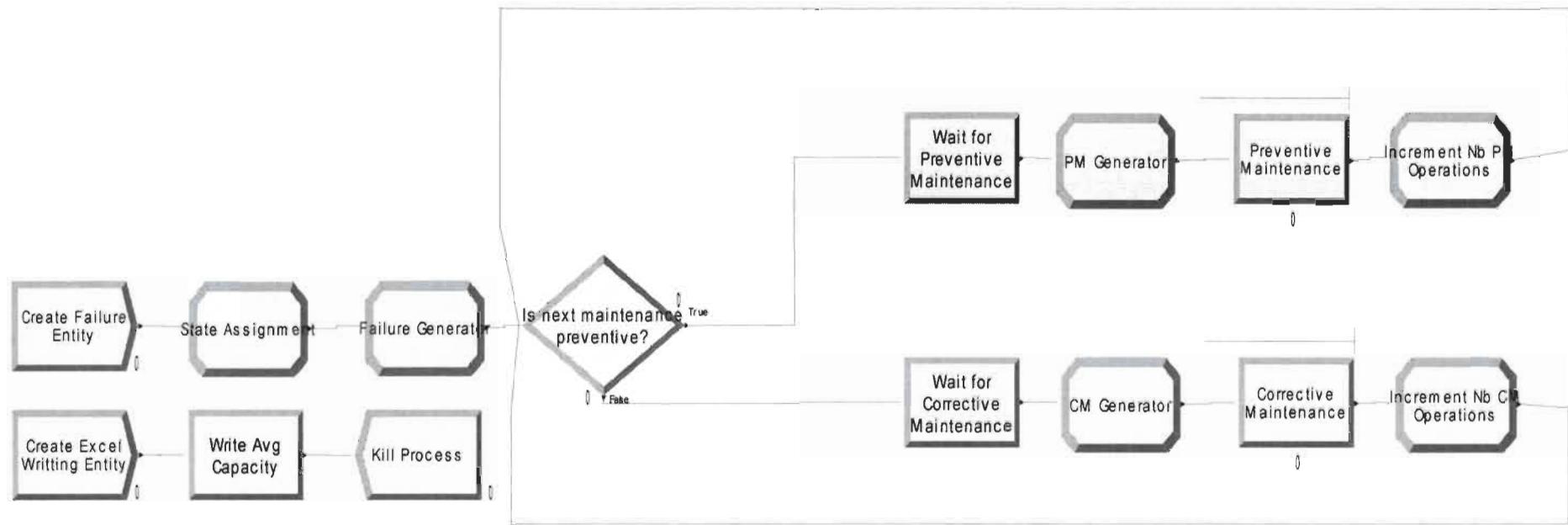


Figure A.0.2 – Modèle Arena illustrant le générateur de pannes pour des systèmes comportant une ou plusieurs machines