

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES
M. Ing.**

**PAR
STÉPHANIE HURTUBISE**

**CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'OUTILS
DE PLANIFICATION DE PRODUCTION
DANS UN CONTEXTE DE SYSTÈMES MANUFACTURIERS AGILES
POUR LA CONCEPTION DE CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT**

MONTRÉAL, LE 28 AOÛT 2001

© droits réservés de Stéphanie Hurtubise

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

- **M. Claude Olivier, directeur de mémoire**
Département de génie de la production automatisée à
l'École de technologie supérieure
- **M. Ali Gharbi, codirecteur**
Département de génie de la production automatisée à
l'École de technologie supérieure
- **M. Jean-Pierre Kenné, professeur**
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure
- **Mme Sophie D'Amours, professeur**
Département de génie mécanique à l'Université Laval

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE
DEVANT JURY ET UN PUBLIC
LE 7 AOÛT 2001
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'OUTILS
DE PLANIFICATION DE PRODUCTION
DANS UN CONTEXTE DE SYSTÈMES MANUFACTURIERS AGILES
POUR LA CONCEPTION DE CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT

Stéphanie Hurtubise

SOMMAIRE

La mondialisation des marchés apporte de profonds changements aux opérations des entreprises manufacturières. Dernièrement, de nouveaux paradigmes de production, tel que les réseaux manufacturiers flexibles et agiles, sont apparus pour répondre aux récents défis du marché. L'introduction des règles de flexibilité et d'agilité dans les environnements manufacturiers modifie fortement les approches de conception et d'analyse de ces systèmes.

Le but de ce travail de recherche est de contribuer au développement d'outils servant à la planification de la production. Ces outils sont employés lors de la conception de chaînes d'approvisionnement, dans un contexte de systèmes manufacturiers agiles, pour caractériser un système afin d'en permettre une conception et un contrôle plus efficace.

Pour ce faire, trois modèles sont développés à l'aide de la programmation linéaire et de la simulation par événements discrets. Le système à analyser est modélisé à l'aide de ces techniques puis différents essais sont conduits afin d'obtenir des mesures de performance du système. Deux modèles de programmation linéaire génèrent d'abord des plans de production agrégés et détaillés ainsi que des mesures de la performance statique du système. Puis la simulation est appliquée pour valider les résultats des modèles linéaires et obtenir des mesures de la performance dynamique du système. Un exemple est fourni pour démontrer l'utilisation des outils. Les résultats de chaque modèle sont comparés et analysés. On démontre enfin le cadre d'application propre à chacun des outils de planification ainsi que leurs forces et leurs faiblesses.

CONTRIBUTION TO
PRODUCTION PLANNING TOOLS DEVELOPMENT
IN AN AGILE MANUFACTURING SYSTEMS CONTEXT
FOR SUPPLY CHAIN DESIGN

Stephanie Hurtubise

ABSTRACT

Competition of global markets deeply modifies manufacturing enterprises operations. Lately, new production paradigms, such as flexible and agile manufacturing networks, appeared in order to respond to those recent market challenges. The introduction of flexibility and agility rules in manufacturing strongly modifies systems design and analysis approaches.

The aim of this work is to contribute to tools development for production planning. These tools are used at the time of supply chain design, in an agile manufacturing context, to allow better characterization of a system in order to permit more efficient design and control.

Developing three models with mathematical programming and discrete events simulation attains this goal. The system to analyse is modelled using these techniques. Then, different tests are conducted in order to obtain performance measures of the system. Two linear programming models are firstly used to generate aggregated and detailed production plans, and for determining static performance measures. Simulation is then applied for validating linear models results and for determining dynamic performance measures. Those results are compared and analysed. Finally, application scopes most suitable for each planning tool as well as their forces and weakness are submit.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de recherche, le Dr. Claude Olivier et le Dr. Ali Gharbi, qui m'ont très bien assistée. Ils se sont toujours montrés disponibles et enthousiastes, et leur contribution m'a permis de tirer pleinement profits de cette expérience. J'espère que notre collaboration durera encore longtemps. Je remercie de même mes confrères du laboratoire de conception et contrôle de systèmes de production.

J'aimerais exprimer toute ma gratitude à mon fidèle complice, mon époux Fernand, pour sa compréhension, son aide et son réconfort. Mes remerciements vont également à ma famille et à mes amis qui m'ont toujours suivie et épaulée dans tout ce que j'entreprends. Finalement, je remercie les Imprimeries Québecor, le Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) ainsi que le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur support financier.

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, Edwin Hurtubise, qui m'a appris à persévérer et qui m'a transmis sa passion du génie.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE.....	iii
ABSTRACT	iv
REMERCIEMENTS.....	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
Introduction	1
Problématique.....	1
Direction de la recherche	4
CHAPITRE 1 : Revue de la littérature	7
1.1 Introduction	7
1.2 Charpente conceptuelle de gestion de réseaux manufacturiers	11
1.2.1 Planification agrégée	12

1.2.2 Planification de la chaîne d'approvisionnement.....	14
1.2.3 Planification détaillée	16
1.2.4 Contrôle de la chaîne d'approvisionnement.....	18
1.3 Simulation par événements discrets	20
1.4 Mesures de performance	23
1.5 Structure du mémoire.....	30
CHAPITRE 2 : Présentation du cas étudié.....	32
2.1 Introduction	32
2.2 Hypothèses de travail.....	35
CHAPITRE 3 : Modèle de planification agrégée de la production	37
3.1 Introduction	37
3.2 Modèle d'optimisation linéaire pour la planification agrégée	38
3.3 Description des équations.....	39
3.4 Construction du modèle d'optimisation agrégé	42
3.5 Comparaison de réseaux	43
3.5.1 Méthodologie	43
3.5.2 Présentation et interprétation des résultats.....	44
3.6 Gestion de la chaîne d'approvisionnement	46
3.6.1 Introduction	46
3.6.2 Méthodologie	48
3.6.3 Présentation et interprétation des résultats.....	49
CHAPITRE 4 : Modèle de planification détaillée de la production.....	57
4.1 Introduction	57
4.2 Modèle d'optimisation linéaire pour la planification détaillée.....	58
4.3 Plan des expériences effectuées	60
4.4 Organisation du flux d'information entre les modèles d'optimisation.....	63

4.4.1 Méthodologie	64
4.4.2 Présentation et interprétation des résultats.....	66
4.5 Comparaison entre le réseau-05 et le réseau-06	71
4.5.1 Méthodologie	71
4.5.2 Présentation et interprétation des résultats.....	72
4.6 Influence sur le coût du nombre de périodes divisant une journée	75
4.6.1 Méthodologie	75
4.6.2 Présentation et interprétation des résultats.....	76
4.7 Influence sur le flux de la limite de capacité des tampons	78
4.7.1 Introduction	78
4.7.2 Méthodologie	78
4.7.3 Présentation et interprétation des résultats.....	79
4.8 Influence sur le flux du coût de transport des pièces vers l'entrepôt.....	81
4.8.1 Méthodologie	81
4.8.2 Présentation et interprétation des résultats.....	81
4.9 Réseau non tolérant.....	83
4.9.1 Introduction	83
4.9.2 Méthodologie	83
4.9.3 Présentation et interprétation des résultats.....	83
CHAPITRE 5 : Modèle de simulation par événements discrets	85
5.1 Introduction	85
5.2 Méthodes de modélisation et hypothèses	87
5.2.1 Initialisation	91
5.2.2 Assignation du plan de production.....	93
5.2.2.1 Assignation aux postes du premier niveau.....	96
5.2.2.2 Assignation aux postes des niveaux supérieurs.....	98
5.2.3 Fabrication et assemblage des composantes.....	101
5.2.4 Assemblage des produits finaux.....	105

5.3 Résultats dynamiques.....	111
5.3.1 Temps global de circulation	112
5.3.2 Délai de fabrication des produits.....	119
5.3.3 Taux d'utilisation des processeurs.....	120
5.3.4 Coûts de circulation	125
5.3.5 Niveau des tampons.....	126
CHAPITRE 6 : Discussion et interprétation des résultats.....	133
6.1 Introduction	133
6.2 Modèle de planification agrégée	134
6.2.1 Comparaison de réseaux.....	134
6.2.2 Gestion des chaînes d'approvisionnement	135
6.2.3 Hypothèses.....	135
6.3 Planification détaillée sur les nœuds du plan agrégé.....	136
6.3.1 Gestion des chaînes d'approvisionnement	136
6.3.2 Hypothèses.....	137
6.4 Modèle de planification détaillée	138
6.4.1 Comparaison de réseaux.....	139
6.4.2 Influence du nombre d'intervalles de planification	140
6.4.3 Tolérance des réseaux	140
6.5 Modèle de simulation	141
6.5.1 Hypothèses.....	142
6.5.2 Résultats.....	145
CONCLUSION	147
Champs d'application des techniques utilisées	147
Travaux futurs	149
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	151

ANNEXES	156
A : Réseaux étudiés	156
B : Coûts de circulation des trois réseaux	159
C : Modèle agrégé et fichiers de données.....	163
D : Résultats du modèle agrégé (aménagement-05, limité à 85%).....	169
E : Résultats mod. détaillé sur nœuds identifiés par mod. agrégé	172
F : Modèle de simulation	186
G : Résultats du modèle de simulation.....	212

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1	Les objectifs de l'ordonnancement d'un FMS..... 26
Tableau 2	Bénéfices stratégiques d'un FMS..... 27
Tableau 3	Bénéfices tactiques d'un FMS..... 27
Tableau 4	Éléments de coûts considérés lors de l'évaluation d'un FMS..... 28
Tableau 5	Demande quotidienne et composition des modèles..... 35
Tableau 6	Modèle mathématique linéaire de planification agrégée 40
Tableau 7	Glossaire des indices, paramètres et variables..... 41
Tableau 8	Coût des plans agrégés des trois réseaux 44
Tableau 9	Patrons de flux du plan agrégé pour le réseau-05 45
Tableau 10	Patrons de flux du plan agrégé pour le réseau-06 45
Tableau 11	Coût du plan agrégé avec limite de charge 49
Tableau 12	Patrons de flux pour une disponibilité de 85% 50
Tableau 13	Patrons de flux pour une disponibilité de 100% 50
Tableau 14	Tests et scénarios effectués à l'aide du modèle détaillé 61
Tableau 15	Coût des plans détaillés sur les nœuds retenus par le modèle agrégé 66
Tableau 16	Coût du plan détaillé et des plans agrégés 68
Tableau 17	Patrons de flux du plan agrégé (85%)..... 69
Tableau 18	Patrons de flux du plan détaillé sur les nœuds retenus par le plan agrégé 69
Tableau 19	Coût des plans agrégés et détaillés des deux réseaux 72
Tableau 20	Patrons de flux du plan détaillé sans contrainte pour le réseau-05 74
Tableau 21	Patrons de flux du plan détaillé sans contrainte pour le réseau-06 74
Tableau 22	Coûts du plan d'après le nombre d'intervalles..... 76
Tableau 23	Patrons de flux du plan détaillé avec taille des tampons limitée... 80
Tableau 24	Coûts du plan d'après le coût de transport..... 81
Tableau 25	Patrons de flux du plan détaillé avec coût de transport vers l'entrepôt 82
Tableau 26	Patrons de flux réseau-02 avec coût de transport vers l'entrepôt 84
Tableau 27	Notation des diagrammes de simulation 90

Tableau 28	Temps global de fabrication	112
Tableau 29	Fin de la production aux processeurs	113
Tableau 30	Fin de la production aux niveaux 3 et 4.....	115
Tableau 31	Délai de fabrication des produits.....	120
Tableau 32	Taux d'utilisation des processeurs (simulation).....	122
Tableau 33	Taux d'utilisation des processeurs (plan détaillé).....	123
Tableau 34	Coûts de circulation.....	125
Tableau 35	Niveau des tampons (simulation).....	128
Tableau 36	Niveau des tampons (plan détaillé).....	129

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Procédé de gestion de la chaîne d'approvisionnement..... 3
Figure 2	Lien entre les trois modèles 8
Figure 3	Légende pour la structure du flux de données 12
Figure 4	Diagramme du flux de données à travers le modèle de PA 13
Figure 5	Diagramme du flux de données à travers le modèle de SCM 15
Figure 6	Diagramme du flux de données à travers le modèle de PD 17
Figure 7	Procédure générale pour le contrôle 19
Figure 8	Gamme de fabrication des produits 33
Figure 9	Portion du réseau-05..... 34
Figure 10	VMN pour les six produits confondus..... 53
Figure 11	VMN pour le produit A..... 54
Figure 12	VMN pour le produit B..... 54
Figure 13	VMN pour le produit C..... 55
Figure 14	VMN pour le produit D..... 55
Figure 15	VMN pour le produit E..... 56
Figure 16	VMN pour le produit F 56
Figure 17	Coûts du plan d'après le nombre d'intervalles..... 77
Figure 18	Diagramme de la simulation..... 89
Figure 19	Diagramme du réseau d'initialisation 91
Figure 20	VMN pour le produit F 94
Figure 21	Diagramme du réseau d'assignation aux postes du premier niveau 97
Figure 22	Diagramme du réseau d'assignation aux postes de niveaux supérieurs 99
Figure 23	Diagramme du réseau de fabrication des composantes 102
Figure 24	Diagramme du réseau d'assemblage des produits finaux..... 107
Figure 25	Occupation des postes prédécesseurs à C9..... 117
Figure 26	Niveau des tampons du plan détaillé et de la simulation (B)..... 130
Figure 27	Niveau des tampons du plan détaillé et de la simulation (A)..... 132

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AMS	Systeme manufacturier agile
FMS	Systeme manufacturier flexible
PA	Planification agrégée
PD	Planification détaillée
PE	Programmation en nombres entiers
SCM	Gestion de la chaîne d'approvisionnement
SED	Simulation par événements discrets
VMN	Réseau manufacturier virtuel
h	heure
min	minute
s	seconde
C1..C10	processeurs d'assemblage final
G1..G5	processeurs d'assemblage d'indicateurs généraux
G	indicateur général
S1..S5	processeurs d'assemblage de tachymètres
S	tachymètre
T1..T4	processeurs d'assemblage de compte-tours
T	compte-tours
AS1,AS2	processeurs de fabrication de sous composante (a) pour [S]
AS	sous composante (a) pour [S]
AT1,AT2	processeurs de fabrication de sous composante (a) pour [T]
AT	sous composante (a) pour [T]
B1..B6	processeur de fabrication de bobines

B	bobine
BS	processeur d'assemblage de sous composante (b) pour [S] (ou sous composante (b) pour [S])
BT	processeur d'assemblage de sous composante (b) pour [T] (ou sous composante (b) pour [T])
∞	Nombre très élevé tendant vers l'infini
<	Plus petit que
<=	Plus petit ou égal à
\leq	Plus petit ou égal à
>	Plus grand que
>=	Plus grand ou égal à
\geq	Plus grand ou égal à
==	Est égal à
!=	Est différent de
=	Prend la valeur de
Σ	Sommation
\forall	S'applique à tous
%	Pourcentage

INTRODUCTION

Introduction

Avec l'arrivée du 21^{ème} siècle, nous avons vu émerger un nouveau contexte de dynamique de marché. De nos jours, les entreprises manufacturières font face à d'énormes pressions en ce qui concerne leur compétitivité. La compétition mondiale ainsi que la demande pour des produits sur mesure livrés "juste à temps" causent un réel stress aux manufacturiers. Récemment, de nouveaux paradigmes de production comme l'entreprise réseau, les systèmes manufacturiers agiles et les réseaux manufacturiers virtuels sont apparus à la suite des systèmes manufacturiers flexibles afin de répondre à cette augmentation du dynamisme du marché (Poulin *et al.*, 1994) (Goldman *et al.*, 1995) (Jagdev et Browne 1998). Les réseaux manufacturiers permettent à des entreprises dispersées géographiquement de bâtir des alliances avec leurs fournisseurs et leurs clients en travaillant étroitement avec eux et en établissant ces réseaux à travers l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement.

Problématique

La gestion de la chaîne d'approvisionnement n'est pas une mince tâche. Les gestionnaires de chaînes d'approvisionnement sont responsables de la planification concernant les produits, de la sélection des procédés et de la technologie, de la distribution des responsabilités, de l'emplacement des installations, des modes de transport, des systèmes de planification et de

contrôle, des systèmes d'information ainsi que du flux de matériel. Ils doivent passer des contrats et orchestrer leurs opérations à travers l'exploitation des moyens offerts par la fabrication ainsi que par les firmes de services et de logistique responsables des activités de production, de transport et d'entreposage (D'Amours *et al.*, 1999a).

La conception d'un réseau est un procédé itératif qui débute lorsqu'une entreprise réseau (en réseau avec ses fournisseurs) désire réaliser un programme de production à travers l'exploitation d'un réseau, soit sa chaîne d'approvisionnement. Le procédé de gestion de la chaîne d'approvisionnement est schématisé à la figure 1. La firme identifie un ensemble de fournisseurs potentiels capables d'exécuter une ou plusieurs activités du programme et les invite à soumissionner. Avant de répondre, les fournisseurs qui veulent soumissionner doivent d'abord vérifier si leur système de production a suffisamment de capacité pour répondre à la demande de l'entreprise réseau. Si c'est le cas, ils doivent ensuite déterminer quels sont les délais et les coûts de production associés aux plans de production pour lesquels ils désirent soumissionner. La vérification de capacité de même que l'estimation des coûts et des délais peuvent être effectuées en employant un modèle de planification agrégée développé à l'aide de la programmation linéaire. Chaque fournisseur peut alors envoyer sa soumission à l'entreprise réseau.

Lorsque que les soumissions ont été collectées, l'entreprise réseau planifie sa chaîne d'approvisionnement et la gère de façon dynamique selon la variation de la demande dans le temps. Elle doit définir quels fournisseurs, sous-traitants, unités d'affaires et transporteurs parmi ceux constituant le réseau devraient être choisis afin de rendre le réseau opérationnel et de minimiser les coûts d'opération. Les firmes soumissionnaires sont ensuite informées si leurs offres ont été retenues ou non.

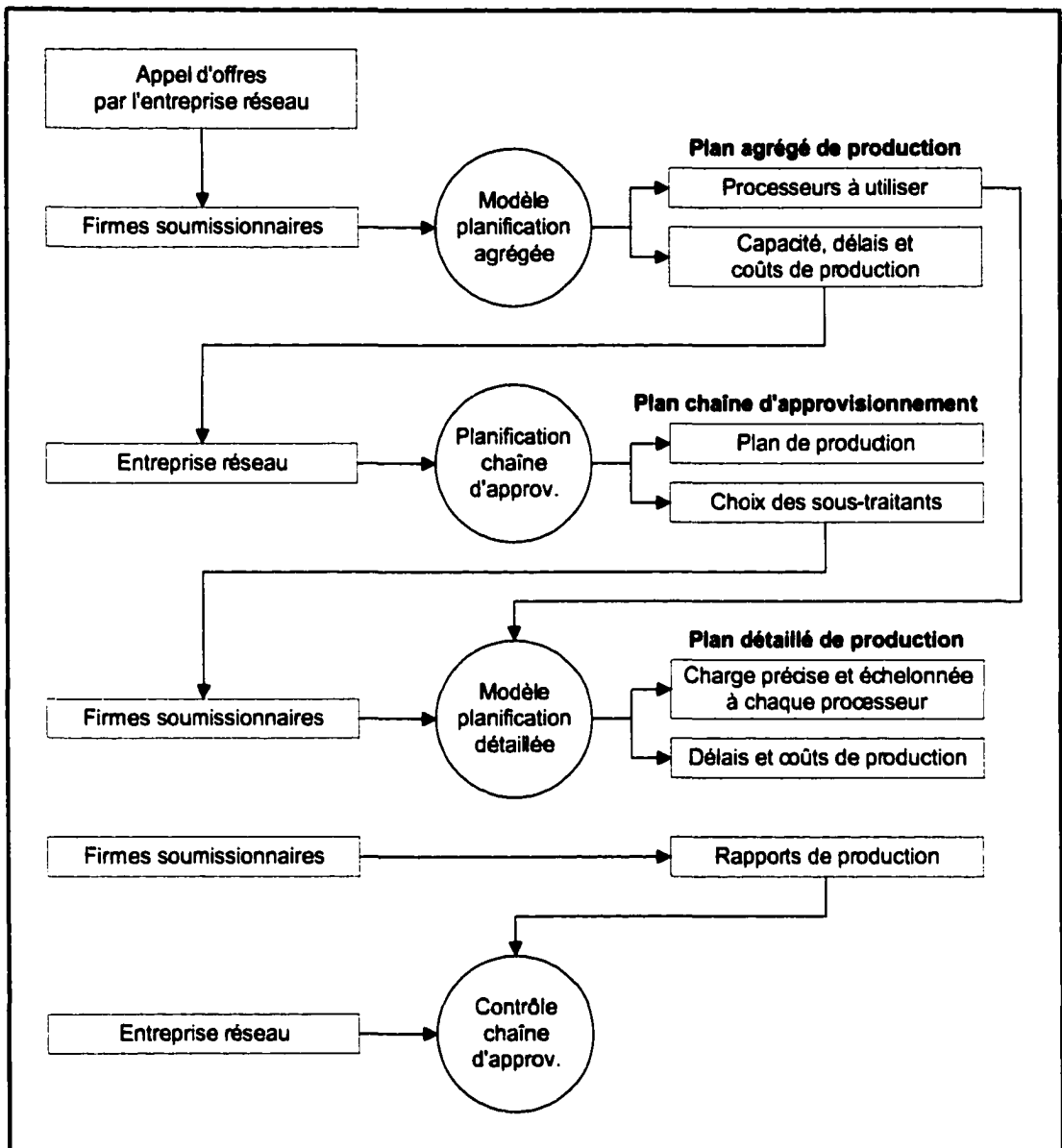


Figure 1 Procédé de gestion de la chaîne d'approvisionnement

Chaque firme choisie doit par la suite concevoir un plan de production détaillé. Cela peut être effectué en employant un modèle de planification détaillé développé également à l'aide de la programmation linéaire. Un plan détaillé fournit un plan précis qui échelonne la production sur plusieurs périodes, qu'on

appelle intervalles de planification. Plus le plan est précis et plus la quantité de données devient importante : la complexité du problème croît de façon exponentielle. Pour que le temps de résolution demeure raisonnable, il devient alors important de diminuer la taille du problème de planification détaillée. Une des solutions consiste à générer un plan détaillé qui assigne une charge de travail uniquement aux nœuds processeurs identifiés dans le plan agrégé lors de la première étape du procédé de soumission. Le modèle détaillé considère ainsi seulement les données touchant ces nœuds, ce qui diminue la quantité d'information requise.

Enfin, l'entreprise réseau effectue un contrôle des opérations de ses fournisseurs pour s'assurer que les livraisons seront effectuées à temps.

Plusieurs incertitudes entourent la planification et le contrôle d'un réseau manufacturier. Dans la phase de planification, le gestionnaire de la chaîne d'approvisionnement doit évaluer la robustesse du réseau. Cependant, cela ne peut être fait si on ne possède pas de calendrier de fabrication. Et le gestionnaire a besoin de savoir quelle information circulera à travers le réseau pour être en mesure d'établir un système de planification et de contrôle. Il doit de plus s'assurer que l'information générée à une échelle macro, voyant le réseau comme un système entier, sera toujours valide à une échelle micro, à l'intérieur de chaque firme, quand les aspects dynamiques du procédé sont pris en compte.

Direction de la recherche

Ce travail de recherche contribue au développement d'outils servant à la planification de la production afin d'apporter des réponses à certains problèmes que l'on rencontre lors de la planification des réseaux manufacturiers agiles et

des chaînes d'approvisionnement. Ces outils sont employés pour caractériser un système afin d'en permettre une conception et un contrôle plus efficace.

Une charpente contextuelle permettant d'intégrer différents outils afin d'évaluer quantitativement les réseaux manufacturiers et de les gérer efficacement a été développée lors de nos travaux antérieurs (Hurtubise *et al.*, 2000). Cette charpente est expliquée à la section 1.2. Les outils proposés dans cette charpente pour l'évaluation et la gestion des réseaux manufacturiers sont développés à l'aide de la programmation linéaire. Parmi les modèles proposés, deux sont employés dans cette recherche. Un troisième modèle est conçu à l'aide de la simulation par événements discrets pour fournir un complément d'information. Ces modèles sont employés à différentes étapes de la planification des réseaux manufacturiers agiles et des chaînes d'approvisionnement.

L'emploi des modèles comme outils de planification est illustré à l'aide d'un exemple. Le système étudié consiste en un système manufacturier flexible (FMS) pour la fabrication de tableaux de bord pour l'industrie automobile. Ce système manufacturier est expliqué au chapitre 2. Le travail de recherche vise la planification agrégée et détaillée de la production du FMS, lequel représente un des nœuds d'une chaîne d'approvisionnement. Ce FMS est modélisé à l'aide de la programmation linéaire et de la simulation. Différents essais sont conduits afin d'obtenir des mesures de performance du système.

Un premier modèle de programmation linéaire est d'abord utilisé pour générer des plans agrégés de production et fournir des mesures statiques de la performance du système. On emploie ce modèle pour évaluer la capacité de production des firmes soumissionnaires répondant à l'offre d'une entreprise réseau. Ce modèle est également utilisé pour comparer différentes

configurations de réseau et pour éliminer, le cas échéant, celles offrant des performances non satisfaisantes. Un second modèle de programmation linéaire est ensuite validé. Ce modèle génère des plans détaillés de production et fournit lui aussi des mesures statiques de performance. Ce modèle est avant tout utilisé pour concevoir le plan de production détaillé d'une firme en se basant sur les meilleurs nœuds potentiels qui ont été identifiés lors de la première étape du procédé de soumission. Il est utilisé en second plan pour conduire différents essais dans le but d'évaluer le comportement d'un système soumis à diverses contraintes. Puis un modèle est développé à l'aide de la simulation par événements discrets. Ce modèle est employé pour valider les résultats des modèles linéaires et obtenir des mesures dynamiques de la performance du système. Le lien entre les trois modèles est schématisé à la figure 2.

Les résultats provenant des trois modèles sont par la suite analysés et comparés. On démontre enfin, à la lumière des résultats obtenus, le cadre d'application propre à chacun des outils de planification ainsi que leurs forces et leurs faiblesses.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

À la fin des années quatre-vingt, des pionniers comme Miles, Snow, Anderson et plusieurs autres, ont commencé à travailler sur l'organisation réseau, définissant des concepts et des approches systémiques (Anderson et Paine 1975) (Miles et Snow 1978) (Miles *et al.*, 1978, 1992) (Snow *et al.*, 1992).

Plus récemment, avec l'arrivée du commerce électronique, les chaînes d'approvisionnement et les réseaux manufacturiers sont devenus un champ fertile pour la recherche. Le *Centre de recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau*¹ (CENTOR) ainsi que le laboratoire de *Conception et Contrôle de Systèmes de Production*² (C²SP) ont développé des approches et des outils pour traiter différents aspects de la question.

Parmi les chercheurs impliqués, Montreuil *et al.*, (1992) ont introduit le concept des réseaux manufacturiers symbiotiques; Ramudhin *et al.*, (1994) ont étudié le problème de la distribution d'un groupe d'activités ayant des contraintes de préséance de la forme d'un arbre d'assemblage, parmi un groupe de firmes compétitrices, avec l'objectif de minimiser le coût total; Olivier *et al.*, (1994, 1996 et 1998) ont proposé une approche pour l'évaluation d'alternatives

¹ Affilié à l'Université Laval, Sainte-Foy (Québec)

² Affilié à l'École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal (Québec)

d'aménagement, d'après les perspectives de coûts et de flux, pour des systèmes manufacturiers organisés en réseaux agiles, et ils ont introduit des concepts pour la planification et le contrôle des réseaux manufacturiers virtuels; et D'Amours *et al.*, (1996,1999a,1999b) ont proposé un modèle de réseau pour optimiser les décisions relatives à la conception et aux opérations dans l'entreprise du fabriqué sur commande, minimisant un compromis coût-temps sous les contraintes manufacturières typiques.

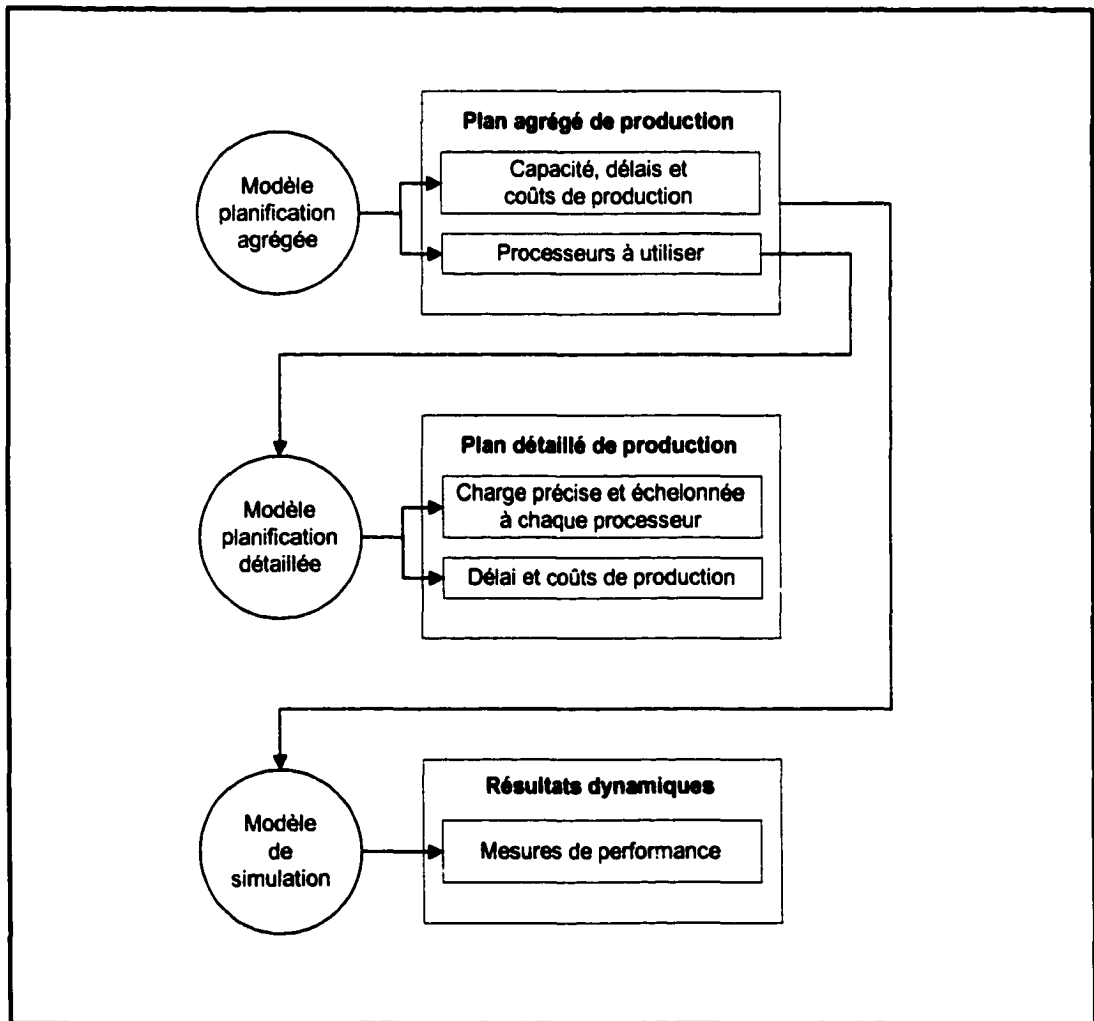


Figure 2 Lien entre les trois modèles

Des modèles d'optimisation ont également été développés pour le procédé de planification associé aux réseaux manufacturiers symbiotiques et aux chaînes d'approvisionnement.

Un problème d'ordonnancement est à la base un problème d'optimisation en nombres entiers. Dès la fin des années 50, plusieurs auteurs ont discuté des formulations de programmation en nombres entiers pour résoudre les problèmes d'ordonnancement (Bowman 1959), (Wagner 1959), (Dantzig 1960), (Manne 1960), (Conway *et al.*, 1967) et (Baker 1974). Plus récemment, Leung *et al.*, (1993), Jiang et Hsiao (1994) et Atmani et Lashkari (1998) ont traité de l'utilisation de la programmation en nombres entiers pour la planification des FMS.

La programmation en nombres entiers (PE) génère un horaire optimal. Cette technique a l'avantage d'être souvent plus réaliste que la programmation linéaire mais le désavantage que les équations résultantes sont difficiles à résoudre. Comme la complexité des problèmes d'ordonnancement croît de façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de variables, la grande majorité des problèmes d'ordonnancement sont NP-complets; c'est-à-dire qu'ils font partie des problèmes les plus difficiles à résoudre. Les algorithmes de PE ne peuvent être appliqués qu'à des problèmes de petite taille (French 1982). Bien que les processeurs d'aujourd'hui soient beaucoup plus puissants et donc capables de résoudre des problèmes de plus grande taille, la résolution de problèmes d'ordonnancement réels à l'aide de la PE demeure très problématique. Un problème de PE ayant des centaines de variables devrait être approché avec un bon degré d'attention et de patience (Northwestern University 2001).

Pinedo (1995) cite par ailleurs trois raisons pourquoi il n'est pas rentable de dépenser beaucoup de temps de calculs pour trouver la solution optimale

aux problèmes d'ordonnancement. D'abord, un modèle est une représentation grossière du problème alors la solution optimale du modèle pourrait ne pas mener à la meilleure solution pour le problème actuel. Ensuite, presque tous les problèmes d'ordonnancement sont NP-complets; ça prendrait un temps énorme pour trouver la solution optimale à l'aide d'un ordinateur. Enfin, en pratique, l'environnement est généralement sujet à une quantité importante de fluctuations aléatoires. C'est pourquoi cet auteur considère qu'il est inutile de rechercher à tout prix la solution optimale.

Le choix du type de modèle d'optimisation est ainsi très important. Un modèle d'optimisation est un compromis entre précision et vitesse de résolution. S'il est essentiel que le modèle soit très précis et que les variables soient des nombres entiers, le temps de résolution sera élevé. Si on peut accepter que les variables soient plutôt représentées par des nombres réels, on y gagnera énormément en temps de résolution. En ordonnancement, lorsque les quantités à fabriquer sont élevées, même si un plan optimal généré par la programmation linéaire proposait par exemple la fabrication de 1978,11 unités, cela n'entacherait pas la pertinence d'un modèle linéaire aux yeux de l'utilisateur averti. Celui-ci arrondirait à 1978 unités et peut-être même à 2000, étant conscient qu'en pratique, les coefficients qui apparaissent dans les contraintes technologiques ne sont pas toujours précis et que le fait d'arrondir ne rendra probablement pas le plan de production irréalisable (Norbert *et al.*, 1999).

Ici, puisqu'on désire effectuer plusieurs tests et qu'on doit faire rouler le modèle de planification très souvent, le modèle a besoin d'être rapide pour être efficace. C'est pourquoi on accepte les approximations provenant de l'utilisation de modèles de planification employant des nombres réels. Il sera démontré que la solution approximative donne tout de même des résultats très satisfaisants.

Une charpente contextuelle permettant d'intégrer différents outils afin d'évaluer quantitativement les réseaux manufacturiers et de les gérer efficacement a été conçue lors de nos travaux antérieurs (Hurtubise *et al.*, 2000). On y expose, entre autres, les modèles de planification agrégée et détaillée de la production employés dans cette présente recherche. La charpente est présentée dans ce qui suit.

1.2 Charpente conceptuelle de gestion de réseaux manufacturiers

Cette charpente est utilisée pour déterminer quelles firmes constitueront un réseau manufacturier particulier et pour effectuer un contrôle de leurs activités. Les phases de conception et de contrôle de réseaux virtuels y sont illustrées et les liens existant entre les réseaux manufacturiers virtuels développés par Olivier *et al.*, (1994, 1996 et 1998) et les réseaux manufacturiers symbiotiques de D'Amours *et al.*, (1996,1999a,1999b) y sont démontrés. Il est ensuite expliqué comment ces réseaux peuvent être intégrés pour permettre l'évaluation de réseaux manufacturiers virtuels, comme solution à plusieurs problèmes qui concernent la planification et le contrôle de la chaîne d'approvisionnement.

Quatre procédés sont utilisés séquentiellement pour gérer les réseaux manufacturiers: la planification agrégée, la planification de la chaîne d'approvisionnement, la planification détaillée et le contrôle de la chaîne d'approvisionnement. La structure des données circulant à travers ces procédés est expliquée dans ce qui suit. La figure 3 présente la légende utilisée pour démontrer la structure du flux de données à travers les procédés de gestion des réseaux manufacturiers, d'après une adaptation de la modélisation de données telle que définie par Pressman (1997).

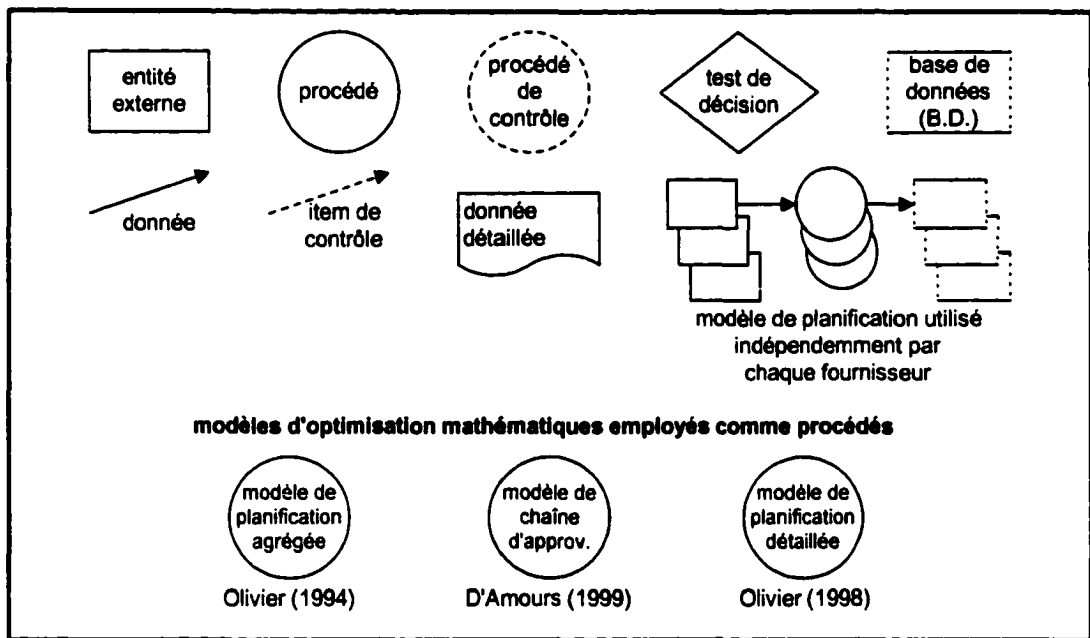


Figure 3 Légende pour la structure du flux de données

1.2.1 Planification agrégée

Initialement, le modèle de planification agrégée (Olivier 1994) est utilisé par chaque fournisseur pour évaluer sa capacité de répondre à une offre. L'approche globale de ce procédé est basée sur un modèle d'optimisation linéaire multi-produits et multi-flux qui minimise les coûts de fabrication et de maintenance dans un réseau flexible de postes de travail. La figure 4 présente un diagramme démontrant le flux de données à travers le modèle de planification agrégée (PA).

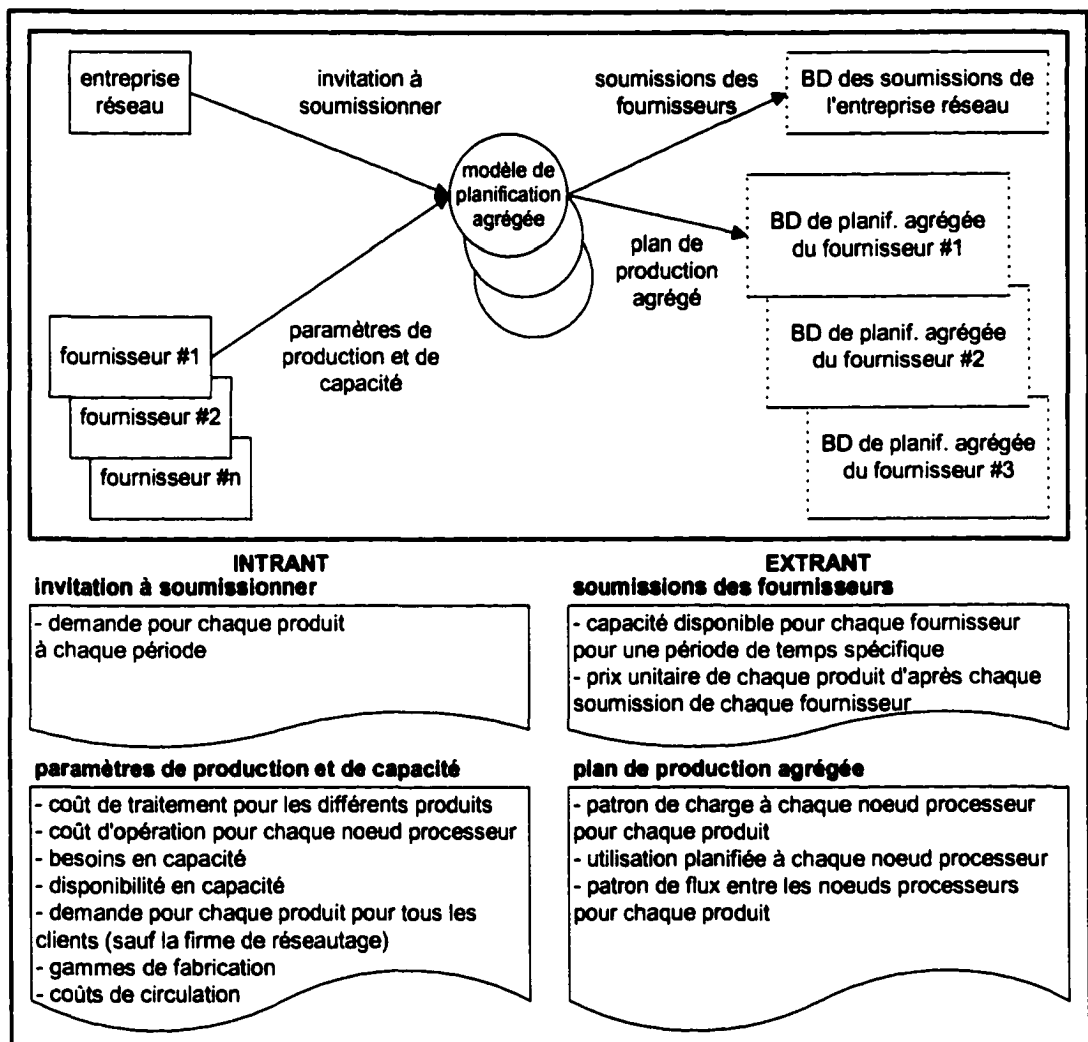


Figure 4 Diagramme du flux de données à travers le modèle de PA

Les paramètres requis à l'entrée du modèle sont les besoins en matières premières et en ressources de la firme soumissionnaire pour rencontrer la demande, tel qu'il est requis dans l'appel d'offres, d'après la nomenclature de produits et la gamme de fabrication. Les paramètres de production et de capacité de la firme sont également nécessaires, comme la demande provenant des autres clients, les coûts d'opération, et les besoins et la disponibilité concernant la capacité. L'information générée par ce modèle compose le plan

de production agrégé. L'information inclut le patron de flux des produits, la distribution de charge parmi les nœuds processeurs et l'utilisation prévue pour ces nœuds. En se basant sur ces résultats, les fournisseurs envoient leurs soumissions à l'entreprise réseau. Les soumissions contiennent la disponibilité en capacité ainsi que les prix pour des périodes de temps spécifiques.

1.2.2 Planification de la chaîne d'approvisionnement

Lorsque toutes les soumissions ont été collectées, l'entreprise réseau utilise le modèle de planification de la chaîne d'approvisionnement (D'Amours 1999b) pour définir quels fournisseurs, sous-traitants, unités d'affaires et transporteurs, parmi ceux constituant le réseau, devraient être choisis afin de rendre le réseau opérationnel et robuste tout en minimisant les coûts d'opération. La figure 5 présente un diagramme démontrant le flux de données à travers le modèle de planification de la chaîne d'approvisionnement (SCM).

Les paramètres requis à l'entrée de ce modèle d'optimisation sont: la collecte des soumissions des firmes soumissionnaires, lesquelles incluent le prix demandé par ces fournisseurs, i.e. les prix unitaires, les escomptes sur volume ainsi qu'une série de coûts sans remise. Ces paramètres sont interprétés par le système et ils sont modélisés pour permettre la minimisation de l'ensemble des coûts d'achat tout en respectant la demande.

L'information générée par ce modèle compose le plan de la chaîne d'approvisionnement. Cette solution identifie quels fournisseurs doivent livrer quels produits et quels sont les volumes spécifiés. Cette information est utilisée pour négocier les prix, les quantités obligatoires et d'autres conditions ainsi que les termes du contrat. L'entreprise réseau avise ensuite ses fournisseurs si leur soumission a été victorieuse. L'entreprise réseau fixe également les bornes,

c'est-à-dire les étapes, auxquelles un fournisseur devra générer un rapport de production, aux fins de contrôle.

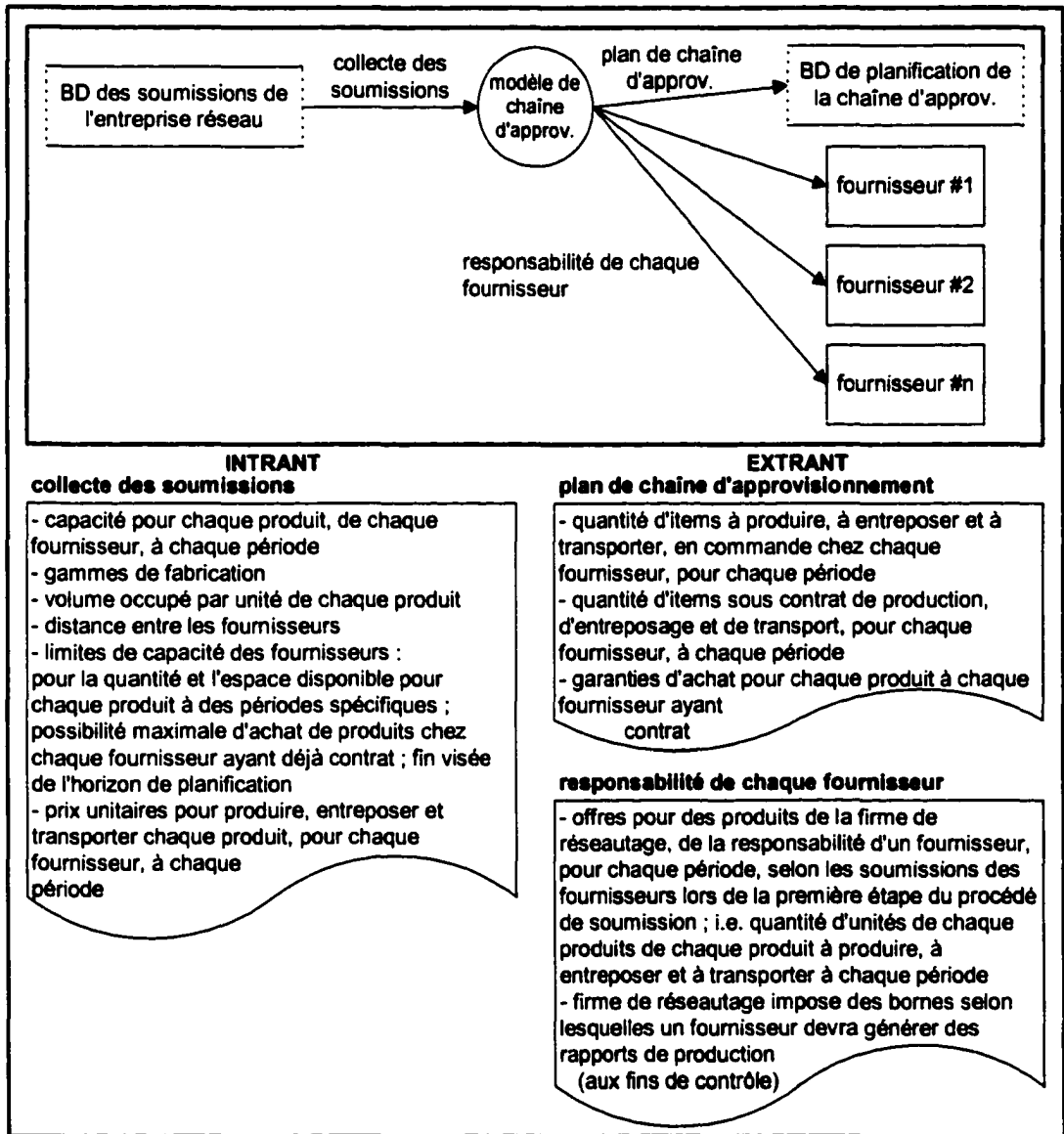


Figure 5 Diagramme du flux de données à travers le modèle de SCM

1.2.3 Planification détaillée

Le modèle de planification détaillée (Olivier 1998) est ensuite utilisé individuellement par chaque fournisseur pour générer le plan de production détaillé de ce fournisseur. Tout comme le procédé de planification agrégée, il est basé sur un modèle d'optimisation linéaire. Le modèle minimise les coûts de fabrication, de manutention et d'entreposage dans un réseau agile de postes de travail.

En planification agrégée, les données sont habituellement accumulées en périodes journalières ou hebdomadaires, c'est-à-dire que les données échelonnées du système manufacturier sont regroupées par périodes d'une journée ou d'une semaine. En planification détaillée, ces périodes devraient être plus courtes afin de générer un plan précis. La longueur d'une période dépend du niveau de précision désiré. La complexité du système doit toutefois être réduite à cause du nombre considérable et de la diversité des processeurs potentiels. C'est pourquoi le modèle détaillé assigne une charge de travail échelonnée et précise seulement aux nœuds processeurs qui ont été identifiés lors de la première étape du procédé de soumission.

La figure 6 présente un diagramme démontrant le flux de données à travers le modèle de planification détaillée (PD). Le flux des données est similaire à celui du modèle de planification agrégée, la principale différence étant la dimension de la période de temps. Chaque fournisseur envoie ensuite son plan de production détaillé à l'entreprise réseau afin que cette dernière puisse le comparer aux rapports de production lors du procédé de contrôle.

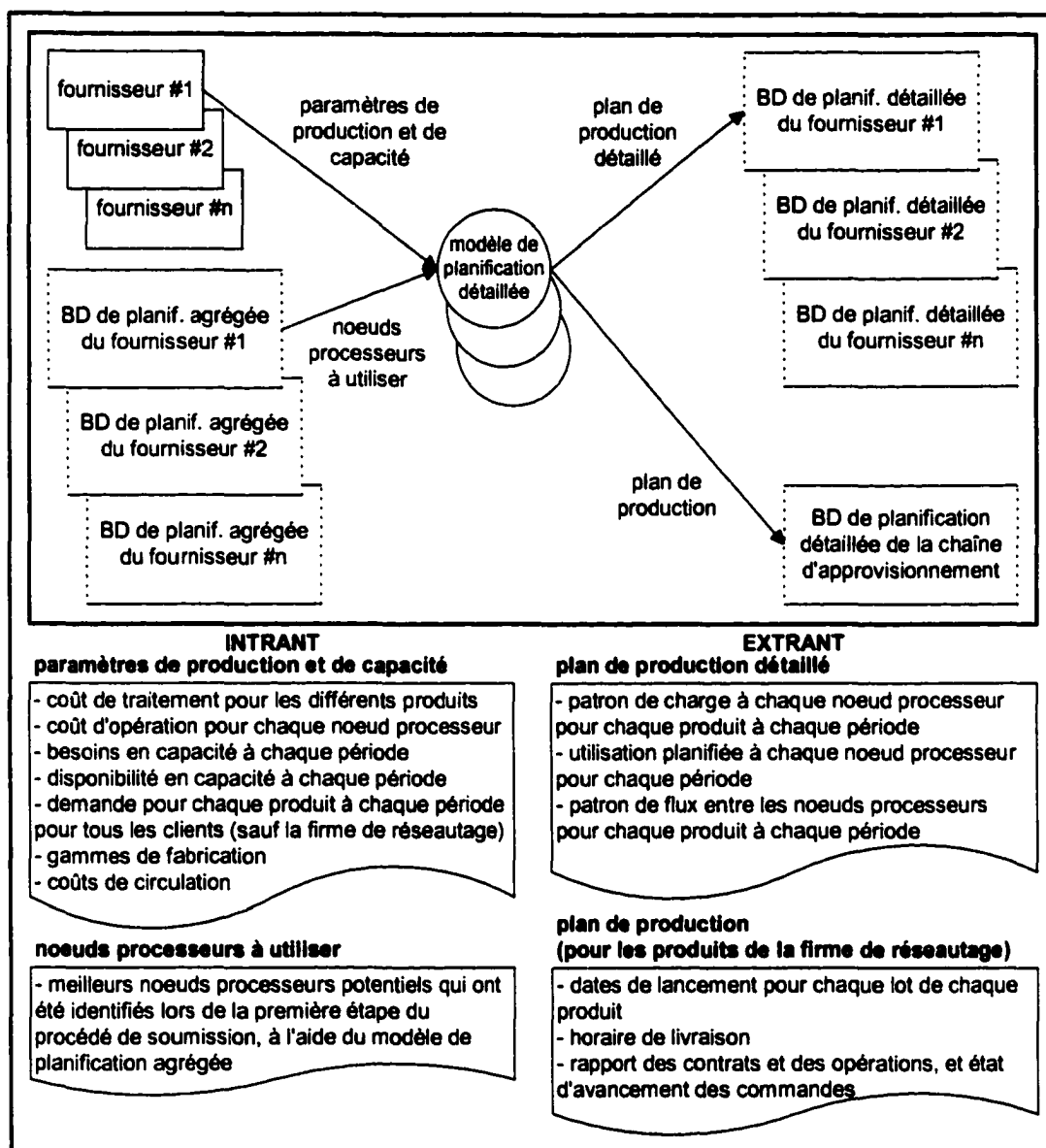


Figure 6 Diagramme du flux de données à travers le modèle de PD

1.2.4 Contrôle de la chaîne d'approvisionnement

Comme il a été noté précédemment, l'entreprise réseau doit exercer un contrôle sur les opérations de ses fournisseurs pour s'assurer que les livraisons seront effectuées à temps. La rigueur du contrôle dépend du niveau de confiance existant entre l'entreprise réseau et un fournisseur, ainsi que de la fiabilité du fournisseur. Il est très important d'identifier des partenaires efficaces et fiables mais il s'agit d'une tâche complexe. A ce sujet, le lecteur peut se référer à Copacino (1997), qui trace un cadre d'identification des partenaires lors d'alliances manufacturières. Tsay *et al.*, (1999) résumant quant à eux, des modèles de contrats utilisés lors de la composition de chaînes d'approvisionnement et en fournissent une description ainsi qu'une classification. D'Amours *et al.*, (1999a) décrivent l'impact de l'échange d'information entre les partenaires et développent un modèle pour obtenir le nombre de firmes en réseau et leur niveau d'intégration.

La figure 7 présente une procédure générale pour le contrôle. Cette procédure implique une comparaison entre le plan de production détaillé de l'entreprise réseau et les rapports de production des fournisseurs.

Ces rapports devraient être générés systématiquement, à une fréquence déterminée par les bornes fixées par l'entreprise réseau; par exemple, un rapport pourrait être requis chaque fois que 25% de la production est complétée. Le rapprochement des bornes dépend du niveau de confiance qui existe entre l'entreprise réseau et un fournisseur ainsi que sur la fiabilité du fournisseur. Si le plan de production détaillé et le rapport de production coïncident, cela indique que le premier a été respecté. Une vérification future sera effectuée en fonction de la prochaine borne de contrôle.

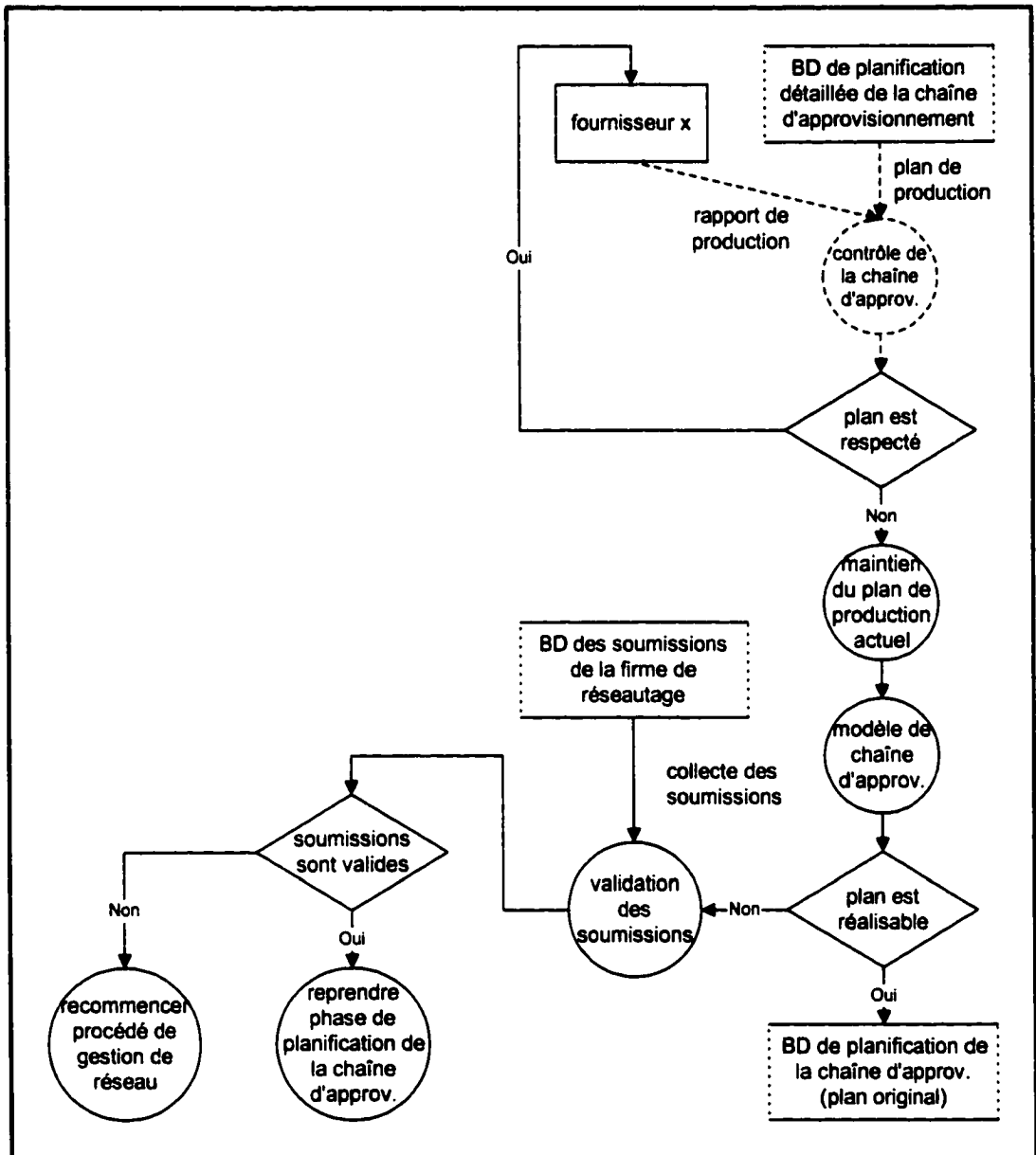


Figure 7 Procédure générale pour le contrôle

Si la production ne respecte pas le plan détaillé et qu'elle est retardée, il y a un risque que le fournisseur ne puisse livrer à temps. Le gestionnaire de la chaîne d'approvisionnement doit vérifier si ce fournisseur possède suffisamment

de capacité disponible dans son plan pour lui permettre de rencontrer ses engagements. Cela peut être effectué à l'aide du modèle de planification de la chaîne d'approvisionnement tout en maintenant le plan de production présentement assigné aux autres fournisseurs. Les seules variables qui demeurent alors sont celles qui modélisent la production assignée au fournisseur en retard sur son horaire. Si ce fournisseur a suffisamment de capacité pour honorer son contrat, le plan original pour la chaîne d'approvisionnement est conservé et seul le plan détaillé de production de ce fournisseur est modifié. Dans ce cas, la supervision du fournisseur tardif sera resserrée afin de s'assurer qu'il respecte le nouveau plan.

Cependant, si le fournisseur dont la production est en retard ne possède pas suffisamment de capacité pour rencontrer ses engagements, on devra probablement déterminer un nouveau plan pour la chaîne d'approvisionnement. L'obligation de produire un nouveau plan devrait être évitée à tout prix. Mais advenant le cas où cela soit nécessaire, le gestionnaire de la chaîne d'approvisionnement devrait alors s'assurer auprès des fournisseurs que toutes les soumissions collectées initialement sont toujours valides. Il y a deux possibilités. Si elles sont toujours valides, la phase de planification de la chaîne d'approvisionnement doit être exécutée à nouveau avec ces mêmes soumissions. Sinon, le processus de conception doit être recommencé au complet, à partir des appels d'offres jusqu'à la planification détaillée.

1.3 Simulation par événements discrets

Dans le présent travail de recherche, on utilise le modèle de planification détaillée afin de concevoir un plan de production qui soit basé sur les résultats générés par le modèle de planification agrégée.

Bien que les modèles d'optimisation aient l'avantage d'être assez rapides pour résoudre un problème, ces modèles fournissent des mesures statiques de performance et ne peuvent donc pas fournir de renseignements sur l'aspect dynamique du système. Pour s'assurer que l'information générée par ces modèles est toujours valide quand la variabilité et la dynamique du procédé sont pris en compte, on applique alors ensuite la simulation par événements discrets pour valider les résultats des modèles linéaires à l'aide de mesures dynamiques de la performance du système.

La simulation par événements discrets (SED) est une technique descriptive selon laquelle le modèle d'un procédé est développé puis des essais sont conduits sur le modèle afin d'évaluer son comportement sous diverses conditions. La simulation permet aux preneurs de décision de tester leurs solutions sur un modèle qui représente assez précisément le procédé réel (Pritsker *et al.*, 1997) (Bateman *et al.*, 1997) (Stevenson 1999b).

Les progrès de l'informatique et la reconnaissance croissante des capacités de la simulation ont contribué à l'augmentation du niveau d'intérêt pour l'utilisation de la SED comme outil d'amélioration de la productivité. Des études effectuées par le passé démontrent combien la simulation peut être utile lors de la conception et de l'opération de divers systèmes de production (Fox 1991) (Graehl 1992) (Gupta et Arasakesari 1991) (Jeyebalan et Otto 1992) (Gunal *et al.*, 1994). La SED est un important outil d'analyse lors de la conception de systèmes complexes.

Lors de l'analyse de systèmes discrets complexes, la fonction objectif ne peut pas toujours être exprimée sous forme d'une fonction explicite des paramètres d'entrée. Elle implique plutôt des mesures de performance du système global, dont les valeurs ne peuvent être obtenues qu'en exécutant le

modèle de simulation ou en observant le système actuel. De plus, à cause de la très grande taille et de la complexité inhérente à la plupart des systèmes, les méthodes purement analytiques sont souvent insuffisantes pour permettre l'optimisation du système. Dans ce cas, on peut recourir à la simulation. Un des principaux avantages de la SED est qu'elle permet d'incorporer la dynamique, de même que la variation et les interdépendances d'un système dans le modèle. Elle apporte ainsi un complément important d'information concernant les aspects dynamique et aléatoire du système, ainsi que la variabilité de différentes mesures de performance. Son désavantage majeur est son coût en terme de temps et d'argent. Même si certains systèmes peuvent être traités analytiquement, l'effort requis pour évaluer la solution peut être si intense que la simulation informatique devient dans ces conditions plus attirante (University of Baltimore 2001).

Ainsi, depuis les années 70, l'application de la SED est très répandue. Par exemple, Vasilash (1995), Black *et al.*, (1996) et Berkin *et al.*, (1995) présentent des cas où la SED a été employée pour la construction de systèmes manufacturiers, notamment dans l'industrie automobile. Ulgen *et al.*, (1993,1994) proposent une méthodologie pour l'application efficace de la simulation dans cette même industrie. Geller *et al.*, (1995) décrivent quant à eux l'application de la SED pour la modélisation des chaînes d'approvisionnement ainsi que des usines virtuelles. Ces auteurs démontrent que l'utilisation de la simulation lors des phases de conception et de mise en œuvre apporte des renseignements précieux sur les procédés des différents niveaux afin de permettre de comprendre leurs impacts avant que les contrats ne soient conclus.

La simulation a été employée pour évaluer différentes stratégies concernant l'ajustement des niveaux d'inventaire de pièces chez un fournisseur

automobile et l'impact qu'aurait la mise en œuvre d'une stratégie commune à travers un groupe de fournisseurs sur l'ensemble des niveaux d'inventaires (Clay et Grange 1997). Banks (1998) présente lui aussi une discussion sur les applications de la SED pour la conception et la gestion des opérations d'usines de fabrication et d'assemblage dans l'industrie automobile.

1.4 Mesures de performance

Ce travail de recherche vise la conception des chaînes d'approvisionnement. Mais le modèle de planification détaillée et celui de simulation permettent également d'évaluer le comportement d'un système soumis à diverses contraintes. Cet emploi est illustré à l'aide du système manufacturier servant d'exemple. Il devient alors nécessaire de définir les différentes mesures de performance considérées pour l'évaluation.

Plusieurs variantes affectent le comportement d'un système manufacturier flexible. Les objectifs visés lorsqu'un système manufacturier est en fonction devraient aussi valoir au moment de sa conception. Aussi, les mesures de performance considérées lors de l'ordonnancement ont également de l'importance au moment de la conception d'un FMS. Lors de la conception d'un FMS, il est donc important de bien définir les critères et les paramètres qui influenceront la performance globale du système lors de son opération et de considérer ces facteurs dans l'analyse.

Par exemple, la demande des consommateurs, les taux de production, les taux de rejet, les temps de livraison de la matière première et des produits finis, les taux de pannes et de réparation, ainsi que les capacités de stockage sont des variantes qui ont une influence considérable (Wyland *et al.*, 2000).

L'objectif global de l'ordonnancement d'un FMS est de minimiser ses frais généraux et ses coûts d'opération, tout en satisfaisant la demande. Cet objectif principal englobe également un ensemble d'objectifs secondaires, qui sont de : rencontrer les dates d'échéance ; maximiser l'utilisation du système et des machines ; minimiser les inventaires d'encours ; minimiser les temps de mise en course et les changements d'outils ; maximiser le taux de production ; minimiser le temps moyen dans le système ; et balancer l'utilisation des machines (Smith *et al.*, 1986).

Fox et Smith (1984) ont identifié les contraintes de l'ordonnancement d'un FMS comme étant un compromis de contraintes physiques, de restrictions causales, de contraintes de disponibilité et de contraintes de préférences. Les contraintes physiques concernent le temps de mise en course, la capacité des machines, le temps de traitement, etc. Les restrictions causales concernent les alternatives d'opérations et de machines ainsi que les outils et le matériel nécessaires. Les contraintes de disponibilité concernent les pannes de machines, les horaires, etc. Les contraintes de préférences concernent quant à elles, les préférences d'opérations, de machines et de séquences.

Les chercheurs proposent de viser une variété d'objectifs lors de l'ordonnancement. Selon Rinnooy Kan (1976), les objectifs peuvent être basés sur le temps d'exécution, les coûts d'utilisation et d'inventaire ainsi que sur les dates d'échéance. Tandis que d'après Smith *et al.*, (1986), les critères les plus importants sont de : rencontrer les dates d'échéance ; maximiser l'utilisation du système et des machines ; minimiser les inventaires d'encours ; maximiser les taux de production ; minimiser les délais de mise en course et de changement d'outils ; minimiser les temps moyens dans le système ; et balancer l'utilisation des machines. Grant et Clapp (1988) considèrent quant à eux, plusieurs autres critères importants. D'après ces auteurs, la considération principale est de

maximiser le rendement tout en s'assurant que les dates d'échéance sont rencontrées. Ils mentionnent que les coûts d'inventaires devraient être maintenus à un niveau acceptable et que l'équipement, le personnel ainsi que les autres ressources limitées devraient être bien utilisées. Ils ajoutent que les charges de travail devraient être balancées et qu'advenant un événement inattendu, les adaptations devraient être effectuées rapidement.

Balogun et Popplewell (1999) présentent, entre autres, les mesures de performance habituellement considérées lors de l'ordonnancement de FMS. Ces auteurs indiquent que les objectifs de l'ordonnancement peuvent soit être reliés à la satisfaction des besoins des clients ou bien aspirer essentiellement à l'efficacité interne du système manufacturier. Ils proposent que les objectifs relevant directement de la demande des consommateurs soient employés comme objectifs primaires dans l'ordonnancement dynamique d'un FMS et que les objectifs reliés à l'efficacité interne du FMS jouent un rôle secondaire. Ces objectifs sont illustrés au tableau 1.

Les objectifs primaires sont axés sur la minimisation des retards, la rencontre des dates d'échéance, la minimisation des délais de livraison et l'atteinte un haut degré de flexibilité. Les objectifs secondaires sont plutôt axés sur l'efficacité du transport et de l'usinage ainsi que sur l'utilisation de la capacité.

Choobineh (1986) a écrit que les bénéfices d'un FMS sont divisés en deux classes : les bénéfices stratégiques, qui sont listés au tableau 2 et ceux tactiques, listés au tableau 3. Il a également cité les éléments de coûts considérés lors de l'évaluation d'un FMS. Ces coûts sont énumérés au tableau 4

Tableau 1

Les objectifs de l'ordonnement d'un FMS

Objectifs primaires	Objectifs secondaires			
S'intéressant directement à la satisfaction de la demande des clients	S'intéressant à l'efficacité interne d'un FMS, et en particulier			
Minimisation du temps total de production Minimisation du temps entre les lots de production Minimisation des retards Minimisation du nombre de tâches en retard Flexibilité pour rencontrer rapidement les demandes de changement de ressources	Efficacité du transport Optimisation des déplacements du matériel de manutention Minimisation du coût ou de la distance des déplacements inter-cellulaires Minimisation du nombre total de pièces transférées Optimisation du trajet des AGV Minimisation des trajets d'AGV vides	Efficience de l'usinage Maximisation de l'utilisation moyenne des machines Minimisation du temps et du coût de l'usinage Minimisation de la disparité dans l'utilisation des machines Minimisation des changements outils Minimisation du temps non productif Flexibilité pour rencontrer rapidement les changements de la disponibilité des ressources	Utilisation de la capacité Maximisation de l'utilisation du FMS Minimisation de la duplication de machines Minimisation du temps global de fabrication	Autres Minimisation du temps total de complétion Minimisation du nombre de lots Minimisation de la variation dans la charge des cellules Maximisation de la similarité des machines dans une cellule Maximisation de l'association des opérations sur les pièces avec les machines Minimisation des inventaires d'encours

Tableau 2

Bénéfices stratégiques d'un FMS

Meilleurs avantages compétitifs Capacité d'ajustement à des cycles de vie variés des produits Développement de l'expertise d'ingénierie et de gestion Moins de cas de malaises de la main-d'oeuvre Image de chef de file dans l'utilisation de nouvelles technologies Capacité d'introduire des produits sur le marché plus rapidement

Référence : Choobineh (1986)

Tableau 3

Bénéfices tactiques d'un FMS

Diminution des inventaires d'encours Réduction des temps de mise en course Réduction du délai de fabrication Réduction de la variabilité du délai de fabrication Diminution des coûts d'accessoires et de gabarits Amélioration du contrôle de fabrication Amélioration de la qualité Réduction du taux de rebuts Réduction de la surface de plancher utilisée Réduction des coûts de main-d'œuvre Réduction des coûts de l'outillage Réduction du travail à reprendre Meilleur monitoring des machines, des outils et du matériel de manutention Amélioration de la gestion des données Amélioration du contrôle des opérations Amélioration du contrôle des pièces Amélioration du temps de réponse aux variations de la demande Amélioration de la capacité de s'ajuster aux pannes de machines Amélioration des conditions de travail Amélioration de la capacité de réponse aux changements de concept ou de procédé
--

Référence : Choobineh (1986)

Les bénéfices stratégiques du tableau 2 sont qualitatifs. Ce sont donc des critères subjectifs dont l'importance sera variable d'un individu à l'autre. Il est plus difficile d'évaluer le poids relatif de tels critères lors du choix d'un système

manufacturier. Par contre, les bénéfices tactiques du tableau 3 ainsi que les éléments de coûts du tableau 4 sont des critères quantitatifs. C'est-à-dire qu'ils sont mesurables et qu'ils peuvent donc être évalués plus facilement par les méthodes économiques traditionnelles de l'ingénieur.

Tableau 4

Éléments de coûts considérés lors de l'évaluation d'un FMS

Conception du système
Capital pour les machines-outils et le matériel de manutention
Installation et formation
Outillage
Accessoires et gabarits
Programmation
Entretien
Ordinateurs et réseau de communication
Inspection
Main-d'oeuvre et supervision
Travail à reprendre et rebuts
Charge (<i>burden</i>)
Énergie
Surface de plancher
Inventaire de matière première
Inventaire d'encours
Inventaire de produits finis
Estimation de la durée de vie des équipements
Estimation de la valeur de récupération des équipements
Patron de la demande de pièces pour la durée de vie des équipements

Référence : Choobineh (1986)

Comme il vient d'être mentionné, la prise de décision lors de l'implantation d'un système manufacturier agile ou d'un réseau manufacturier virtuel n'est pas seulement stratégique mais implique également des sujets de niveaux tactiques et opérationnels. L'activité de décision est alors caractérisée par la présence de critères qualitatifs et quantitatifs impliquant des facteurs sociaux et économiques. En présence d'une multiplicité de critères inhérents lors d'une telle situation de prise de décision, on ne peut recourir aux méthodes traditionnelles d'évaluation. Dans ce cas, la méthodologie de la prise de

décision multicritère pourrait être utilisée comme fond d'analyse. Cette méthode fournit une structure compréhensive pour combiner les valeurs intuitives, rationnelles et irrationnelles des individus et elle réunit la perception et les objectifs en une synthèse générale. Pour plus d'information, le lecteur pourra se référer à (Saaty 1980), (Kim 1986), (Wabalickis 1988), (Gupta *et al.*, 1991) et (Myint et Tabucanon 1994).

Le présent travail se situe au niveau de la phase de conception de chaînes d'approvisionnement dans un contexte de systèmes manufacturiers agiles. Dans l'exemple présenté ici, seuls quelques critères quantitatifs visant l'efficacité interne d'un FMS sont considérés lors de l'évaluation des réseaux afin de démontrer la méthodologie. Il s'agit du temps global de fabrication, du délai de fabrication des produits, du taux d'utilisation des machines, des coûts de circulation des produits ainsi que des niveaux d'inventaire.

Le temps global de fabrication est le délai de fabrication de la dernière unité complétée. Il représente le temps requis pour compléter toutes les unités d'une commande. Le délai de fabrication est la durée nécessaire à la production d'une unité depuis le lancement de l'ordre de fabrication jusqu'à la livraison du produit, ce qui correspond au temps passé dans le système par un produit. Le taux d'utilisation des machines est une mesure du degré d'emploi d'une ressource qu'on obtient par le rapport entre le temps productif d'une machine et le temps disponible. Le coût de circulation est lié au déplacement des produits entre deux postes de travail ou entre un poste et un lieu de stockage. L'inventaire est l'ensemble des matières premières, des produits semi-finis et des produits finis qui sont conservés par une entreprise, soit dans des tampons entre divers postes de travail ou dans un entrepôt centralisé (de Villiers *et al.*, 1993). Ces différentes mesures nous permettent de prendre de meilleures

décisions lors de la conception d'un système manufacturier et de déterminer les paramètres qui offrent les meilleures performances.

1.5 Structure du mémoire

Le chapitre suivant présente le système manufacturier étudié, soit un système manufacturier flexible de fabrication et d'assemblage de tableaux de bord pour automobiles, lequel est tiré d'un cas réel. Les différentes techniques d'évaluation sont appliquées à cet exemple.

Dans le troisième chapitre, un modèle d'optimisation linéaire pour la planification agrégée de la production est développé. Ce modèle sert d'abord à déterminer la capacité d'un fournisseur à répondre à l'appel d'offre d'une entreprise réseau. On obtient le coût de circulation du plan de production, le patron de flux entre les niveaux de processeurs ainsi que le patron de charge des processeurs. Plusieurs scénarios sont simulés, utilisant trois propositions de réseau, afin de les comparer. Après quoi on reprend le modèle en faisant varier le taux d'utilisation maximal permis pour les processeurs afin de tester la faisabilité des plans agrégés lorsqu'ils sont reportés dans le modèle détaillé. Les résultats sont agrégés ici en périodes journalières.

Dans le chapitre quatre, un modèle d'optimisation linéaire pour la planification détaillée de la production est construit. Il a été mentionné que le modèle de planification détaillée assigne une charge de travail seulement aux nœuds processeurs qui ont été identifiés par le modèle agrégé lors de la première étape du procédé de soumission. C'est donc ici qu'est créé le lien entre les deux modèles, où les variables de sortie du modèle agrégé deviennent les paramètres d'entrée du modèle détaillé. Plusieurs scénarios sont par la suite simulés afin de voir l'impact qu'ont certains paramètres sur les mesures de

performance du système et particulièrement sur les patrons de flux entre les niveaux de processeurs et les patrons de charge des processeurs.

Dans le cinquième chapitre, un modèle de simulation par événements discrets est conçu, d'une part, pour valider les résultats générés par le modèle de planification détaillée et, d'autre part, pour obtenir des mesures de performance dynamiques du système. Pour ce faire, on cherche à reproduire un des plans générés par le modèle de planification agrégée à l'aide du modèle de simulation.

Le chapitre six expose une interprétation des résultats en comparant les solutions obtenues à l'aide du modèle de planification détaillée et celles générées par le modèle de simulation. Une discussion est ensuite proposée quant aux champs d'application propres à chaque outil ainsi qu'à leurs forces et leurs faiblesses.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU CAS ÉTUDIÉ

2.1 Introduction

Le système étudié est tiré du cas d'une compagnie qui fabrique et assemble des tableaux de bord pour l'industrie automobile. Le système manufacturier est composé d'un ensemble de processeurs agiles, reliés entre eux par des liens temporaires, dans un réseau flexible. Un ensemble de réseaux a été proposé, parmi lesquels trois ont été retenus afin de démontrer nos approches de planification des réseaux manufacturiers agiles et des chaînes d'approvisionnement. Les réseaux retenus sont modélisés et évalués à l'aide des modèles d'optimisation et du modèle de simulation.

L'éventail des produits offerts par la compagnie a été agrégé à six modèles de tableaux de bord. La gamme de fabrication des produits a également été agrégée pour comporter quatre niveaux. Pour cet exemple, les tableaux de bord sont constitués de trois ou quatre cadrans. Il s'agit de compte-tours, de compte-tours et d'indicateurs généraux pour le niveau d'essence et la pression d'huile. Le dernier niveau des postes de production est composé de processeurs utilisés pour effectuer l'assemblage final des tableaux de bord. Ce sont les processeurs de type [C]. Le troisième niveau est composé de processeurs pour l'assemblage des compte-tours [S], des compte-tours [T] et des indicateurs généraux [G]. Les compte-tours et les compte-tours sont formés chacun par l'assemblage de deux composantes. Ces composantes sont appelées [AS] et [BS] pour les cadrans

[S], et [AT] et [BT] pour les cadrans [T]. Ces composantes sont fabriquées au second niveau. Le premier niveau, quant à lui, est composé de processeurs fabricant des bobines [B] qui sont requises dans la fabrication des [BS], des [BT] et des [G]. La figure 8 présente la gamme de fabrication des produits.

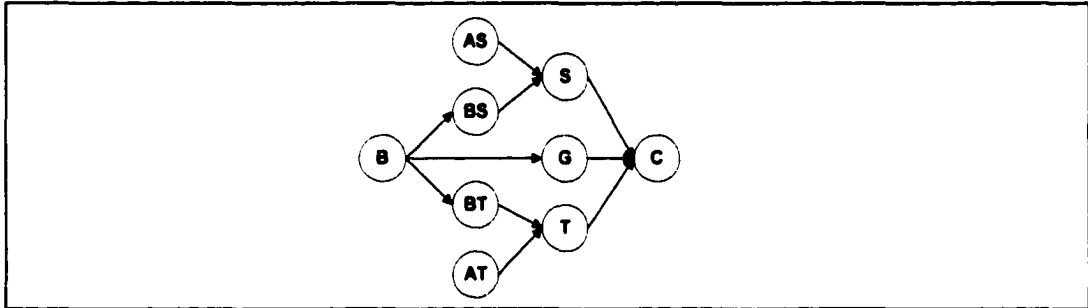


Figure 8 Gamme de fabrication des produits

Les trois réseaux retenus pour cette étude sont présentés à l'annexe A. Ils sont identifiés comme étant les *réseau-02*, *réseau-05* et *réseau-06*. La figure 9 présente une portion du réseau-05 et est expliquée dans ce qui suit. Les composantes circulent à travers le système manufacturier depuis le premier niveau jusqu'au dernier, selon la gamme de fabrication de chaque produit. On peut remarquer que les postes de fabrication des bobines [B1 à B6] côtoient les postes d'assemblage des indicateurs de type [G, S et T]. Ces quatre types de processeurs sont situés au centre du système et sont disposés en alternance afin de constituer un réseau efficace.

Les postes du premier niveau sont les postes de fabrication [AS1 et AS2] (en bas à droite), [AT1 et AT2] (non montrés) ainsi que les postes [B1 à B6] (au centre). Les postes du second niveau sont les postes [BS] et [BT] (en bas à gauche). Les postes du troisième niveau sont les postes d'assemblage des indicateurs généraux [G1 à G5], des compte-tours [S1 à S5] et des compte-

tours [T1 à T4] (tous au centre). Enfin, les postes du dernier niveau sont les processeurs d'assemblage final [C1 à C10].

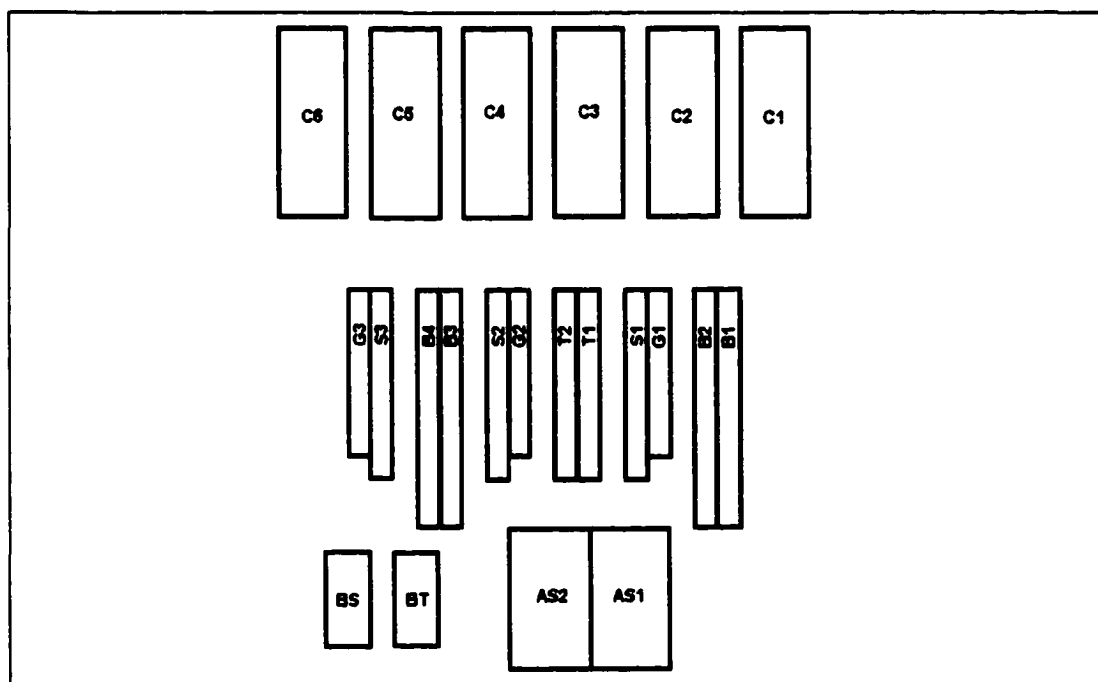


Figure 9 Portion du réseau-05

Chaque modèle de tableau de bord a une composition différente. La demande quotidienne moyenne pour chaque produit est connue. La demande utilisée pour les différents tests ainsi que la composition des cadrans de chaque modèle de tableau de bord sont présentées au tableau 5. Par exemple, le modèle A est constitué de deux indicateurs généraux, d'un compte-tours et d'un tachymètre. Le tachymètre du modèle A n'est pas fabriqué par la compagnie mais provient plutôt d'un fournisseur. Ce cadran est alors indiqué par S-Ext pour préciser qu'il provient de l'extérieur.

Tableau 5

Demande quotidienne et composition des modèles

PRODUIT	DEMANDE	COMPOSITION			
		G	T	S	S-EXT
A	1512	2	1	0	1
B	3349	1	1	0	1
C	5625	2	1	1	0
D	713	1	0	1	0
E	532	1	1	1	0
F	5424	2	0	1	0

Les processeurs du dernier niveau [C] sont en fonction 16 heures par jour tandis que ceux des autres niveaux fonctionnent 24 heures par jour. Un coût est également associé à la circulation de chaque pièce entre les postes des différents niveaux. Ces coûts dépendent de la distance entre les postes et ils varient en fonction du réseau utilisé. Les coûts de circulation pour les trois réseaux sont donnés à l'annexe B. Si on revient à la figure 9 qui montre une portion du réseau-05, on remarque que le poste AS1 est plus près du poste S1 que du poste S2. C'est pourquoi le coût de circulation de AS1 vers S1 est moins élevé que celui de AS1 vers S2 pour ce réseau.

2.2 Hypothèses de travail

Dans ce travail de recherche, on doit poser des d'hypothèses concernant la structure des problèmes d'ordonnancement. Certaines ont été mentionnées explicitement ou implicitement dans le texte précédent. Voici une liste des principales hypothèses posées.

- **Il n'y a aucune variabilité. En particulier**
 - **La demande pour chaque produit est déterministe et elle correspond à la demande quotidienne moyenne pour chaque produit.**
 - **Le temps de traitement à chaque processeur est connu et est fixe.**
- **Tous les postes d'un même type sont flexibles et peuvent ainsi fabriquer ou assembler les produits appartenant à n'importe quel modèle de tableau de bord.**
- **Le système de transport est considéré comme étant le même partout alors les coûts de circulation sont directement proportionnels à la distance entre les processeurs.**
- **Les coûts de traitement sont considérés identiques pour des processeurs de même type. Ces coûts ont donc pu être négligés dans le calcul.**
- **Les inventaires d'encours sont permis et, sauf indication contraire, leur niveau est illimité.**
- **Les processeurs ne peuvent traiter plus d'une pièce à la fois.**
- **Les postes ne peuvent tomber en panne et, sauf indication contraire, ils sont disponibles sur toute la durée de leur horaire de production.**
- **Les délais de mise en place sont suffisamment courts pour être négligés.**

Les trois prochains chapitres présentent l'emploi du modèle de planification agrégée, de celui de planification détaillée ainsi que de la simulation par événements discrets dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement. Le procédé manufacturier qui vient d'être présenté est modélisé à l'aide de ces outils, puis plusieurs scénarios sont testés. Les résultats de chacun sont par la suite interprétés et comparés.

CHAPITRE 3

MODÈLE DE PLANIFICATION AGRÉGÉE DE LA PRODUCTION

3.1 Introduction

Cette section présente comment le modèle de programmation linéaire développé par Olivier *et al.*, (1994) pour la planification agrégée de la production a été adapté pour le cas de l'usine de fabrication des tableaux de bord. Comme il a été mentionné dans l'introduction, ce modèle est principalement employé dans le cadre de la gestion de chaînes d'approvisionnement. Il est utilisé par les fournisseurs qui désirent répondre à l'offre d'une entreprise réseau, d'une part pour évaluer leur capacité de production et d'autre part pour identifier les nœuds et les tronçons qui seront employés dans le plan détaillé. Ce modèle peut également être utilisé pour comparer différentes configurations de réseau et pour éliminer, le cas échéant, celles offrant des performances non satisfaisantes. La problématique entourant la gestion des réseaux manufacturiers virtuels et de la chaîne d'approvisionnement a été présentée dans l'introduction. Ici, l'usine de fabrication des tableaux de bord représente un des nœuds de la chaîne d'approvisionnement. On désire effectuer la planification agrégée de ce nœud dans un premier temps pour comparer différentes configurations de réseaux et dans un second temps afin de démontrer l'utilité de cette méthode dans le contexte de la gestion de chaînes d'approvisionnement.

L'objectif du modèle développé est de déterminer des patrons de flux entre les processeurs et les patrons de charge de ces processeurs qui minimisent l'ensemble des coûts, pour des réseaux flexibles de processeurs en contexte de production agile.

Le flux définit la quantité d'items circulant entre deux processeurs du réseau. Les patrons de flux sont l'ensemble des liens déterminés entre les processeurs. Ces liens représentent les réseaux manufacturiers virtuels qui sont créés pour rencontrer la demande d'une journée de production (Olivier *et al.*, 1994). Les patrons de travail représentent quant à eux la charge de chacun des processeurs en terme de produits à fabriquer et de quantité requise pour chacun.

Le réseau est composé de groupes de processeurs indépendants œuvrant à la fabrication de produits. Dans le cas présent, les processeurs sont très flexibles. Ils peuvent ainsi traiter tous les types de produits et passer rapidement d'un type à l'autre avec un délai de mise en course négligeable.

3.2 Modèle d'optimisation linéaire pour la planification agrégée

Le modèle utilisé pour effectuer la planification agrégée de la production consiste en un modèle d'optimisation linéaire avec des variables en nombres réels. Le fait d'utiliser des nombres réels plutôt que des nombres entiers rend le modèle bien plus rapide à résoudre. Le modèle est divisé en deux sections. La première section permet de balancer les flux entre les postes tout en s'assurant que les différentes contraintes de capacité et de demande sont rencontrées et que l'ensemble des coûts d'opération, de production et de transport sont minimisés.

La deuxième section du modèle permet d'inclure un lissage de la charge et du flux entre les postes tel qu'il se produirait dans un environnement flexible. Cela permet de reproduire l'étalement naturel et de mieux refléter la réalité. Dans le présent travail, le modèle agrégé est utilisé pour vérifier la faisabilité d'un plan de production et connaître les délais de fabrication associés; alors seule la première section du modèle mathématique est requise. Cette partie du modèle mathématique est présentée au tableau 6 et le glossaire des indices, paramètres et variables est présenté au tableau 7. Les équations sont expliquées dans ce qui suit.

3.3 Description des équations

La fonction objectif du modèle, l'équation (3.1), se divise en trois sections. La première partie de l'équation vise à minimiser le coût des flux entre les différents processeurs internes au réseau. Les termes suivants permettent de minimiser les coûts de production à chacun des processeurs. Ces coûts sont définis comme étant les coûts marginaux de production ainsi que les coûts d'introduction et d'extraction de composantes ou de sous-assemblages à chacun des processeurs. Enfin, la troisième partie minimise les coûts d'utilisation de chaque processeur. Le coût des flux est proportionnel à la distance parcourue par une pièce entre deux processeurs. Les coûts de production sont appliqués à chaque pièce produite à un poste et ils varient donc en fonction du nombre de pièces traitées. Les coûts d'utilisation ne sont pas influencés par la quantité de pièces traitées mais varient seulement en fonction de la durée d'utilisation des postes.

Les contraintes sont utilisées afin de s'assurer du bon balancement de la circulation des items entre les processeurs ainsi que du respect de leur capacité. L'équation (3.2) force la production des différents items finis en

associant la demande externe de ceux-ci à la sommation des variables de sortie de tous les processeurs pouvant produire cet item avec l'état désiré.

Tableau 6

Modèle mathématique linéaire de planification agrégée

Objectif: Minimisation des coûts

$$\sum_{\forall s|n'} c_{isn'}^F F_{isn'} + \sum_{\forall isn} (c_{isn}^P P_{isn} + c_{isn}^R R_{isn} + c_{isn}^S S_{isn}) + \sum_{\forall n} C_n^U U_n \quad (3.1)$$

Sujet aux contraintes

Rencontre des demandes externes

$$\sum_{\forall n} S_{isn} = r_{is} \quad \forall i,s \quad (3.2)$$

Balancement des flux entrant aux processeurs

$$R_{isn} + \sum_{\forall n} F_{isn'} = \sum_{\forall i's'} q_{isi's'n} P_{i's'n'} \quad \forall i,s,n \quad (3.3)$$

Balancement des flux sortant des processeurs

$$P_{isn} = S_{isn} + \sum_{\forall n} F_{isn'} \quad \forall i,s,n \quad (3.4)$$

Calcul des durées planifiées d'utilisation des processeurs

$$\sum_{\forall is} t_{isn} P_{isn} = U_n \quad \forall n \quad (3.5)$$

Limites planifiées d'utilisation des processeurs

$$a_{in} \leq U_n \leq a_{sn} \quad \forall n \quad (3.6)$$

Non-négativité

$$\forall F_{isn'} \geq 0, \forall P_{isn} \geq 0, \forall R_{isn} \geq 0 \quad (3.7)$$

Tableau 7

Glossaire des indices, paramètres et variables

Indices

- i : Un item à être traité par le réseau
 m, n, n' : Processeur du réseau.
 s : État actuel d'un item donné.

Variables

- $F_{isn'n'}$: Flux des items i , possédant l'état s et circulant du processeur n au processeur n' .
 P_{isn} : Quantité d'items i à être traitée au processeur n pour les amener à l'état s .
 R_{isn} : Quantité d'items i , possédant l'état s , qui sera reçue au processeur n en provenance d'une source extérieure.
 S_{isn} : Quantité d'items i , possédant l'état s , qui sera expédiée, à partir du processeur n , pour satisfaire une demande externe.
 U_n : Utilisation planifiée du processeur n .

Paramètres de coût

- $C_{isn'n'}^F$: Coût de manutention d'une unité de l'item i , possédant l'état s , entre les processeurs n et n' .
 C_{isn}^P : Coût marginal de traitement d'une unité i au processeur n pour l'amener à l'état s , excluant le coût d'opération C_n^U du processeur n .
 C_{isn}^R : Coût de manutention d'un item i possédant l'état s , entre son arrivée dans le réseau et le processeur n .
 C_{isn}^S : Coût de manutention d'un item i possédant l'état s , entre le processeur n et sa sortie du réseau.
 C_n^U : Coût d'opération du processeur n par unité de temps.

Autres paramètres

- ai_n, as_n : Limites minimales et maximales planifiées d'utilisation du processeur n .
 $q_{isi's'n}$: Quantité d'items i à l'état s qui est requise pour amener un item i' à l'état s' en le traitant au processeur n .
 r_{is} : Demande externe globale pour un item i possédant l'état s .
 t_{isn} : Temps de traitement requis pour un item i pour atteindre l'état s lorsqu'il est traité au processeur n .

Les deux équations suivantes assurent le balancement des flux entre les différents processeurs. L'équation (3.3) comptabilise les flux entrant à chacun des processeurs en tenant compte de la structure de l'item, c'est-à-dire des composantes nécessaires pour sa production ainsi que de la quantité requise. L'équation (3.4) s'occupe des flux sortant de chacun des processeurs. Les quantités à produire pour chaque item sont liées aux flux en circulation entre les processeurs.

Les équations (3.5) et (3.6) traitent la limite de capacité des processeurs. L'équation (3.5) cumule le temps d'utilisation des processeurs en fonction du temps de traitement de chaque item pour chaque processeur et chaque niveau. L'utilisation totale est limitée par la disponibilité des processeurs dans l'équation (3.6). Enfin, l'équation (3.7) contient les contraintes de non-négativité, ce qui complète le modèle permettant de déterminer les patrons de flux et de charge de travail qui minimisent les coûts dans un réseau flexible de processeurs agiles.

3.4 Construction du modèle d'optimisation agrégé

Le modèle de planification agrégée de la production a été développé à l'aide du logiciel *ILOG OPL Studio version 2.1*. Il s'agit d'un environnement pour le développement intégré d'applications de programmation mathématique et d'optimisation combinatoire (Van Hentenryck 1999a,1999b).

Pour pouvoir s'adapter facilement à différentes configurations de systèmes manufacturiers, le modèle a été bâti en deux parties, c'est-à-dire avec deux fichiers distincts. Le premier fichier représente le modèle comme tel, qui contient les équations de la fonction objectif à optimiser ainsi que celles des contraintes devant être respectées. Ces équations sont définies sous forme de boucles de

sommation. Les paramètres sont énumérés au tout début du modèle mais leurs valeurs n'y sont pas déclarées. Le second fichier contient les données, c'est-à-dire la valeur des paramètres. Ainsi, un seul fichier modèle est nécessaire, lequel prend ses données dans un des fichiers de données qu'on lui assigne en fonction du réseau et du scénario étudiés. Dans l'exemple utilisé ici, on assume que les postes d'un même type sont identiques et que le système de manutention est le même à travers le réseau. Ainsi, seuls les coûts relatifs à la distance à parcourir sont pris en compte.

3.5 Comparaison de réseaux

3.5.1 Méthodologie

Ce premier test permet de comparer différentes configurations de réseau et d'éliminer, le cas échéant, celles offrant des performances non satisfaisantes. Trois configurations de réseau ont été retenues pour démontrer nos approches. Comme on désire analyser trois réseaux différents, trois fichiers de données sont créés. Pour cette expérience, les postes de travail sont déclarés comme étant disponibles 100% du temps, soit pendant 16h pour les postes d'assemblage final [C] et pendant 24h pour tous les autres postes. Le fichier pour le modèle de planification agrégée ainsi que les trois fichiers de données associés aux réseaux étudiés sont présentés à l'annexe C. Le modèle fournit le coût minimal de circulation pour chaque réseau ainsi que les patrons de flux entre les processeurs et les patrons de charge à chaque processeur. Le tableau 8 résume les coûts de circulation pour ces trois scénarios.

3.5.2 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 8

Coût des plans agrégés des trois réseaux

Scénario	Coût
Réseau-02	11333,39 \$
Réseau-05	5039,04 \$
Réseau-06	4830,76 \$

À la lumière des coûts de circulation obtenus selon chaque réseau, on peut dès maintenant prendre la décision d'éliminer le réseau-02. En effet, avec ce réseau, il en coûte plus du double des deux autres pour la circulation des produits entre les différents niveaux de processeurs. Son coût beaucoup plus élevé que celui des deux autres réseaux provient du fait que dans le réseau-02, tous les postes d'un même type sont regroupés ensembles. Ainsi, peu importe le choix du poste où seront assemblées les composantes et des postes d'où proviendront ces composantes, les distances à parcourir seront importantes. Le réseau-02 n'est donc pas efficace. Il a été introduit dans l'étude afin que l'on puisse comparer ce réseau fonctionnel classique avec les autres réseaux qui sont plus agiles. L'étude se poursuit alors avec les réseaux 05 et 06.

On désire maintenant comparer les réseaux 05 et 06 en évaluant leurs patrons de flux. On compare alors le niveau d'étalement des patrons de flux ainsi que leur complexité. Les tableaux 9 et 10 montrent respectivement les patrons de flux du plan agrégé pour le réseau-05 et le réseau-06. Les flux proviennent de la somme des flux pour les six produits fabriqués par le système. Afin de simplifier la représentation, seuls les flux entre les processeurs de type [B] et [G] et entre les postes [G] et [C] y sont montrés, car la complexité et l'étalement du flux pour les autres types de machines sont du même ordre. La

première partie de chaque tableau présente le patron du flux des pièces circulant entre les postes [B] et les postes [G] tandis que la seconde partie présente le patron de flux entre les postes [G] et [C].

Tableau 9

Patrons de flux du plan agrégé pour le réseau-05

Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
B1						G1	994	4226	2127							
B2	7347					G2			1403	4414	1145					
B3		6962	494			G3					3269	4078				
B4						G4						336	4414	2598		
B5			6853			G5									713	
B6				7347	713											

Tableau 10

Patrons de flux du plan agrégé pour le réseau-06

Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
B1	1707	2519	4658			G1			1707	1129						
B2		1642	2689			G2				1642	4414					
B3	1129	1895				G3						4414	2933			
B4				5598	972	G4							949	4414		768
B5					6375	G5									4414	2933
B6				532												

Malgré que le plan pour le réseau-06 présente les coûts de circulation plus faibles que celui pour le réseau-05, ce dernier présente des patrons de flux plus concentrés. Ceci est dû au fait que le réseau-06 a été conçu d'après la composition et la demande moyenne des six produits fabriqués ici. Ce réseau est donc dédié aux produits présentement fabriqués et il existe un lien direct entre la configuration du réseau et la gamme de fabrication des produits. Le réseau-05 est pour sa part plus général que le réseau-06 car il présente une

répartition plus uniforme des types de postes de travail. Ainsi, s'il y a changement dans la composition et la demande des produits, les patrons de flux des pièces vont moins fluctuer avec le réseau-05 qu'avec le réseau-06.

Le réseau-06 permet d'obtenir les coûts de circulation les plus faibles. Mais cette économie apporte une augmentation de la complexité du flux. Un flux plus étalé est plus difficile à gérer et requiert un système de gestion plus sophistiqué et plus onéreux. Puisque la différence de coût entre ces deux réseaux est de moins de 5% et que le réseau-05 présente des patrons de flux plus concentrés, nous préférons poursuivre les tests avec ce réseau.

Le modèle agrégé peut ainsi être utilisé pour comparer différentes configurations de réseau. On souhaite maintenant employer le modèle dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement, qui est le but principal de cette recherche. Pour ce faire, le modèle sert à évaluer la capacité de production d'un fournisseur qui désire soumissionner, suite à l'appel d'offre d'une entreprise réseau. Puis, si le fournisseur possède assez de capacité, le modèle agrégé identifie les tronçons et les nœuds qui seront empruntés lors de l'exécution de la production.

3.6 Gestion de la chaîne d'approvisionnement

3.6.1 Introduction

Lors de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les firmes dont les soumissions ont été retenues par une entreprise réseau doivent établir leurs plans détaillés de production. On ne peut pas utiliser le modèle agrégé pour effectuer une planification détaillée. En effet, un plan agrégé présente des données accumulées en périodes journalières ou hebdomadaires. Un tel plan

ne peut donc pas fournir d'indication sur la charge de travail échelonnée et précise devant être assignée aux processeurs. Il devient alors nécessaire d'utiliser un modèle permettant de générer un plan plus précis, où les données sont réparties sur des intervalles de planification plus courts.

Un modèle de planification détaillée comporte un très grand nombre de variables pour représenter l'information concernant tous les intervalles de planification. Plus le niveau de précision désiré est élevé, plus les intervalles sont courts et nombreux. Un modèle détaillé devient donc rapidement lourd et complexe à résoudre. Il est alors important de réduire la taille du problème lorsqu'on augmente le nombre de périodes. Dans ce travail, la taille du modèle de planification détaillée est réduite en obligeant ce modèle à assigner une charge uniquement aux nœuds et aux tronçons qui ont été identifiés dans le plan agrégé, lors de l'étape de soumission. Les résultats du plan agrégé deviennent les paramètres d'entrée au modèle détaillé. Ce dernier modèle ne doit considérer que les variables et les contraintes identifiées dans le plan agrégé, ce qui diminue significativement la taille du problème. Avant de passer à la planification détaillée, il faut donc utiliser le modèle agrégé pour identifier les nœuds et les tronçons pouvant être utilisés par le modèle détaillé.

Pour avoir un plan détaillé qui soit réalisable, il ne serait pas pensable d'utiliser les résultats d'un plan agrégé où les processeurs ont été déclarés comme étant disponibles 100% du temps. En effet, le plan agrégé utilise et génère des données qui sont regroupées par périodes d'une journée et ne tient pas compte de la gamme de fabrication des produits. Il devient alors nécessaire de limiter le taux d'utilisation permis de certains processeurs pour garder un jeu afin de tenir compte des délais qui sont engendrés par la séquence de fabrication.

Si on ne garde pas de jeu dans le plan agrégé, le modèle va assigner 24 heures de production aux postes se trouvant sur les tronçons les plus économiques, soit 100% de leur capacité. Un problème va survenir au moment de vouloir reproduire le plan défini par le modèle agrégé à l'aide du modèle détaillé. Contrairement au modèle agrégé, ce dernier modèle tient compte des délais existant entre la fabrication d'une pièce à un poste en amont et son transfert vers le poste en aval. On verra comment il en tient compte à la section 4.2. Si donc on impose aux postes une production correspondant à 100% de leur capacité et qu'on tente de résoudre ce problème à l'aide du modèle détaillé, le modèle ne pourra probablement pas trouver de solution réalisable. En effet, les délais causés par la gamme de fabrication font en sorte qu'un poste ne peut être productif pendant qu'il attend les pièces en traitement en amont. Plus un poste est utilisé tard dans la gamme de fabrication, plus il sera improductif longtemps.

3.6.2 Méthodologie

On désire dans un premier temps utiliser le modèle agrégé afin d'évaluer la capacité de production d'un fournisseur désirant poser sa soumission, suite à l'appel d'offre d'une entreprise réseau. Puis, si la capacité est suffisante, le modèle permettra dans un deuxième temps d'obtenir le plan des opérations qui sera assigné au modèle détaillé. Pour tenir compte des délais causés par la gamme de fabrication, on décide donc de garder un jeu sur l'utilisation de tous les processeurs. Aussi, de nouveaux scénarios sont exécutés à l'aide du modèle agrégé, où la disponibilité des postes est maintenant limitée. On a effectué des essais en ayant fixé au départ un seuil de 85%, ce qui laisse une latitude de 15% pour tenir compte des délais. On verra plus loin qu'une limite de 85% sur l'utilisation des postes est suffisante car cela permet de générer un plan détaillé qui soit réalisable. Il serait toujours possible de faire d'autres tests

avec des limites d'utilisation différentes, mais ce n'est pas requis ici. Le tableau 11 présente les coûts de circulation pour le scénario original, où les postes sont disponibles à 100%, ainsi que pour celui où l'on déclare une disponibilité de 85% pour chaque processeur.

3.6.3 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 11

Coût du plan agrégé avec limite de charge

Scénario	Coût
Disponibilité 100%	5039,04 \$
Disponibilité 85%	5617,05 \$

Le fait d'obtenir une solution indique au fournisseur qu'il possède assez de capacité pour répondre à la demande de l'entreprise réseau. Le fournisseur peut alors indiquer à cette dernière sur quelle offre il soumissionne et quel est le coût de circulation associé. Si l'entreprise réseau retient la soumission de ce fournisseur, celui-ci devra générer son plan détaillé de production. Le modèle détaillé assignera une charge de travail seulement aux processeurs identifiés dans le plan agrégé et seuls les tronçons retenus dans le plan agrégé pourront être empruntés dans le plan détaillé. Les résultats du modèle agrégé où l'on déclare une disponibilité de 85% des processeurs seront donc les paramètres d'entrée au modèle détaillé. Les résultats pour ce scénario sont présentés intégralement à l'annexe D.

Regardons le tableau 11, qui présente les coûts de circulation pour les scénarios où les postes sont disponibles à 100% et à 85% de 24h. Les résultats indiquent que plus l'utilisation est limitée, plus le coût du plan augmente.

Effectivement, moins il est permis d'utiliser les tronçons économiques, plus le plan coûtera cher. On désire maintenant comparer les patrons de flux de ces deux scénarios. Les tableaux 12 et 13 montrent les patrons de flux qui ont été générés pour le réseau-05 par le modèle agrégé, en imposant respectivement une disponibilité des processeurs de 85% et de 100%.

Tableau 12

Patrons de flux pour une disponibilité de 85%

Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
B1	1401	627				G1	1793	3695	757							
B2	4844	5356				G2			2368	3752	125					
B3		262	2069			G3					2913	3332				
B4			713			G4							3752	2493		
B5			3463		781	G5								629	3752	355
B6				6245	3955											

Tableau 13

Patrons de flux pour une disponibilité de 100%

Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
B1						G1	994	4226	2127							
B2	7347					G2			1403	4414	1145					
B3		6962	494			G3					3269	4078				
B4						G4						336	4414	2598		
B5			6853			G5									713	
B6				7347	713											

L'analyse des deux tableaux montre que plus on limite la charge permise aux processeurs, plus le patron de flux s'étale. Effectivement, en limitant l'utilisation des postes à 85%, ces derniers peuvent traiter moins de pièces. Quand les postes se trouvant sur les tronçons les plus économiques deviennent saturés, le programme doit répartir la charge sur d'autres processeurs. Dans le

tableau 13, l'utilisation n'est pas limitée et le modèle mathématique a assigné un flux plus important aux chemins offrant les coûts les plus faibles. Dans le tableau 12, l'utilisation étant limitée à 85%, on voit que la charge est répartie sur davantage de tronçons.

Les tableaux du type de ceux présentés ici sont difficiles à interpréter pour obtenir une vision complète de l'activité des ressources et des niveaux de transit entre elles. L'information qui y est contenue est très spécifique à un processeur ou à un flux. Une représentation plus globale s'avère nécessaire. Pour mieux visualiser ces patrons de charge et de flux, on peut utiliser la représentation par *réseaux manufacturiers virtuels* (VMN) introduite par Olivier (1994). Ces réseaux présentent, pour chaque produit, l'ensemble des processeurs qui sont utilisés pour leur réalisation, de même que le niveau de flux circulant entre eux. Les figures 10 à 16 montrent la famille de ces réseaux pour la production avec le réseau-05 où l'utilisation des processeurs est limitée à 85%, d'après les résultats du modèle agrégé.

La figure 10 présente le VMN pour les six produits confondus et les figures 11 à 16 présentent les VMNs pour chaque produit. Si on regarde par exemple le poste G5 de la figure 10, on voit qu'il s'est fait assigner une production de 4736 pièces; qu'il est alimenté pour 781 unités par B5 et pour 3955 unités par B6; et qu'il fournit le poste C8 pour 629 de ses produits finaux, qu'il fournit C9 pour 3752 et C10 pour 355. Si on regarde également la production assignée à C9 en prenant les figures 10, 13 et 16, on voit que ce poste doit assembler 1876 produits, soit 731 produits de type « C » et 1145 produits « F ». Ces produits requièrent deux indicateurs généraux « G » et c'est pourquoi 3752 (1876 fois 2) composantes « G » sont acheminées vers C9.

On peut ainsi employer le modèle agrégé dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement. Ce modèle sert d'abord à évaluer la capacité de production d'un fournisseur qui désire répondre à l'appel d'offre d'une entreprise réseau. Puis, si le fournisseur possède assez de capacité, le modèle agrégé identifie les tronçons et les nœuds qui seront empruntés lors de l'exécution de la production.

Dans le prochain chapitre, on explique comment le modèle de programmation linéaire développé par Olivier *et al.*, (1998) pour la planification détaillée de la production peut être employé dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement.

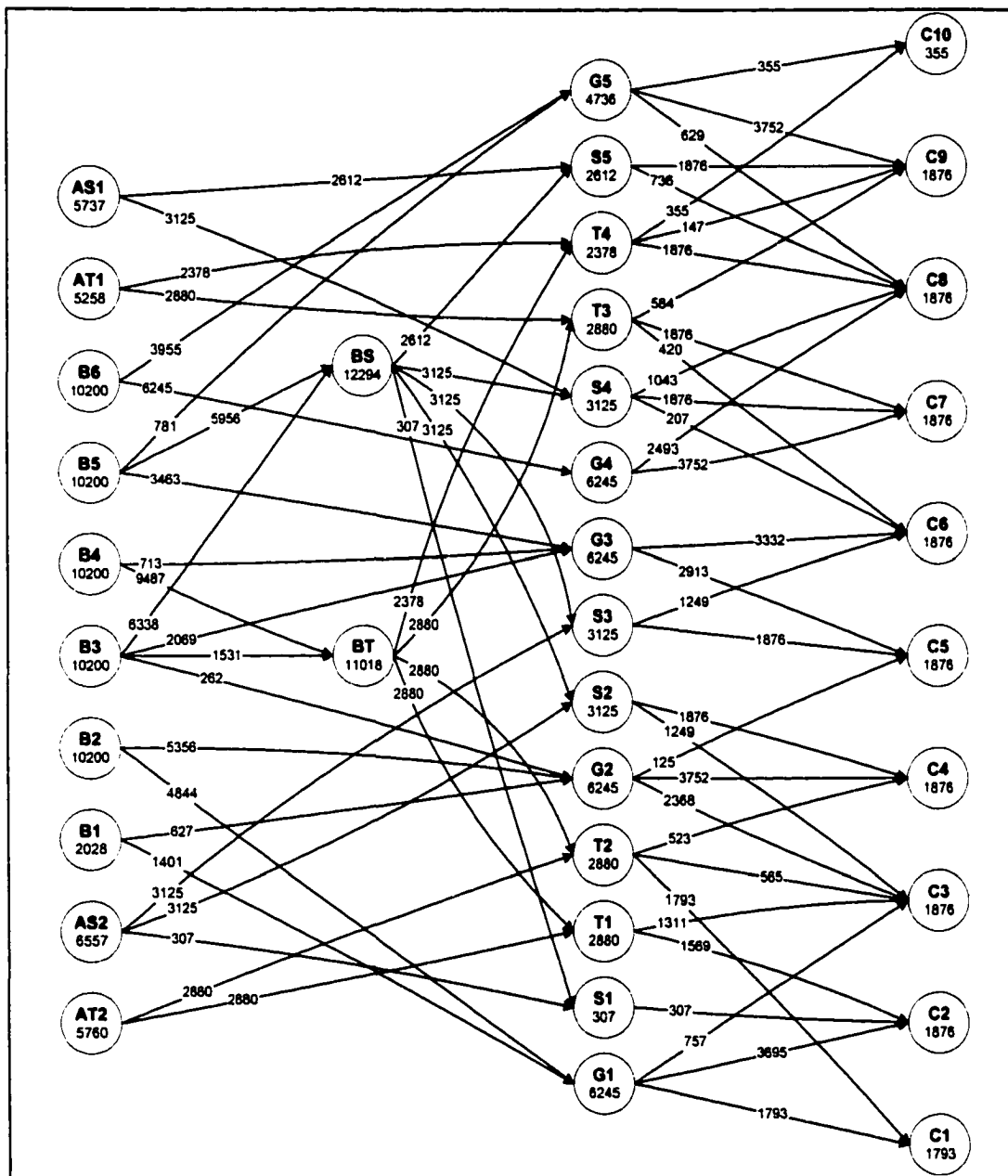


Figure 10 VMN pour les six produits confondus

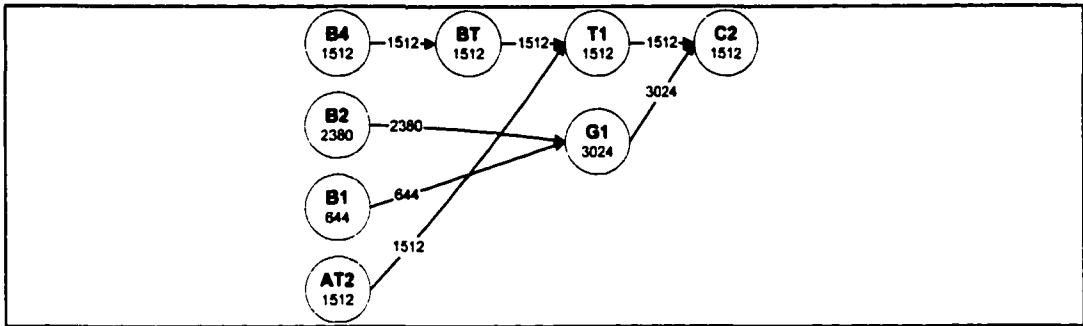


Figure 11 VMN pour le produit A

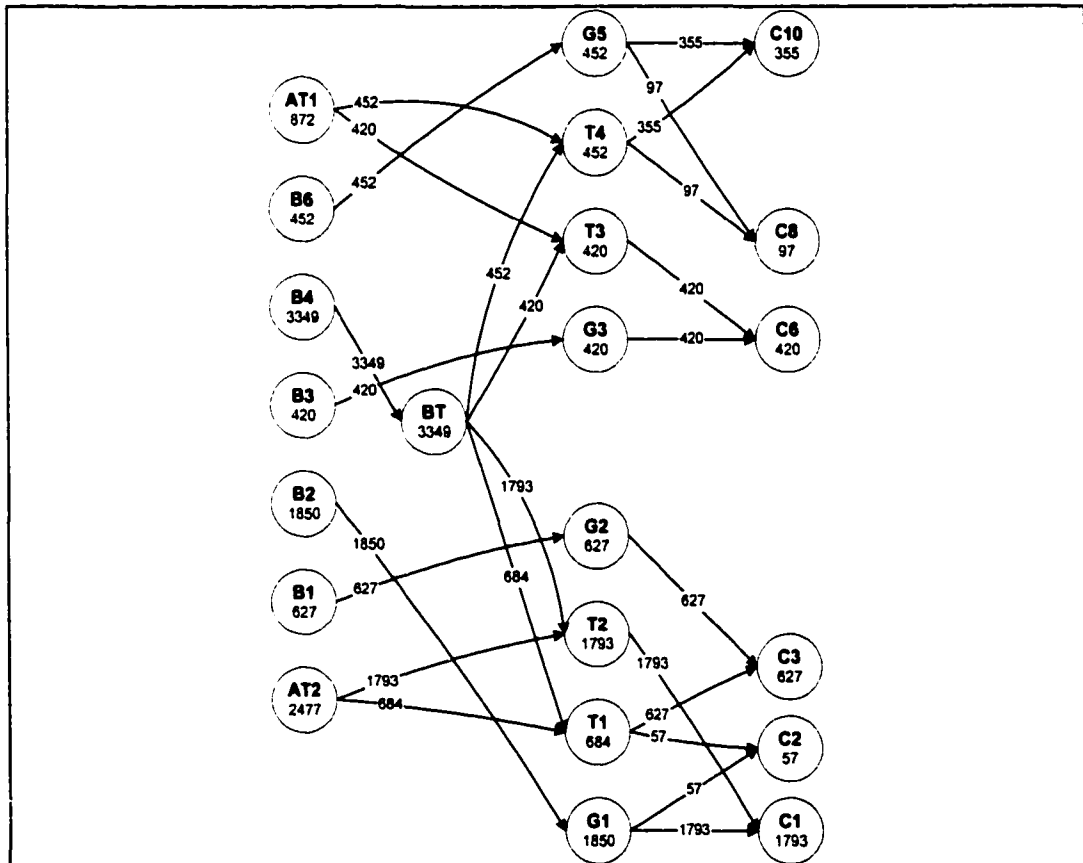


Figure 12 VMN pour le produit B

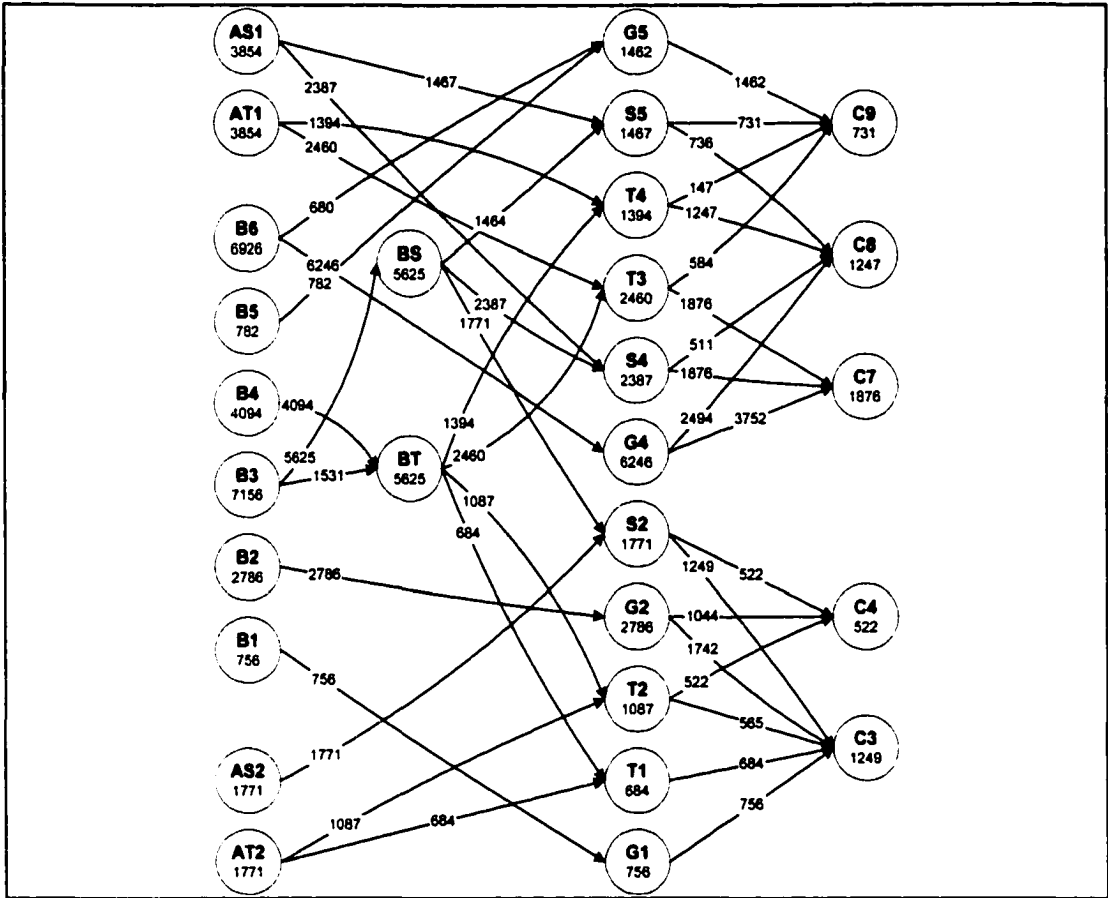


Figure 13 VMN pour le produit C

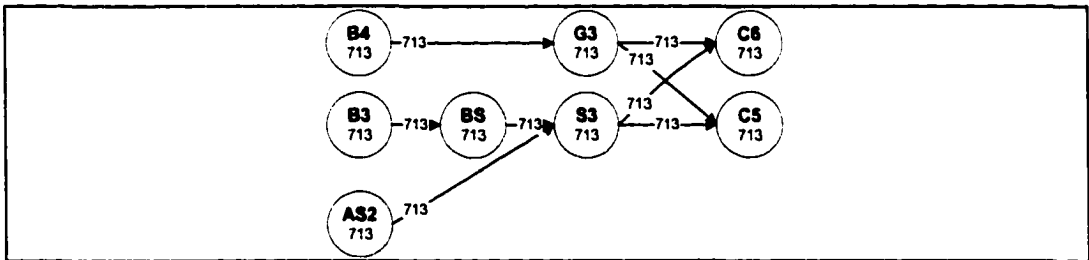


Figure 14 VMN pour le produit D

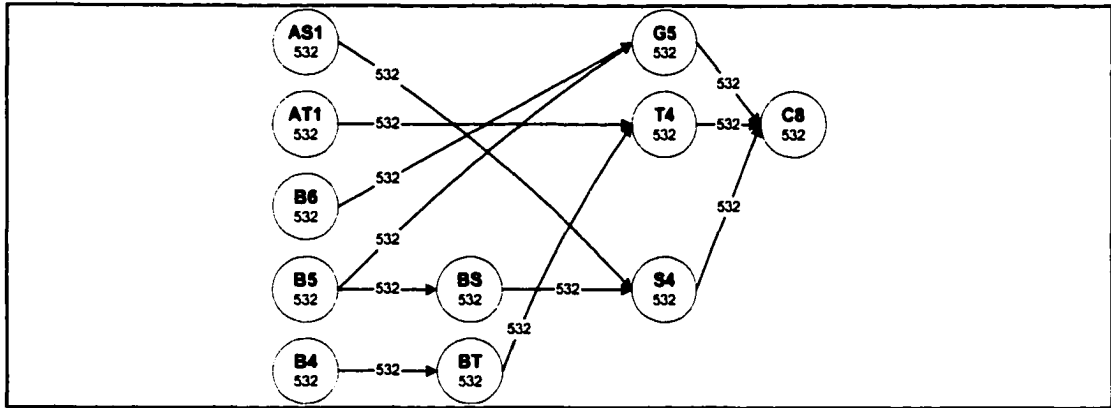


Figure 15 VMN pour le produit E

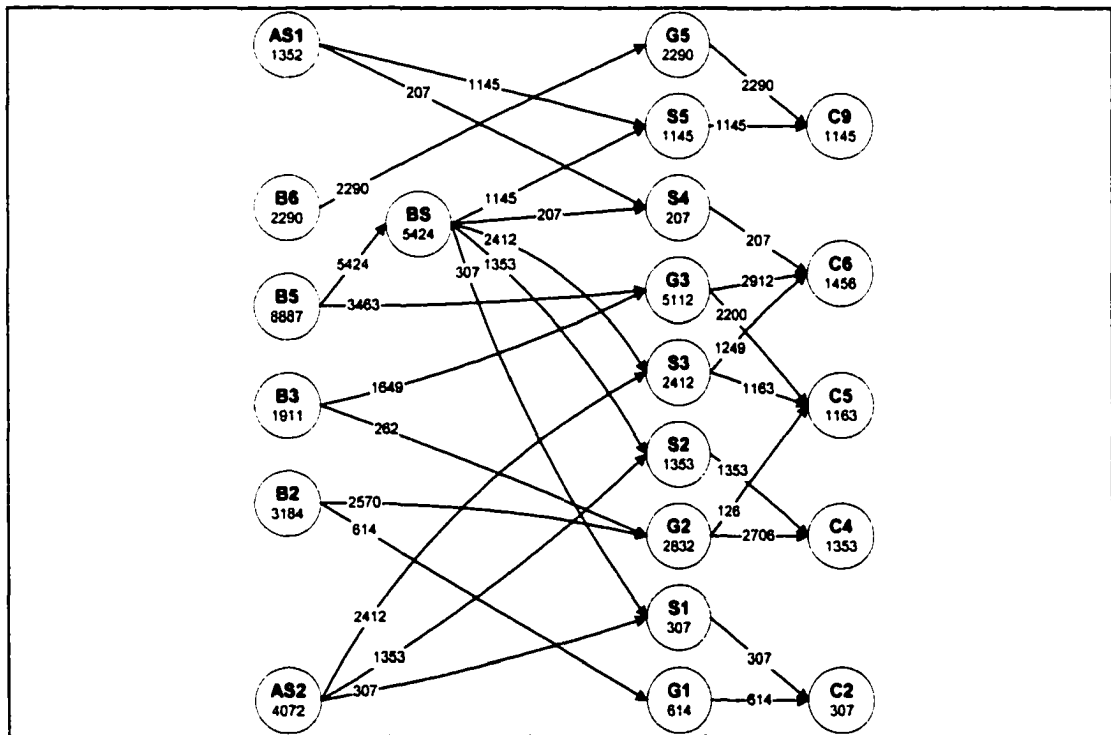


Figure 16 VMN pour le produit F

CHAPITRE 4

MODÈLE DE PLANIFICATION DÉTAILLÉE DE LA PRODUCTION

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on explique d'abord la construction du modèle de planification détaillée. On présente ensuite comment ce modèle a été adapté pour le cas de l'usine de fabrication des tableaux de bord.

Comme il a été mentionné dans l'introduction, le modèle détaillé est principalement employé ici dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement. Les firmes dont la soumission a été retenue par une entreprise réseau utilisent en effet ce modèle pour générer leur plan détaillé de production. Ce modèle peut également être utilisé afin de conduire différents essais dans le but d'évaluer l'influence qu'ont certains paramètres sur le comportement d'un système.

On utilise alors le modèle de planification détaillée dans un premier temps pour générer un plan précis de production qui soit basé sur les résultats du plan agrégé. Ceci dans le but de valider l'emploi de cette méthode dans le contexte de la gestion des chaînes d'approvisionnement. On l'utilise dans un deuxième afin d'évaluer le comportement du système soumis à diverses contraintes. Mais voyons d'abord comment le modèle de planification détaillée est conçu.

4.2 Modèle d'optimisation linéaire pour la planification détaillée

Le modèle utilisé pour effectuer la planification détaillée de la production a été développé par Olivier (1998). Tout comme c'était le cas pour le modèle de planification agrégée, il s'agit encore ici d'un modèle d'optimisation linéaire avec des variables en nombres réels. Et comme le modèle agrégé, ce modèle permet de déterminer les patrons de flux entre les processeurs et les patrons de charge de ces processeurs tout en s'assurant que l'ensemble des coûts d'opération, de production et de transport sont minimisés.

Le modèle détaillé diffère toutefois du modèle agrégé en ce qui a trait à l'échelonnement temporel du travail. Avec le premier modèle, les données sont agrégées par périodes d'une journée alors qu'avec le second, la production journalière est répartie sur plusieurs périodes à l'intérieur d'une journée. Cela permet de générer un plan beaucoup plus précis qui se rapproche bien plus de la réalité. Cela permet également d'assigner des tâches aux processeurs en contrôlant les quantités produites sur chaque poste ainsi que les moments de début et de fin de chaque tâche. Le plan détaillé procure donc un meilleur contrôle d'exécution tout en offrant l'opportunité de réajuster le plan en cas de problème.

Comme l'horaire de production est mieux détaillé, il devient nécessaire de définir des espaces tampons à chaque poste ainsi qu'un espace d'entreposage centralisé. Les pièces ayant été traitées par un processeur et qui sont en attente de transfert vers un poste en aval doivent avoir un lieu de transit, qu'on appelle tampon. Les tampons contiennent une quantité de pièces qui sont stockées entre les divers postes de travail afin d'absorber les variations des cadences de production. Lorsqu'un espace tampon est plein, les produits supplémentaires

doivent alors être envoyés vers un inventaire centralisé, ce qui engendre des coûts supplémentaires.

Le modèle de planification détaillée doit donc tenir compte de ces nouvelles conditions. Ainsi, un nouvel indice est rajouté à toutes les variables de chacune des équations. Cet indice représente la période, c'est-à-dire l'intervalle de planification, à laquelle est assignée une production ou un déplacement entre deux points. De nouvelles équations sont également rajoutées aux contraintes initiales du modèle agrégé afin de compléter le modèle détaillé. Ces contraintes permettent de balancer la production et le flux entre deux points pour chaque période. Pour ce faire, de nouvelles variables sont créées, représentant le niveau du tampon de chaque poste, le niveau des pièces en inventaire et le flux des pièces entre deux points. Les pièces peuvent circuler sur différents tronçons, soit : d'un processeur vers son tampon; d'un processeur vers l'inventaire centralisé (si le tampon est plein); d'un tampon vers un processeur; ou de l'inventaire vers un processeur. Des paramètres permettent également de spécifier la limite de capacité de chaque tampon et de mentionner le nombre de périodes selon lequel sera divisée une journée de production. Plus le nombre de périodes est élevé, plus le modèle est précis.

Le modèle détaillé permet non seulement de déterminer les patrons de flux et de charge mais il indique aussi le niveau des tampons et de l'inventaire centralisé. Toutes ces informations sont détaillées pour chacune des périodes de la journée de production. Le modèle détaillé tient machinalement compte des délais occasionnés par la gamme de fabrication grâce aux intervalles de planification. Effectivement, à la première période de la journée, seuls des postes du premier niveau peuvent traiter des pièces. Sitôt fabriquées, les pièces sont stockées dans le tampon tout juste en aval du poste. À la deuxième période, les pièces peuvent soit demeurer dans le tampon, soit être en transit

entre le tampon et le poste spécifié à la prochaine étape de la gamme de fabrication. Les processeurs du second niveau ne peuvent donc pas débiter leur production avant la troisième période. Et le procédé se poursuit de la même façon, jusqu'aux processeurs d'assemblage final. Ces contraintes sont incluses dans le modèle détaillé. C'est pourquoi le modèle tient automatiquement compte des délais occasionnés par la gamme de fabrication.

Dans la charpente contextuelle développée lors de nos travaux antérieurs (Hurtubise *et al.*, 2000) afin d'évaluer les réseaux manufacturiers, nous utilisons les deux modèles de planification de la production; le modèle agrégé et celui détaillé. Le modèle de planification agrégée y est utilisé par les fournisseurs pour évaluer leur capacité de répondre à une offre. Puis un fournisseur utilise le modèle de planification détaillée pour générer son plan de production. Afin de réduire la complexité du système, les résultats du plan agrégé sont utilisés comme intrant au modèle détaillé. Ce dernier doit donc définir un plan en n'utilisant que les processeurs et les chemins qui ont été identifiés par le modèle agrégé.

Le modèle de planification détaillée de la production a lui aussi été développé à l'aide du logiciel *ILOG OPL Studio* et le modèle a été bâti en deux parties, soit avec un fichier contenant le modèle générique et des fichiers de données pour chaque scénario testé.

4.3 Plan des expériences effectuées

Plusieurs expériences sont effectuées à l'aide du modèle de planification détaillée. Le tableau 14 donne la liste de ces tests et de leurs différents scénarios. Dans tous les cas, la production est effectuée par lots unitaires.

Tableau 14

Tests et scénarios effectués à l'aide du modèle détaillé

No	Expériences	Scénarios
1	Organisation du flux d'information entre les modèles agrégé et détaillé	Charge limite de 100%
		Charge limite de 90%
		Charge limite de 85%
2	Comparaison entre les réseaux 05 et 06	Réseau-05
		Réseau-06
3	Influence sur le coût du nombre d'intervalles de planification	18 intervalles de 80 minutes
		24 intervalles de 60 minutes
		30 intervalles de 48 minutes
		36 intervalles de 40 minutes
		48 intervalles de 30 minutes
		72 intervalles de 20 minutes
∞ intervalles (plan agrégé)		
4	Influence sur le flux de la limite de capacité des tampons	Capacité de 30 minutes
		Capacité de 60 minutes
		Capacité de 120 minutes
5	Influence sur le flux du coût de transport des pièces vers l'entrepôt	Capacité de 30 minutes et coût de 0,10 \$
		Capacité de 30 minutes et coût de 0,15 \$
		Capacité de 120 minutes et coût de 0,10 \$
		Capacité de 120 minutes et coût de 0,15 \$
6	Comportement d'un réseau non tolérant	Capacité de 30 minutes et coût de 0,10 \$
		Capacité de 30 minutes et coût de 0,15 \$
		Capacité de 120 minutes et coût de 0,10 \$
		Capacité de 120 minutes et coût de 0,15 \$

Pour le premier test, on désire organiser le flux d'information qui circulera du modèle agrégé vers le modèle détaillé. Le but de cet essai est d'utiliser les deux modèles d'optimisation afin d'en valider l'emploi dans le cadre de la gestion des réseaux manufacturiers et des chaînes d'approvisionnement.

On cherche ici à obtenir une solution réalisable lorsqu'on impose les résultats du modèle agrégé comme entrées initiales au modèle détaillé. On souhaite également employer un taux raisonnable pour limiter l'utilisation des processeurs lors de la résolution du modèle agrégé. Trois scénarios sont donc testés pour tenter d'obtenir un plan détaillé de la production qui soit basé sur les résultats du modèle agrégé. Pour les trois scénarios, on utilise les résultats du

modèle agrégé où la charge assignée aux processeurs est limitée respectivement au taux de 100%, 90% et 85% de leur capacité de production.

Il a été mentionné dans l'introduction que le modèle de planification détaillée peut également être employé pour évaluer le comportement d'un système soumis à diverses contraintes. Les expériences 2 à 6 sont employées à cette fin.

Dans le second test, on utilise le modèle détaillé pour comparer différentes configurations de réseau. Tout comme au chapitre précédent, on maintient la comparaison entre le réseau-05 et le réseau-06. Mais cette fois-ci, leur plan de production journalier est divisé en 24 périodes d'une heure.

Pour la troisième expérience, on souhaite vérifier l'influence qu'a le nombre de périodes divisant une journée sur le coût de circulation des produits entre les processeurs. Pour ce faire, le modèle de planification détaillée est exécuté six fois. On obtient six plans de production pour lesquels l'intervalle de planification passe de 80 minutes à 20 minutes. Les coûts de circulation ainsi obtenus sont comparés entre eux. Ils sont aussi comparés à ceux du plan agrégé.

Les trois prochains tests ont pour but d'évaluer la tolérance d'un réseau. Olivier (1998) définit la tolérance d'un aménagement comme étant sa capacité à maintenir un patron de flux et de charge économique, donc près du coût minimum, lorsqu'on déroge des patrons optimaux. Il conduit des expériences pour évaluer l'impact d'une dérogation volontaire des patrons de flux optimaux sur le coût de circulation et compare l'effet de la divergence par rapport au coût du chemin optimal. Dans le même ordre d'idée, on cherche ici à définir la

tolérance d'un réseau, à savoir son respect des patrons de flux et de charge optimaux lorsqu'on fait varier certains paramètres.

Pour ce faire, on examine d'abord à l'aide du test 4 comment les patrons de flux du réseau-05 sont influencés par la variation de la limite de capacité des tampons. Pour cette expérience, la capacité des tampons n'est plus illimitée. Trois scénarios sont exécutés, où la capacité de chaque tampon est limitée à 30 minutes de production du poste en amont, à 60 minutes et enfin à 120 minutes.

Puis, dans le test 5, les scénarios où la capacité des tampons est limitée à 30 et 120 minutes sont repris. On fait rouler chaque scénario deux fois, en leur imputant d'abord un coût de transport d'une pièce vers l'entrepôt de 0,10\$ et ensuite de 0,15\$. On cherche ici à savoir si la variation du coût a une influence sur les patrons de flux du réseau-05.

Finalement, le sixième et dernier test sert à démontrer les changements de flux d'un réseau non tolérant soumis à des variations de limite de capacité des tampons et de coûts de transport des pièces vers l'entrepôt. Cela est effectué en reprenant les mêmes scénarios que pour l'expérience 5, mais en les appliquant cette fois au réseau-02.

Dans les sections suivantes, les tests ainsi que leurs scénarios sont expliqués puis les résultats associés à chacun sont exposés et commentés.

4.4 Organisation du flux d'information entre les modèles d'optimisation

Pour cette première expérience, on organise l'échange d'information entre les modèles de planification agrégée et détaillée. Le but de ce test est de valider

l'emploi de ces modèles dans le cadre de la gestion des réseaux manufacturiers et des chaînes d'approvisionnement.

4.4.1 Méthodologie

Pour forcer le modèle détaillé à n'utiliser que les tronçons faisant partie de la solution du modèle agrégé, un coût très élevé est imputé aux tronçons qui n'ont pas été retenus dans la première solution. Comme le modèle cherche à minimiser les coûts, il n'utilisera ces chemins que s'il ne trouve aucune solution avec les tronçons permis. Ainsi, l'obtention d'une solution ayant un coût très élevé indiquera qu'il n'existe pas de solution réalisable pour ce scénario.

Dans ce modèle, on divise le plan de production journalier sur plusieurs périodes, chacune ayant une durée d'une heure. Rappelons que les postes d'assemblage final, soit les processeurs de type C, ont un horaire de travail de 16 heures et que les autres ont un horaire de 24 heures. Ainsi, la production assignée aux postes d'assemblage final est répartie sur 16 intervalles de planification et la production assignée à tous les autres postes est répartie sur 24 intervalles.

Lors de la planification agrégée, on a gardé un jeu sur l'utilisation de tous les processeurs pour tenir compte des délais causés par la gamme de fabrication. Il a été expliqué à la section 4.2 que le modèle détaillé considère automatiquement les délais occasionnés par la gamme de fabrication. Il n'est donc pas nécessaire ici de réduire l'utilisation permise des postes pour garder un jeu. Ainsi, contrairement au modèle agrégé où la charge de travail permise à chaque processeur est limitée, par exemple à 85%, on ne garde pas de jeu dans le modèle détaillé. Le modèle peut donc utiliser les postes à 100% de leur capacité.

Le niveau des tampons de chaque processeur n'est pas limité; la capacité des tampons est considérée comme étant infinie. Les tampons sont situés après chaque poste de travail pour y accumuler les encours. On assume que les postes du dernier niveau, les processeurs de type C, ne débutent leur production que 8 heures après les autres et qu'ils sont disponibles pendant les 16 dernières heures de la journée. Le modèle détaillé doit respecter la gamme de fabrication et il considère automatiquement les délais occasionnés par le transfert des pièces entre un tampon et le poste en aval. Ainsi, les postes du second niveau seront improductifs pendant les deux premières périodes, en attente des composantes provenant du premier niveau. Les postes du troisième niveau seront improductifs pendant les quatre premières périodes, etc. Cela aura pour effet de diminuer l'utilisation des processeurs et d'entraîner un étalement de la production dans le temps. En situation réelle de fonctionnement, cette situation est tout à fait réaliste si l'horaire des employés est décalé de la durée du retard. Prenons par exemple le cas d'une usine où le délai entre deux niveaux de processeurs est de 30 minutes. Alors la première équipe pourrait débiter son quart de travail à 7h, la seconde à 7h30, la troisième à 8h, et ainsi de suite.

Trois scénarios sont testés pour tenter d'obtenir un plan détaillé de la production qui soit basé sur les résultats du modèle agrégé. Rappelons qu'on cherche ici à générer un plan détaillé seulement sur les nœuds et les tronçons qui ont été identifiés par le modèle agrégé. Les paramètres d'entrée du modèle détaillé sont les résultats du modèle agrégé où la capacité des postes de travail a été réduite de 15%.

Dans le premier scénario, on tente de générer un plan détaillé d'après les résultats du modèle agrégé où l'on permet d'utiliser les postes à 100% de leur capacité. Le plan de production agrégé utilise donc totalement la capacité des

postes, soit pendant 100% de 24h. Dans le deuxième essai, on tente ensuite de générer un plan détaillé sur les nœuds et les tronçons qui ont été identifiés par le modèle agrégé où on limite l'utilisation des postes à 90% de 24h, soit à 21h36. Dans le dernier essai, on tente alors de générer un plan détaillé sur les nœuds et les tronçons qui ont été identifiés par le modèle agrégé où on limite l'utilisation des postes à 85% de 24h, soit 20h24. Le tableau 15 résume les résultats pour ces trois scénarios.

4.4.2 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 15

Coût des plans détaillés sur les nœuds retenus par le modèle agrégé

Scénario	Coût du plan détaillé
Charge limitée à 100% dans plan agrégé	Plan irréalisable
Charge limitée à 90% dans plan agrégé	Plan irréalisable
Charge limitée à 85% dans plan agrégé	5291,14 \$

Sur les trois scénarios, on ne réussit à obtenir qu'une seule solution réalisable. Le modèle détaillé génère un plan valide seulement lorsqu'on lui assigne les résultats du plan agrégé gardant un jeu de 15% comme paramètres d'entrée.

Pour les deux autres scénarios, la fonction objectif possède un coût très élevé. Cela indique que le modèle a été obligé d'utiliser les tronçons interdits auxquels on a attribué un coût très élevé. Il est alors impossible de générer un plan détaillé qui respecte ces deux plans agrégés.

En effet, dans ces deux cas, le pourcentage de jeu du plan agrégé est trop faible. Le modèle agrégé ne tient pas compte du délai entre chaque étape de

production lorsqu'il répartit la production sur les postes de travail. Si le plan agrégé occupe un poste à près de 100% de sa capacité, il ne reste plus de marge de manœuvre pour tenir compte des délais occasionnés par la gamme de fabrication. Puisque les intervalles de planification du modèle détaillé engendrent automatiquement des délais cela diminue la disponibilité des postes. À eux seuls, les processeurs retenus par les deux premiers plans agrégés n'ont alors plus suffisamment de capacité pour rencontrer la demande dans le plan détaillé. Il n'y a donc pas de solution réalisable lorsqu'on utilise la solution du modèle agrégé limitant l'utilisation des postes à 90% et encore moins avec celui permettant d'utiliser les postes à 100%.

Pour que le modèle détaillé puisse être résolu, on voit qu'il est nécessaire de limiter suffisamment le taux d'utilisation des processeurs. Dans notre exemple, ce taux a été fixé à 85% pour tous les postes, ce qui laisse une marge de 15% permettant de tenir compte des délais occasionnés par la gamme de fabrication. Le 15% de jeu s'est avéré suffisant pour permettre d'obtenir une solution au modèle de planification détaillée. On pourrait poursuivre les tests avec d'autres taux et même imposer des taux différents pour les processeurs de chaque niveau de la gamme de fabrication. On pourrait alors trouver les taux d'utilisation maximaux qui permettent de générer une solution au modèle détaillé. Mais ce n'est pas le but de cette expérience. Son but est de démontrer qu'il est possible de générer un plan détaillé qui n'utilise que les nœuds et les tronçons identifiés préalablement par un plan agrégé.

Poursuivons alors l'interprétation des résultats. Le tableau 16 reprend le coût du plan détaillé et ceux des plans agrégés avec limite de charge.

On voit d'abord que le coût de circulation du plan détaillé est de seulement 5% plus cher que le plan agrégé permettant un taux d'utilisation de 100% sur

tous les processeurs (5291\$ vs 5039\$). Ce plan détaillé sur les nœuds retenus par le plan agrégé avec jeu de 15% représente donc une solution très proche de l'optimale.

Tableau 16

Coût du plan détaillé et des plans agrégés

Scénario	Coût
Plan détaillé sur les nœuds retenus par le plan agrégé à 85%	5291,14 \$
Plan agrégé avec limite de charge de 100%	5039,04 \$
Plan agrégé avec limite de charge de 85%	5617,05 \$

On remarque ensuite que le coût de circulation du plan détaillé est de 6% plus économique que le coût obtenu avec le modèle agrégé où l'utilisation des postes est limitée à 85% (5291\$ vs 5617\$). Le fait que le coût du plan détaillé soit inférieur à ce plan agrégé peut sembler illogique à prime abord. En effet, on s'attendrait à ce que le modèle agrégé, moins limité par l'absence de gamme de fabrication, fournisse une meilleure solution objective que le modèle détaillé, qui doit tenir compte d'un grand nombre de contraintes de préséance.

On peut alors rappeler que le modèle détaillé peut utiliser toute la capacité des chemins les plus économiques tandis que l'usage de ces tronçons a été restreint pour le modèle agrégé afin d'assurer la faisabilité du plan détaillé. On permet donc au modèle détaillé d'utiliser les postes jusqu'à 100% de leur capacité; seuls les délais causés par la gamme de fabrication font en sorte que certains postes sont employés à moins de 100%. Tandis qu'on impose au modèle agrégé de garder au départ un jeu de 15% sur l'utilisation des postes. Par conséquent, le plan agrégé peut utiliser au maximum 85% de la capacité des postes se trouvant sur les tronçons les plus économiques. C'est pourquoi la solution objective du plan détaillé sur les nœuds retenus par le modèle agrégé

Si on compare ces deux tableaux, on remarque que le flux du plan détaillé est moins complexe que celui du plan agrégé. Pour comprendre pourquoi, regardons par exemple le cas du poste G5. Le tronçon le plus économique entre les postes de type B et le poste G5 provient de B6 tandis que le moins cher entre G5 et les postes de type C va à C9. L'annexe B présente les coûts de circulation pour les trois réseaux étudiés.

Avec le plan détaillé, qui peut utiliser les processeurs jusqu'à 100% de leur capacité (tableau 18), G5 est entièrement alimenté par B6 et il ne fournit que C9. Les postes se trouvant sur les tronçons les plus économiques ont suffisamment de capacité pour que seuls les chemins les moins chers soient empruntés.

Avec le modèle agrégé (tableau 17), par contre, la capacité des postes est réduite de 15%. Le poste B6 n'a alors pas assez de capacité pour fournir G5 à lui seul et une partie du flux doit provenir de B5, même si le coût de circulation pour ce tronçon est plus élevé. De même, C9 n'a pas assez de capacité pour traiter à lui seul tout ce qui provient de G5 et une partie du flux doit être envoyée à C8 et C10.

La charge des processeurs qui sont sollicités à plus de 85% par le plan détaillé (tableau 18) a été répartie sur les postes se trouvant sur des tronçons moins économiques avec le plan agrégé limité à 85% (tableau 17). Les patrons de flux du plan détaillé sont donc un peu moins étalés que ceux du plan agrégé. Mais on retrouve les concentrations importantes de flux sur les mêmes tronçons dans les deux plans. De plus, seuls des tronçons retenus par le plan agrégé sont empruntés par le plan détaillé. C'est ce que l'on voulait obtenir.

Le modèle détaillé génère un plan qui minimise les coûts de production. Un plan détaillé permet de faciliter la gestion et le contrôle des opérations. Le niveau de précision du plan est déterminé par la durée des intervalles de planification. Si on désire un plan très précis, il suffit de réduire la durée de ces intervalles. Plus les intervalles sont courts, plus leur nombre est élevé. Cela augmente la complexité du problème, mais cette augmentation peut être compensée par l'utilisation des résultats du plan agrégé comme paramètres d'entrée au modèle de planification détaillée. On peut en effet inclure dans le problème à résoudre que les équations concernant les nœuds et les tronçons définis par le plan agrégé. Cela réduit significativement le nombre de variables et de contraintes que doit considérer le modèle détaillé; la résolution du problème est alors effectuée plus rapidement. Cette méthode permet alors d'obtenir un bon compromis entre la précision et le temps de résolution.

On désire maintenant utiliser le modèle de planification détaillée pour estimer l'influence qu'ont certains paramètres sur les patrons de flux entre les postes de travail et de charge des processeurs.

4.5 Comparaison entre le réseau-05 et le réseau-06

4.5.1 Méthodologie

Le modèle détaillé qui vient d'être utilisé est repris dans cette seconde expérience afin d'évaluer les patrons de flux et de charge pour les réseaux 05 et 06. Dans les deux cas, on divise encore le plan de production journalier en 24 intervalles de planification d'une durée d'une heure. Pour ce test, on ne limite pas la capacité des tampons et on permet d'utiliser toute la capacité des processeurs. De plus, aucune restriction n'est posée quant au choix des

tronçons pouvant être empruntés. Le tableau 19 résume les coûts de circulation pour ces deux scénarios et en rappelle certains des sections 4.5 et 5.4.

4.5.2 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 19

Coût des plans agrégés et détaillés des deux réseaux

Scénario	Coût
Plan agrégé (limite de charge de 100%) Réseau-05	5039,04 \$
Plan agrégé (limite de charge de 100%) Réseau-06	4830,76 \$
Plan détaillé sans contrainte sur les nœuds Réseau-05	5252,06 \$
Plan détaillé sans contrainte sur les nœuds Réseau-06	4977,26 \$
Plan détaillé sur les nœuds retenus par le plan agrégé à 85%	5291,14 \$

Une observation des quatre premières données montre que le plan détaillé sans contrainte sur le choix des nœuds coûte 4% de plus que le plan agrégé avec capacité de 100% pour le réseau-05 (5252\$ vs 5039\$). De même, il en coûte 3% de plus pour le plan détaillé du réseau-06 que pour le plan agrégé (4977\$ vs 4831\$).

L'augmentation du coût du plan détaillé par rapport au plan agrégé provient du fait qu'avec le modèle détaillé, un poste ne peut débuter sa production tant que les pièces qui lui sont assignées n'ont pas été traitées par le poste en amont. Ainsi, plus un poste est employé tard dans la gamme de fabrication, plus cela diminue son temps utile. Hormis les postes du premier niveau, les processeurs se trouvant sur les tronçons les plus économiques ne peuvent donc être productifs 100% du temps, comme c'est le cas avec le modèle agrégé. On peut rappeler qu'à la section 3.5, le modèle agrégé ne limite l'utilisation des processeurs qu'en imposant un seuil de capacité de 24h par jour, alors tous les postes sont disponibles 100% du temps.

Tout comme c'était le cas dans le chapitre 3 avec la planification agrégée, le présent test montre que le coût du plan détaillé pour le réseau-05 est de 5% plus cher que celui du réseau-06. L'explication est la même que celle fournie dans le chapitre précédent. Le réseau-06 est moins cher car il a été conçu d'après la composition et la demande moyenne des six produits fabriqués ici. Ce réseau est dédié aux produits présentement fabriqués et il existe un lien direct entre la configuration du réseau et la gamme de fabrication des produits. Le réseau-05 est quant à lui plus général car il présente une répartition plus uniforme des types de postes de travail. Ce réseau présente donc un coût un peu plus élevé mais encore ici, la différence entre les deux est minime.

Regardons la dernière donnée du tableau 19, soit le coût du plan détaillé sur les nœuds retenus par le plan agrégé. Si on compare ce coût avec celui du plan détaillé sans contrainte sur le choix des nœuds pour le réseau-05, on remarque que le premier ne coûte que 0,7% de plus (5291\$ vs 5252\$). Cela indique qu'un plan détaillé généré en utilisant comme intrants les résultats du modèle agrégé coûte à peine plus cher que le plan que l'on obtiendrait sans contraindre le choix des tronçons.

Ainsi, en gestion de la chaîne d'approvisionnement, on peut utiliser le modèle de planification agrégée pour fixer le choix des processeurs et des tronçons d'après le plan qui est généré et ce, dès la phase de soumission. Puis lorsque vient le moment de planifier la production à court terme, on peut alors utiliser le modèle détaillé en n'y incluant que les contraintes qui concernent les nœuds et les tronçons identifiés lors de la première étape de soumission. Le modèle détaillé se trouve de cette façon allégé d'un grand nombre de contraintes et il devient donc plus rapide à résoudre. De plus, comme il vient d'être démontré, le coût du plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé est à peine plus cher que la solution optimale sans contrainte sur le

Tout comme c'était le cas avec les plans agrégés de la section 3.5, les patrons de flux du réseau-05 sont moins étalés et moins complexes que ceux du réseau-06. Cela s'explique encore par le fait que le réseau-05 est plus général que le réseau-06. Le réseau-05 présente en effet une répartition plus uniforme des types de postes de travail. Ainsi, s'il y a changement dans la composition et la demande des produits, les patrons de flux des pièces vont moins fluctuer avec ce réseau qu'avec le réseau-06.

Le réseau-06 a quant à lui été conçu d'après la composition et la demande moyenne des produits. Ce réseau est donc dédié aux produits présentement fabriqués et sa configuration permet d'obtenir les coûts de circulation les plus faibles. Ces coûts moins élevés sont toutefois accompagnés d'une augmentation notable de la complexité du flux. Un flux plus étalé est plus difficile à gérer et requiert un système de gestion plus sophistiqué et plus onéreux. Puisque le réseau-05 présente des patrons de flux plus concentrés, on poursuit les expériences avec ce réseau.

4.6 Influence sur le coût du nombre de périodes divisant une journée

4.6.1 Méthodologie

Dans cette troisième expérience, le modèle détaillé est repris avec le réseau-05 pour déterminer comment les coûts de circulation sont influencés par le nombre d'intervalles de planification que l'on utilise pour diviser le plan de production journalier. Pour ce test, on permet d'utiliser toute la capacité des processeurs. De plus, on ne limite pas la capacité des tampons de chaque processeur et aucune restriction n'est posée quant au choix des nœuds et des tronçons pouvant être empruntés. Dans les plans détaillés précédents, la journée était divisée en 24 intervalles de planification, chacun ayant une durée

d'une heure. Pour ce test, cinq nouveaux scénarios sont expérimentés. Les scénarios offrent un éventail variant entre 18 intervalles de planification de 80 minutes et 72 intervalles de 20 minutes. Les plans résultant doivent rencontrer la demande journalière pour tous les produits, tout en minimisant les coûts de circulation. Le tableau 22 résume les coûts de circulation de ces scénarios et donne la différence entre ces coûts et celui du plan agrégé. La figure 17 présente ces données sous forme d'un graphique.

4.6.2 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 22

Coûts du plan d'après le nombre d'intervalles

Scénario	Coût	% Diff.
18 périodes de 80 minutes	5369,63 \$	6,6
24 périodes de 60 minutes	5252,06 \$	4,2
30 périodes de 48 minutes	5188,53 \$	3,0
36 périodes de 40 minutes	5149,39 \$	2,2
48 périodes de 30 minutes	5101,04 \$	1,2
72 périodes de 20 minutes	5071,74 \$	0,6
∞ périodes (modèle agrégé)	5039,04 \$	-

On constate que plus le nombre d'intervalles de planification est élevé, plus le coût diminue et se rapproche du coût du plan agrégé. Pour le plan détaillé, les postes d'un niveau supérieur doivent attendre que la production du niveau précédent soit terminée avant de débiter la leur. Le temps d'attente, soit le délai entre deux niveaux, représente un intervalle de planification. L'augmentation du nombre d'intervalles fait diminuer le temps d'attente. Cela fait augmenter le taux d'occupation des postes se trouvant sur les tronçons économiques. Il en résulte alors une diminution du coût du plan. Comme le plan agrégé ne tient pas compte des délais causés par la gamme de fabrication, c'est comme si la durée du délai était nulle.

À la limite, on peut donc dire que le plan agrégé représente le cas du plan détaillé où le nombre d'intervalles de planification tend vers l'infini et leur durée tend vers zéro. C'est pourquoi ce plan présente la solution la moins chère. Mais on sait qu'il s'agit en fait d'une solution non réaliste.

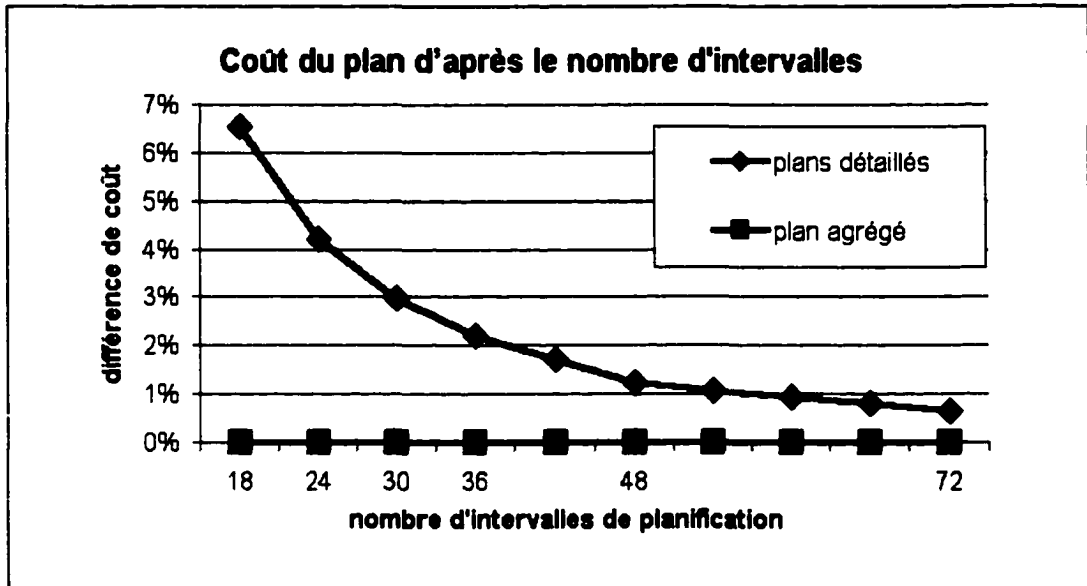


Figure 17 Coûts du plan d'après le nombre d'intervalles

Ce qu'on recherche en générant un plan de production détaillé, c'est un horaire qui présente les coûts les plus bas possible, tout en étant réalisable et possible à gérer. Plus un plan est détaillé, plus les coûts de circulation sont bas mais plus il est difficile à gérer; ce qui nécessite un meilleur système de gestion.

Une entreprise peut donc employer le modèle détaillé pour évaluer le coût de différents plans en fonction du nombre d'intervalles de planification. Cela peut l'aider à orienter son choix quant au niveau de précision du plan détaillé et au système de gestion à utiliser.

4.7 Influence sur le flux de la limite de capacité des tampons

4.7.1 Introduction

Le modèle détaillé est repris dans cette quatrième expérience pour déterminer comment les patrons de flux et de charge sont influencés lorsqu'on limite la capacité des tampons. Olivier (1998) définit la tolérance d'un réseau comme étant sa capacité à maintenir un patron de flux et de charge économique, donc près du coût minimum, lorsque l'on déroge des patrons optimaux. Il conduit des expériences pour évaluer l'impact d'une dérogation volontaire des patrons de flux optimaux sur le coût de circulation et compare l'effet de la divergence par rapport au coût du chemin optimal. Dans le même ordre d'idée, on cherche ici à vérifier la tolérance du réseau, à savoir son respect des patrons de flux optimaux lorsqu'on limite la capacité des tampons.

4.7.2 Méthodologie

Pour ce faire, la capacité des tampons de chaque processeur est alors limitée à différents niveaux et lorsqu'un tampon est rempli à pleine capacité, les pièces supplémentaires sont transférées vers un espace d'entreposage centralisé. Des coûts sont imputés pour le transfert des pièces du tampon vers l'entrepôt et pour le transfert de l'entrepôt vers le poste en aval. Le coût de transport vers l'entrepôt centralisé est fixé de façon à être proportionnel aux autres coûts de circulation. On assume que le transfert d'une pièce de l'entrepôt vers le poste en aval possède un coût identique à celui du transfert du processeur en amont vers celui en aval. Pour ce test, on divise la journée de production en périodes d'une heure, ce qui donne 24 intervalles de planification. On permet d'utiliser toute la capacité des processeurs et aucune restriction n'est posée quant au choix des tronçons pouvant être empruntés. Si le réseau est

tolérant, les patrons de flux devraient être respectés malgré le fait de limiter le niveau des tampons.

Trois nouveaux scénarios sont testés. Dans les trois cas, le coût imputé au transfert d'une pièce vers l'entrepôt est le même, soit 0,10\$. Le coût de 0,10\$ a été choisi afin d'être proportionnel aux autres coûts de circulation, lesquels varient entre 0,006\$ et 0,21\$. Il est important d'avoir des coûts comparables afin qu'il ne soit pas plus économique d'envoyer la majorité des pièces en inventaire centralisé que de les garder dans les tampons, ni à l'inverse que l'entreposage coûte si cher qu'il soit préférable d'utiliser les tronçons les plus coûteux.

Pour ces tests, chaque tampon se voit assigner une limite de capacité correspondant à un temps de production du poste tout juste en amont. Dans le premier scénario, les tampons sont limités à l'équivalent de 30 minutes de production. Si par exemple un processeur de type B peut traiter 500 pièces à l'heure, un tampon limité à une capacité de 30 minutes ne pourra contenir plus de 250 pièces. Pour les deux scénarios suivants, la capacité est ensuite limitée à 60 minutes et enfin à 120 minutes. Le tableau 23 nous montre les patrons de flux entre les postes [B] et [G], pour une capacité des tampons de 30, 60 et 120 minutes ainsi que ceux pour le scénario où leur capacité est illimitée.

4.7.3 Présentation et interprétation des résultats

L'examen des patrons de flux du tableau 23 montre que lorsque la taille des tampons permet d'entreposer suffisamment de produits, donc avec une capacité d'une ou deux heures de production, les patrons de flux sont à peine différents de ceux pour le plan où la capacité des tampons est illimitée. Cependant, plus la taille des tampons devient limitée, plus les coûts associés

aux transports supplémentaires entrent en compétition avec les coûts de circulation réguliers.

Tableau 23

Patrons de flux du plan détaillé avec taille des tampons limitée

Limite de 30 minutes - Coût de 0,10\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1	641	407			
B2	6092	3799			
B3		1004	1081		
B4			1512		
B5			3581	945	600
B6			559	5040	4447

Limite de 60 minutes - Coût de 0,10\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1					
B2	6734	3068			
B3		2143	1200		
B4			1796		
B5			2944	583	712
B6			793	5253	4485

Limite de 120 minutes - Coût de 0,10\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1					
B2	6734	3068			
B3		2429	2110		
B4			1281		
B5			2647	333	462
B6			448	5164	5035

Capacité des tampons illimitée					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1					
B2	6734	3068			
B3		3665	1351		
B4			1023		
B5			3535		112
B6			824	6734	2664

En effet, des flux qui étaient inexistants avec les plans précédents apparaissent lorsque la capacité des tampons est limitée à 30 minutes de production; sur les tronçons B1-G1 et B1-G2 par exemple. Ainsi, lorsque la capacité des tampons est réduite, il devient parfois plus économique d'emprunter des tronçons moins économiques plutôt que d'envoyer des pièces en entrepôt centralisé, certains coûts de circulation entre deux postes devenant moins élevé qu'un passage par l'entrepôt centralisé. Mais si on regarde l'allure générale des patrons de flux de cet expérience, on voit que les patrons dérogent bien peu lorsque la capacité des tampons est limitée, ce qui indique que le réseau-05 est tolérant. Dans la section suivante, on cherche à vérifier la tolérance du réseau lorsqu'on fait varier le coût de transport des pièces vers l'entrepôt.

4.8 Influence sur le flux du coût de transport des pièces vers l'entrepôt

4.8.1 Méthodologie

Pour ce cinquième test, deux autres scénarios sont expérimentés afin de vérifier l'effet du coût de transport vers l'entrepôt des pièces ne pouvant prendre place dans un tampon saturé. Dans les deux cas, le coût imputé au transfert d'une pièce vers l'entrepôt est le même, soit ici de 0,15\$. Encore ici, le coût de 0,15\$ a été choisi afin d'être proportionnel aux autres coûts de circulation. Ces essais sont effectués pour une limite de capacité des tampons correspondant d'abord à l'équivalent de 30 minutes de production puis de 120 minutes. Le tableau 24 résume les coûts de circulation de ces plans détaillés et rappelle ceux des plans où le coût de transport des pièces vers l'entrepôt centralisé est de 0,10\$. La dernière colonne du tableau indique la différence de coûts de circulation résultant de l'augmentation du coût de transport de 0,10\$ à 0,15\$.

4.8.2 Présentation et interprétation des résultats

Tableau 24

Coûts du plan d'après le coût de transport

Scénario	Coût	% Diff.
Capacité de 30 min et 0,10 \$	6150,62 \$	-
Capacité de 30 min et 0,15 \$	6525,23 \$	6,1
Capacité de 120 min et 0,10 \$	5698,38 \$	-
Capacité de 120 min et 0,15 \$	5852,82 \$	2,7

L'examen du tableau 24 nous indique que l'augmentation du coût de transport vers l'entrepôt affecte plus le coût global de circulation lorsque la capacité des tampons est basse. Ce résultat provient du fait que plus la capacité

des tampons est réduite, plus le nombre de transferts vers l'entrepôt est élevé. Dans le but de vérifier la tolérance du réseau, voyons maintenant si l'augmentation du coût de transport vers l'entrepôt a une influence significative sur les patrons de flux. Le tableau 25 montre ces patrons, pour une capacité des tampons de 30 et 120 minutes, avec des coûts de 0,10 \$ et 0,15 \$.

Tableau 25

Patrons de flux du plan détaillé avec coût de transport vers l'entrepôt

Limite de 30 minutes - Coût de 0,10\$						Limite de 30 minutes - Coût de 0,15\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1	641	407				B1	579	469			
B2	6092	3799				B2	6154	3738			
B3		1004	1081			B3		1004	2404		
B4			1512			B4			618		
B5			3581	945	600	B5			3060	842	703
B6			559	5040	4447	B6			651	5143	4344

Limite de 120 minutes - Coût de 0,10\$						Limite de 120 minutes - Coût de 0,15\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1						B1					
B2	6734	3068				B2	6734	3068			
B3		2429	2110			B3		2429	590		
B4			1281			B4			1827		
B5			2647	333	462	B5			3492	522	273
B6			448	5164	5035	B6			525	5026	5224

Comparons d'abord entre eux les patrons de flux avec les deux coûts de transport pour des tampons limités à 30 minutes (partie supérieure du tableau) puis ensuite celles pour des tampons limités à 120 minutes (partie inférieure). Dans les deux cas, il n'y a pratiquement pas de différence et les patrons de flux demeurent bien concentrés sur les tronçons les plus économiques. Cet examen démontre à nouveau que le réseau-05 est tolérant. Il serait maintenant intéressant d'observer le comportement des patrons de flux du réseau-02 afin de vérifier sa tolérance.

4.9 Réseau non tolérant

4.9.1 Introduction

Il serait maintenant intéressant d'observer le comportement des patrons de flux d'un réseau de conception moins efficace afin de vérifier sa tolérance. On a montré à la section 3.5 qu'avec le réseau-02, il en coûtait près du double du coût des réseaux 05 et 06 pour la circulation des produits. On a vu que ce manque d'efficacité était causé par la configuration de ce réseau où tous les postes d'un même type sont regroupés ensembles. On a ainsi établi que le réseau-02 n'était pas efficace. Voyons alors comment les patrons de flux de ce réseau sont influencés par la variation de certains paramètres.

4.9.2 Méthodologie

Pour ce faire, la cinquième expérience pratiquée sur le réseau-05 est reprise dans ce sixième et dernier test avec le réseau-02 afin d'en éprouver la tolérance. Il s'agit de vérifier l'influence de la capacité des tampons ainsi que du coût de transport des pièces vers l'entrepôt sur les patrons de flux. Pour les quatre scénarios testés, on impute d'abord un coût de transfert vers l'entrepôt de 0,10\$ avec une limite de capacité des tampons de 30 minutes puis de 120 minutes. Après quoi le coût de transfert passe à 0,15\$ et on reprend les capacités de tampons de 30 et 120 minutes. Le tableau 26 montre les patrons de flux qui en résultent.

4.9.3 Présentation et interprétation des résultats

L'examen du tableau 26 montre que presque tous les tronçons subissent d'importants transferts de flux et ce, sans que ces variations ne suivent un

schéma compréhensible. On peut donc en déduire que le réseau-02 n'est pas tolérant. Ce résultat respecte la déduction tirée au chapitre 3 qui affirme que le réseau-02 n'est pas efficace.

Tableau 26

Patrons de flux réseau-02 avec coût de transport vers l'entrepôt

Limite de 30 minutes - Coût de 0,10\$						Limite de 30 minutes - Coût de 0,15\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1						B1					
B2						B2					
B3						B3					
B4	1554	898	1262	1692	2581	B4	3188	1964	596	1700	540
B5	5180	2281	1665	595	1003	B5	3546	1843	1549	1216	2570
B6		3554	3223	2759	1462	B6		2926	4005	2130	1937

Limite de 120 minutes - Coût de 0,10\$						Limite de 120 minutes - Coût de 0,15\$					
Flux	G1	G2	G3	G4	G5	Flux	G1	G2	G3	G4	G5
B1						B1					
B2						B2					
B3						B3					
B4	2381	1056	1079	1145	2053	B4	2678	769	780	1685	1801
B5	4353	625	2323	2344	1353	B5	4055	1633	2107	1608	1593
B6		4805	2095	2007	2091	B6		4084	2609	2203	2102

Ainsi, le modèle de planification détaillée peut être employé lors de la conception d'un réseau manufacturier pour vérifier la tolérance de différentes configurations. Si les patrons de flux optimaux sont toujours respectés lorsqu'on fait varier certains paramètres, cela indique que le réseau est tolérant.

Le prochain chapitre expose comment ce procédé manufacturier est modélisé à l'aide de la simulation par événements discrets afin de valider les résultats obtenus par les modèles d'optimisation et d'apporter un complément d'information sur les mesures de performances du système.

CHAPITRE 5

MODÈLE DE SIMULATION PAR ÉVÉNEMENTS DISCRETS

5.1 Introduction

Bien que les modèles d'optimisation aient l'avantage d'être très rapides pour résoudre un problème, ces modèles fournissent des mesures statiques de performance et ne peuvent donc pas fournir de renseignements sur l'aspect dynamique du système. Pour s'assurer que l'information générée par ces modèles est toujours valide quand la variabilité et la dynamique du procédé sont pris en compte, on applique alors la simulation par événements discrets. Ce chapitre présente comment la simulation par événements discrets est appliquée pour, d'une part, valider certains résultats générés par les modèles d'optimisation et, d'autre part, obtenir des mesures dynamiques de la performance du système.

On désire modéliser le réseau-05 et simuler une journée de production. Pour ce faire, on modélise d'abord le procédé de fabrication des tableaux de bord utilisé comme exemple. Puis, l'exécution du modèle de simulation fournit de l'information complémentaire concernant l'aspect dynamique du système, ce qui permet de préciser les résultats obtenus par les modèles d'optimisation. Cette information comprend le temps global de fabrication, le délai de fabrication des produits, le taux d'utilisation des processeurs, les coûts de circulation ainsi que le niveau des tampons.

La conception d'un modèle de simulation qui représente un problème réaliste représente une tâche assez complexe. On veut reproduire le plan de production journalier employé jusqu'ici. Les résultats des modèles d'optimisation sont en nombre réels. Comme le modèle de simulation traite des produits en quantités discrètes, il faut d'abord arrondir les données du plan de production, puis ajuster les patrons de charge et de flux afin de s'assurer que le plan est équilibré et réalisable. Il est donc nécessaire de diminuer la taille du problème afin que le temps requis à la modélisation soit raisonnable. Aussi, on choisit de reproduire le plan de production généré par le modèle agrégé, qui compte beaucoup moins de données que celui généré par le modèle détaillé.

Un modèle de simulation tient compte de l'aspect dynamique du système. Alors pour s'assurer que le plan de production qu'on veut achever soit réalisable, il faut que ce plan prévoie les délais qui sont causés par la gamme de fabrication. On choisit alors de reproduire, à l'aide du modèle de simulation, le plan de production agrégé où le taux d'utilisation des postes est limité à 85%.

On estime en effet que ce plan garde assez de jeu pour inclure les délais causés par la gamme de fabrication. Ce point de vue est basé sur les résultats obtenus dans le chapitre 4. Le modèle de planification détaillée est employé à la section 4.4 pour générer un plan sur les nœuds identifiés par le modèle agrégé. En limitant à 85% l'utilisation des processeurs lors de la planification agrégée, le jeu de 15% s'avère suffisant pour que l'on obtienne une solution au modèle de planification détaillée. On a également vu dans le chapitre précédent que les patrons de flux du plan agrégé limité à 85% sont plus étalés que ceux du plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé. Cela indique que le plan agrégé répartit la production sur un plus grand nombre de tronçons que le plan détaillé. Cela, jumelé au fait que le taux d'utilisation des postes est moins élevé dans le plan agrégé que dans le plan détaillé, nous permet de présumer que le

plan agrégé laisse suffisamment de latitude pour pouvoir être complété à l'aide du modèle de simulation, lorsque les aspects dynamiques du système sont considérés. Le fait de reproduire le plan agrégé plutôt que celui détaillé a aussi l'avantage de grandement diminuer le nombre des données requises pour reproduire le plan de production à l'aide de la simulation. On cherche donc ici à reproduire les patrons de flux et de charge générés par le modèle agrégé où la capacité des processeurs est limitée à 85%. Ce plan de production est présenté sous forme de VMN à la fin du chapitre 3.

Dans la section suivante, on explique comment est construit le modèle de simulation. Puis le modèle est exécuté, ce qui permet d'obtenir des mesures dynamiques de la performance du système.

5.2 Méthodes de modélisation et hypothèses

Le modèle de simulation a été développé à l'aide du langage *Visual Slam*. L'entrée de données se fait à partir de l'interface graphique *AweSim!* version 3.0. Il s'agit d'un outil de simulation par événements discrets fonctionnant sur plate-forme Windows et qui permet de simuler et d'analyser des systèmes de production (Pritsker *et al.*, 1999).

Le modèle de simulation est conçu à l'aide de deux fichiers distincts. Le premier fichier représente le réseau de simulation. Le second fichier est un énoncé de contrôle qui définit les constantes ainsi que les variables utilisées par le modèle, et qui établit l'état initial du modèle. Le réseau est formé de symboles qui modélisent les éléments d'un procédé, comme les files d'attente, les serveurs et les points de décision. Les symboles sont combinés pour former un réseau qui représente le système à étudier. Les entités du système, comme des gens ou des items, passent à travers ce réseau. Lorsque le modèle est exécuté,

le temps de simulation est avancé en accord avec le déplacement des entités à travers le réseau. Cela permet au modèle de simulation de tenir compte de l'aspect dynamique d'un système. L'énoncé de contrôle et le réseau du modèle de simulation sont présentés à l'annexe F.

Le réseau construit comporte deux blocs principaux et chacun compte deux sous-réseaux, tel qu'il est montré à la figure 18. Chaque sous-réseau apporte une contribution spécifique à la modélisation du système.

Le premier bloc organise les paramètres de fonctionnement du réseau. Ce bloc comporte d'abord le sous-réseau d'initialisation des données de production, puis celui pour l'assignation du plan de production. Le second bloc concerne l'exécution du plan de production. Ce bloc comporte d'abord le sous-réseau pour la fabrication et l'assemblage des composantes, et enfin celui pour l'assemblage des produits finaux. Aucun délai n'est imputé au déplacement des entités à travers le premier bloc. Les délais sont appliqués seulement pour l'exécution du plan de production. C'est donc à partir du sous-réseau de fabrication et d'assemblage des composantes que le temps de simulation augmente avec le déplacement des entités à travers le réseau. Le fonctionnement de ces sous-réseaux ainsi que les hypothèses posées lors de la conception de chacun sont expliqués dans ce qui suit. Les figures 19 à 24 montrent les diagrammes qui schématisent le procédé de simulation de chaque sous-réseau en utilisant la notation présentée au tableau 27.

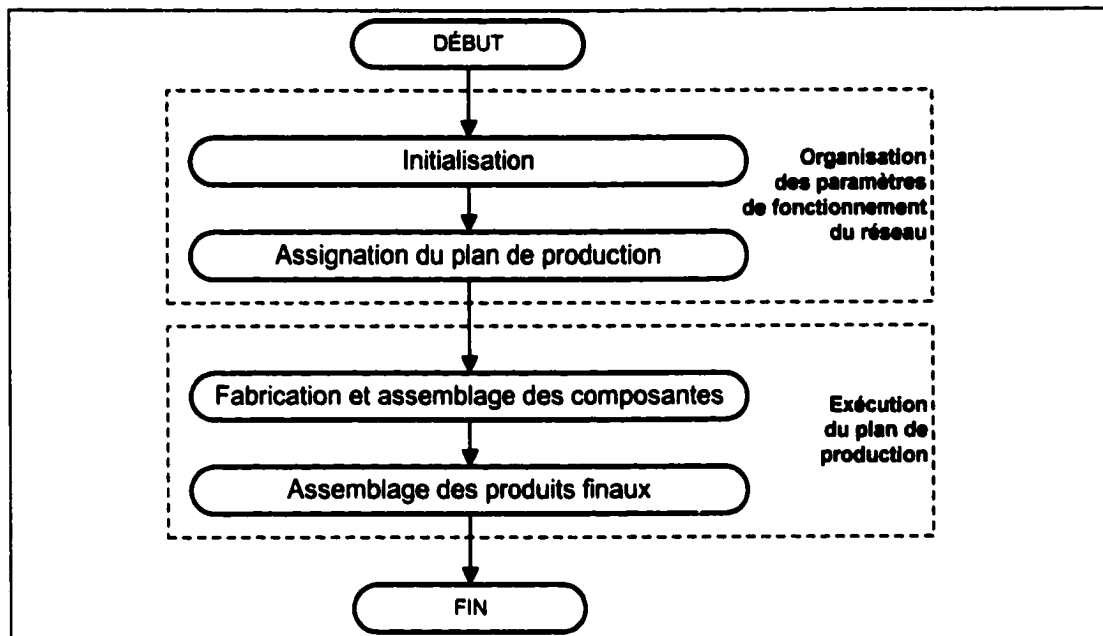


Figure 18 Diagramme de la simulation

Tableau 27

Notation des diagrammes de simulation

Indices

- i, i' : Produit à être traité par le réseau.
 n, n' : Processeur du réseau.

Variables

- C_{ij}^F : Coût de circulation cumulé pour une unité de produit i .
 C_i^P : Coût de circulation cumulé pour l'ensemble des produits i .
 C^T : Coût de circulation total.
 $F_{inn'}$: Flux des produits i à faire circuler du processeur n au processeur n' .
 P_{in} : Quantité de produits i à traiter au processeur n .
 R_i : Quantité de lots à fabriquer pour un produit i .
 S_n : Niveau du tampon du processeur n
 T^0 : Moment d'arrivée dans le système d'une unité.
 T_i : Temps dans le système pour une unité de produit i .
 T_{NOW} : Moment présent de la simulation
 T : Temps global de fabrication.
 U_n : Taux d'utilisation du processeur n .

Paramètres

- b : Taille des lots.
 $C_{inn'}^F$: Coût de circulation d'une unité i entre les processeurs n et n' .
 $f_{inn'}$: Flux total des produits i assigné du processeur n au processeur n' d'après le plan de production.
 p_{in} : Quantité totale de produits i assignée au processeur n d'après le plan de production.
 $q_{ii'}$: Quantité de produits i requise pour la fabrication d'un produit i' .
 r_i : Demande externe globale pour un produit i .
 s_n : Limite de capacité du tampon du processeur n
 t_n : Temps de traitement au processeur n .

Autres paramètres

- $W, [w]$: Ensemble des postes [composantes] du premier niveau (AS, AT, B)
 $X, [x]$: Ensemble des postes [composantes] du second niveau (BS, BT)
 $Y, [y]$: Ensemble des postes [composantes] du troisième niveau (G, S, T)
 $Z, [z]$: Ensemble des postes [produits A..F] du dernier niveau (C)

5.2.1 Initialisation

Le premier sous-réseau de simulation sert à l'initialisation des données de production. Le diagramme montrant ce réseau est présenté à la figure 19.

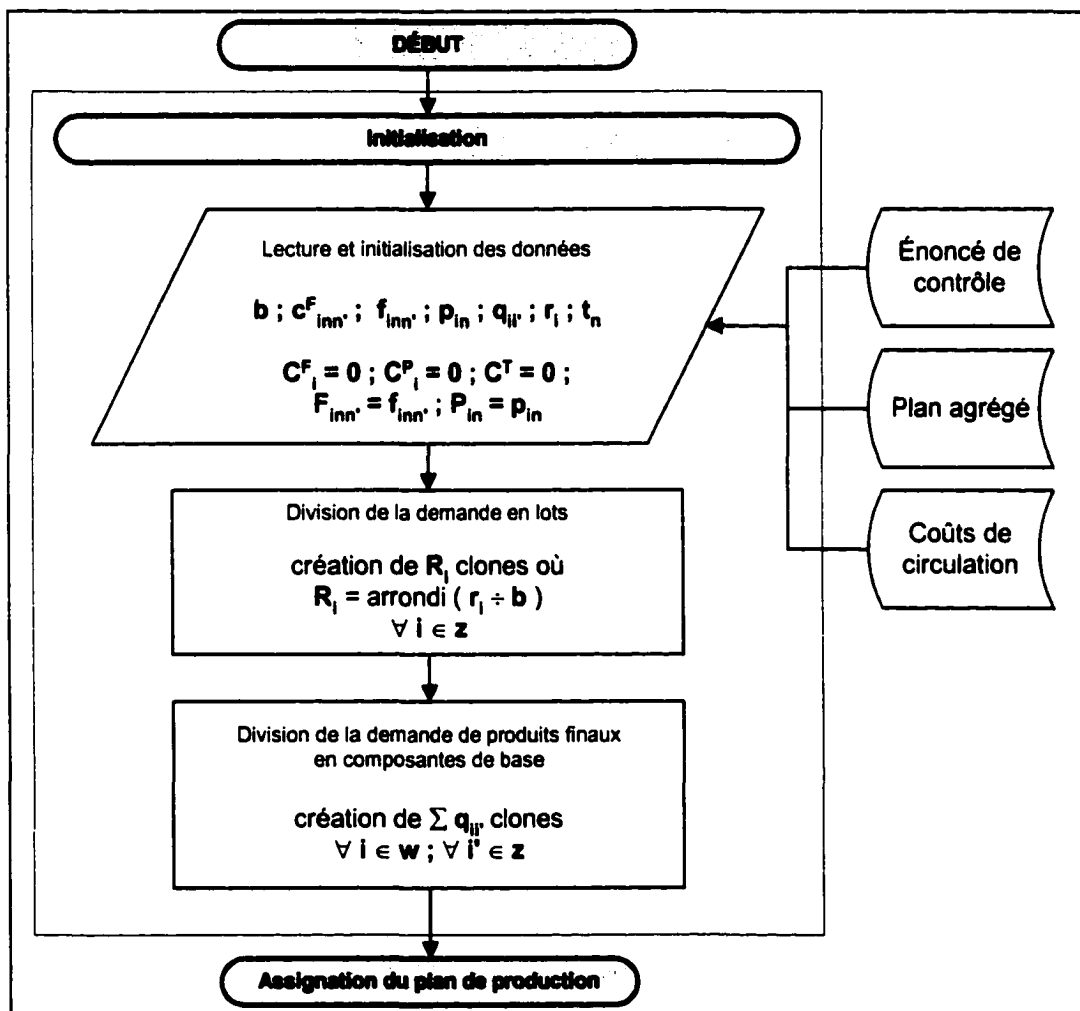


Figure 19 Diagramme du réseau d'initialisation

Pour débiter, les données sont lues à partir de différentes sources et elles sont stockées dans le programme. Les paramètres correspondant à la taille des lots (b), à la demande externe de produits finaux (r_i), à la nomenclature de

produits (q_{ij}) et au temps de traitement à chaque processeur (t_n) proviennent de l'énoncé de contrôle du modèle de simulation. Ces paramètres sont mémorisés par des variables globales dans *AweSim*. Pour pouvoir s'adapter facilement à différents patrons, les paramètres relatifs aux patrons de charge (p_{in}) et de flux ($f_{inn'}$) proviennent d'un fichier externe qui contient le plan de production. Un tableau est utilisé dans *AweSim* pour mémoriser les patrons de flux et de charge. Les quantités y sont détaillées pour chaque produit, chaque processeur et chaque tronçon entre deux processeurs. Les coûts de circulation entre chaque processeur ($c^F_{inn'}$) sont également lus à partir d'un fichier externe afin de permettre la simulation de différents réseaux.

Après la lecture des données, les variables concernant les coûts (C^F_i ; C^P_i ; et C^T) sont toutes mises à zéro. La valeur initiale de la variable représentant le flux des produits à faire circuler entre deux processeurs ($F_{inn'}$) est ajustée à celle du paramètre homologue ($f_{inn'}$). De même, la valeur initiale de la variable représentant la quantité de produits à traiter à un processeur (P_{in}) est réglée à celle du paramètre homologue (p_{in}).

La demande externe pour chaque type de produit est ensuite divisée en lots. La quantité de lots à fabriquer est calculée en divisant la demande pour chaque type de produit (r_i) par la taille des lots (b) et en arrondissant cette valeur à l'entier supérieur. Pour chaque produit (i), il y a (R_i) lots de produits finaux à fabriquer. Comme on le verra plus loin, l'option de produire par lots permet de diminuer le temps d'exécution sans nuire à la précision des résultats. Le temps d'exécution représente le temps requis par le programme de simulation pour exécuter le modèle. Il ne faut pas le confondre avec le temps global de fabrication.

La demande de lots de produits finaux est ensuite divisée en composantes de base. Il s'agit en fait d'explorer la nomenclature de produits pour effectuer la planification des besoins matières. Ainsi, chaque demande pour un lot de produits finaux est divisée en autant de clones qu'il est requis de composantes de premier niveau. Cette opération est effectuée pour tous les types de produits finaux. Ces entités, ces clones, sont ensuite acheminées vers une section du réseau d'assignation du plan de production, d'après le type de composante et le type de produit qu'une entité représente.

5.2.2 Assignation du plan de production

Le second sous-réseau de simulation sert à l'assignation du plan de production. Comme il a été mentionné au début du chapitre, on désire reproduire le plan de production généré par le modèle de planification agrégée. Pour ce faire, chaque demande pour une composante se voit assigner un plan de production bien précis concernant les postes où elle sera traitée, d'après les patrons de flux et de charge spécifiés précédemment. Ainsi, lors de son arrivée à la section fabrication et assemblage, chaque composante connaîtra le chemin qu'elle doit suivre.

Pour chaque famille de postes, plusieurs sous-réseaux d'assignation sont construits, soit un pour chaque type de produit traité sur ce genre de poste. Par exemple, seuls les quatre produits C, D, E et F requièrent une composante AS tandis que tous les produits requièrent des bobines. Alors quatre réseaux sont bâtis pour l'assignation aux postes AS et six réseaux pour l'assignation aux postes B. Chaque demande de lot est envoyée au réseau correspondant à son type de produit.

Afin de reproduire les résultats du modèle agrégé, représentés par les VMN, on a recours à une assignation cyclique, basée sur l'importance de la charge de chaque produit sur un poste. Voici un exemple du calcul de l'importance de la charge servant à déterminer l'ordre pour l'assignation cyclique.

Le plan de production donne le poids que vaut chaque type de produit sur la production totale d'un processeur. Si on regarde par exemple le VMN pour le produit F, représenté à la figure 20, on remarque que 1352 composantes AS sont assignées au poste AS1 et 4072 sont assignées à AS2.

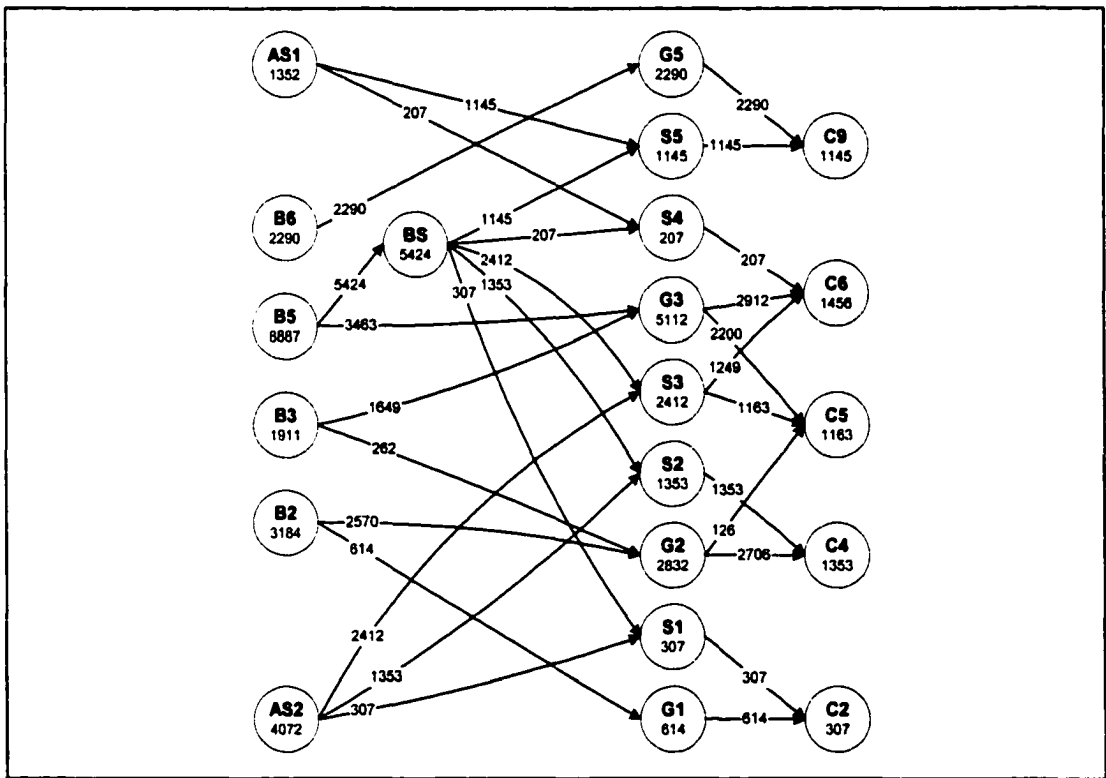


Figure 20 VMN pour le produit F

Si le modèle de simulation effectue une production par lots de 25, par exemple, il y a alors 54 lots de composantes AS fabriqués au poste AS1 ($54 \times 25 = 1350$) et 163 lots fabriqués au poste AS2 ($163 \times 25 = 4075$). Des 54 lots fabriqués à AS1, 46 sont transférés au poste S5 et 8 au poste S4. Le plan de production par lots a été balancé afin que la demande globale et les patrons de flux soient respectés. Le modèle de simulation est bâti de façon à respecter ce plan de production par lots.

On veut que tous les postes de travail puissent commencer à produire au début de la journée de production. Il faut pour cela que des ordres de fabrication soient envoyés à tous les postes avant le début de la production. Pour ce faire, la logique d'assignation a été conçue pour déterminer la séquence d'envoi des demandes aux postes d'après l'importance de charge de chaque produit sur un poste.

Si on revient au VMN pour le produit F sur les postes AS, on voit que près des trois quarts de la demande vont à AS2 et un quart à AS1. La logique d'assignation répartie les commandes sur chaque poste en respectant cette proportion de charge, jusqu'à ce que toute la production planifiée sur un poste ait été assignée. Ainsi, pour la répartition de charge aux postes AS pour le produit F, la logique d'assignation envoie trois commandes sur quatre à AS2, jusqu'à concurrence de 163, et une sur quatre à AS1, jusqu'à concurrence de 54. Cette assignation est faite de façon cyclique, dans l'ordre AS2, AS1, AS2, AS2. Puis le cycle recommence. Il en va de même pour les cinq autres produits sur tous les types de postes. Plusieurs sous-réseaux d'assignation ont été construits, soit un pour chaque produit traité sur un processeur. Les sous-réseaux d'assignation ont été définis d'après l'importance de charge assignée à chaque processeur dans le plan de production que l'on cherche à reproduire

Grâce à cette logique d'assignation, des ordres de fabrication pour tous les produits assignés à un poste arriveront à ce poste de façon séquentielle, pour qu'un poste ne concentre pas toute sa production sur un seul produit à la fois. Le nombre de commandes pour chaque type de produit respectera malgré tout l'importance de sa charge sur l'ensemble des produits traités à ce poste. On présume qu'en employant cette logique, les différents produits seront répartis sur tous les niveaux et tous les postes en quantité suffisante, de façon à assurer leur disponibilité lorsqu'ils sont requis. Cela devrait maximiser le taux d'utilisation des processeurs et minimiser le temps global de fabrication, c'est-à-dire le temps requis pour la complétion de toute la demande.

Pour chaque sous-réseau d'assignation, l'importance de la charge que vaut un produit sur la production totale du poste a été calculée antérieurement, d'après le plan de production que l'on cherche à reproduire. La séquence d'assignation basée sur l'importance de la charge a ainsi été déterminée préalablement à la construction de ce modèle de simulation.

L'assignation du plan de production s'effectue en deux phases, soit d'abord l'assignation aux postes de premier niveau, puis celle aux postes de niveaux supérieurs.

5.2.2.1 Assignation aux postes du premier niveau

Dans ce travail, les postes de premier niveau appartiennent aux familles de postes AS, AT ou B. Pour alléger le texte, le terme *entité* sera parfois employé pour désigner un lot de composantes ou de produits. Dans cette section, une entité représente une demande pour un lot de composantes servant à fabriquer des produits de type *i*. Suite à son passage dans cette section, chaque entité connaîtra le chemin qu'elle doit suivre, c'est-à-dire tous

les tronçons qu'elle doit emprunter entre les niveaux de processeurs n et n' . La figure 21 présente le diagramme pour l'assignation aux postes du premier niveau.

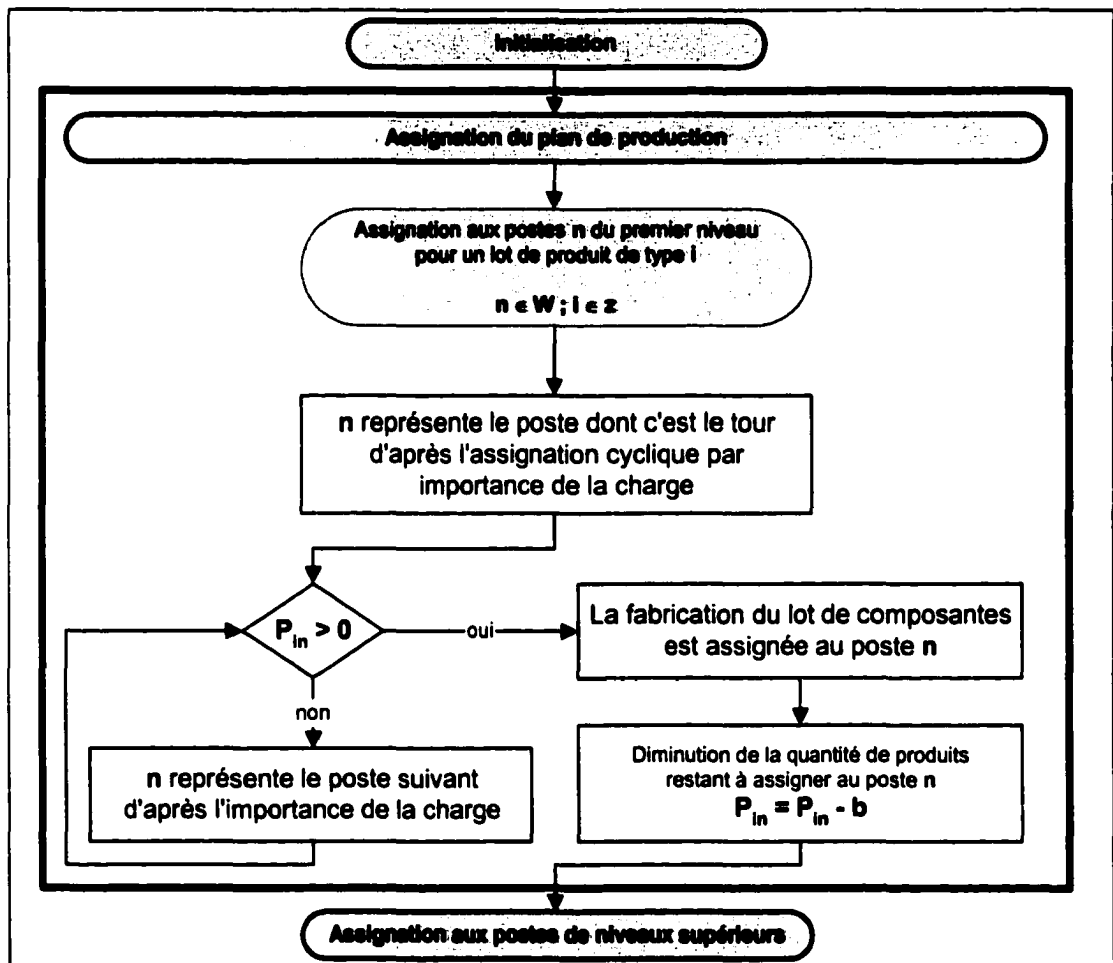


Figure 21 Diagramme du réseau d'assignation aux postes du premier niveau

Quand une entité arrive à cette section, le modèle vérifie d'abord quel processeur n , parmi ceux de la famille de postes du premier niveau, est le prochain d'après la séquence d'assignation.

Le modèle vérifie ensuite s'il reste des produits i à assigner au poste n , donc si la variable P_{in} est supérieure à zéro. Si ce n'est pas le cas, le modèle refait cette vérification avec le prochain processeur défini par la séquence d'assignation, jusqu'à ce qu'il trouve un poste dont la P_{in} est supérieure à zéro.

Lorsque le modèle trouve un processeur n pour lequel il reste des produits à assigner, le lot de composantes est assigné à ce poste. Pour ce faire, l'entité garde en mémoire, à l'aide d'un attribut, quel est le premier processeur où elle sera traitée lors de son arrivée au réseau de fabrication et d'assemblage des composantes.

Un lot de composantes venant d'être assigné au poste n , la quantité de produits i restant à assigner à ce poste est alors diminuée de la taille d'un lot.

Le lot de composantes est ensuite transféré à la section du réseau où s'effectue l'assignation aux postes de niveaux supérieurs.

5.2.2.2 Assignation aux postes des niveaux supérieurs

La figure 22 présente l'assignation aux postes de niveaux supérieurs. Encore ici, plusieurs sous-réseaux d'assignation sont construits pour chaque famille de postes, soit un pour chaque type de produit traité sur ce genre de poste. Par exemple, seuls les quatre produits C, D, E et F requièrent une composante AS. Alors quatre sous-réseaux sont bâtis pour l'assignation aux postes de type S à partir des postes AS. Cela permettra de reproduire les patrons de flux sur les tronçons AS-S.

Aussi, quand une entité arrive à cette section, elle est acheminée au sous-réseau d'assignation correspondant à la fois au type de produit que l'entité

représente et au processeur de premier niveau auquel elle a été assignée juste avant.

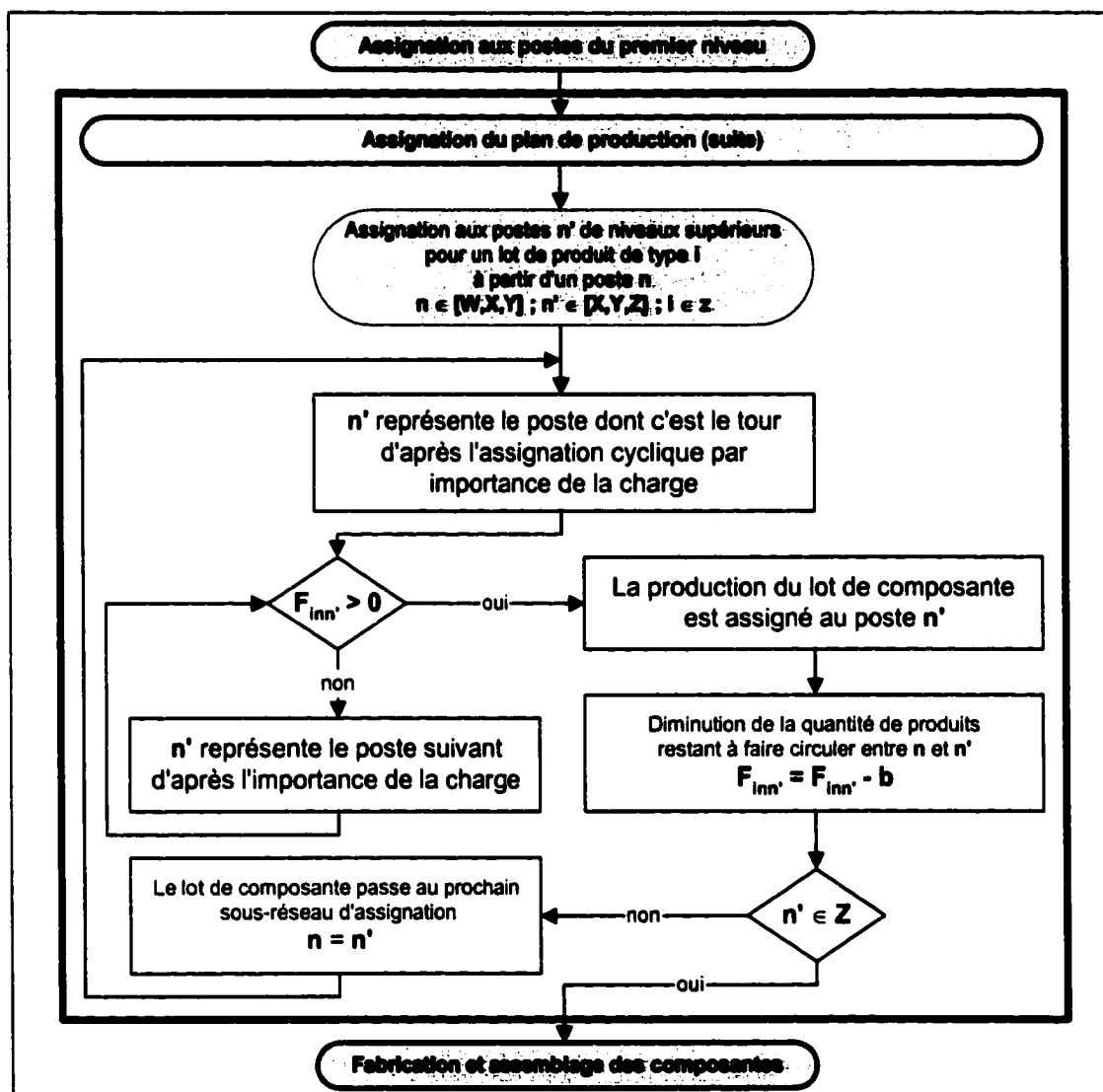


Figure 22 Diagramme du réseau d'assignation aux postes de niveaux supérieurs

Le fonctionnement de ce réseau est très semblable à celui du réseau précédent. La principale différence est qu'ici, le nœud de départ du flux est connu car il a été fixé lors de l'étape précédente. Il s'agit du processeur n . Dans cette section du réseau, le modèle doit assigner l'entité à un poste du niveau suivant de la gamme de fabrication. Il s'agit d'un processeur n' . Le modèle vérifie alors d'abord quel processeur n' , parmi ceux de la famille de postes dont il est question, est le prochain dans la séquence d'assignation.

Le modèle vérifie ensuite s'il reste des produits i en provenance du poste n à envoyer au poste n' , donc si la variable $F_{inn'}$ est supérieure à zéro. Si ce n'est pas le cas, le modèle refait cette vérification avec le prochain processeur, selon la séquence d'assignation prédéterminée, jusqu'à ce qu'il trouve un poste dont le $F_{inn'}$ est supérieur à zéro.

Lorsque le modèle trouve un processeur n' auquel il reste des produits i à assigner en provenance du poste n , le lot de composantes est assigné à ce poste. Pour ce faire, l'entité garde en mémoire, à l'aide d'un attribut, quel est le prochain processeur où elle sera traitée lors de son cheminement dans le réseau de fabrication et d'assemblage des composantes.

Un lot de composantes venant d'être assigné au poste n' , la quantité de produits i restant à assigner à ce poste, en provenance du poste n , est ensuite diminuée de la taille d'un lot.

La même logique d'assignation est utilisée pour tous les types de postes. Ce sous-réseau assigne ainsi un lot de composantes provenant d'un processeur de niveau inférieur n à un processeur de niveau supérieur n' . Si les processeurs représentés par n' appartiennent aux postes du dernier niveau, donc aux postes d'assemblage final, cela indique que l'entité a passé à travers tous les réseaux

d'assignation requis, couvrant l'ensemble des niveaux de la gamme de fabrication. L'exécution du plan de production peut alors débuter et le lot de composantes est donc transféré à la section du réseau où s'effectue la fabrication et l'assemblage des composantes.

Si les processeurs représentés par n' n'appartiennent pas aux postes du dernier niveau, cela indique que l'entité n'a pas terminé son assignation. Dans ce cas, le processeur n' auquel vient d'être assigné le lot de composantes devient le processeur n de départ du prochain tronçon. L'entité est alors acheminée vers le sous-réseau suivant, d'après la gamme de fabrication et le type de produit qu'elle représente. Et le processus reprend, jusqu'à ce que l'entité ait couvert l'ensemble des niveaux de la gamme de fabrication.

5.2.3 Fabrication et assemblage des composantes

Le troisième sous-réseau de simulation sert à la fabrication et à l'assemblage des composantes. On est arrivé à la phase de production comme telle. C'est à partir de cette section que les délais de fabrication sont affectés au déplacement des entités à travers le réseau. Cela fait augmenter le temps de simulation, ce qui permet au modèle de tenir compte de l'aspect dynamique du système. Le diagramme montrant ce sous-réseau est présenté à la figure 23.

Une entité qui arrive à ce sous-réseau représente une demande de fabrication pour un lot de composantes de base pour un certain modèle de produit. Il peut s'agir de composantes de type AS, AT ou B et de produits de modèle A, B, C, D, E ou F. Chaque entité connaît son plan de production, c'est-à-dire les processeurs auxquels elle a été assignée pour couvrir l'ensemble des opérations de la gamme de fabrication.

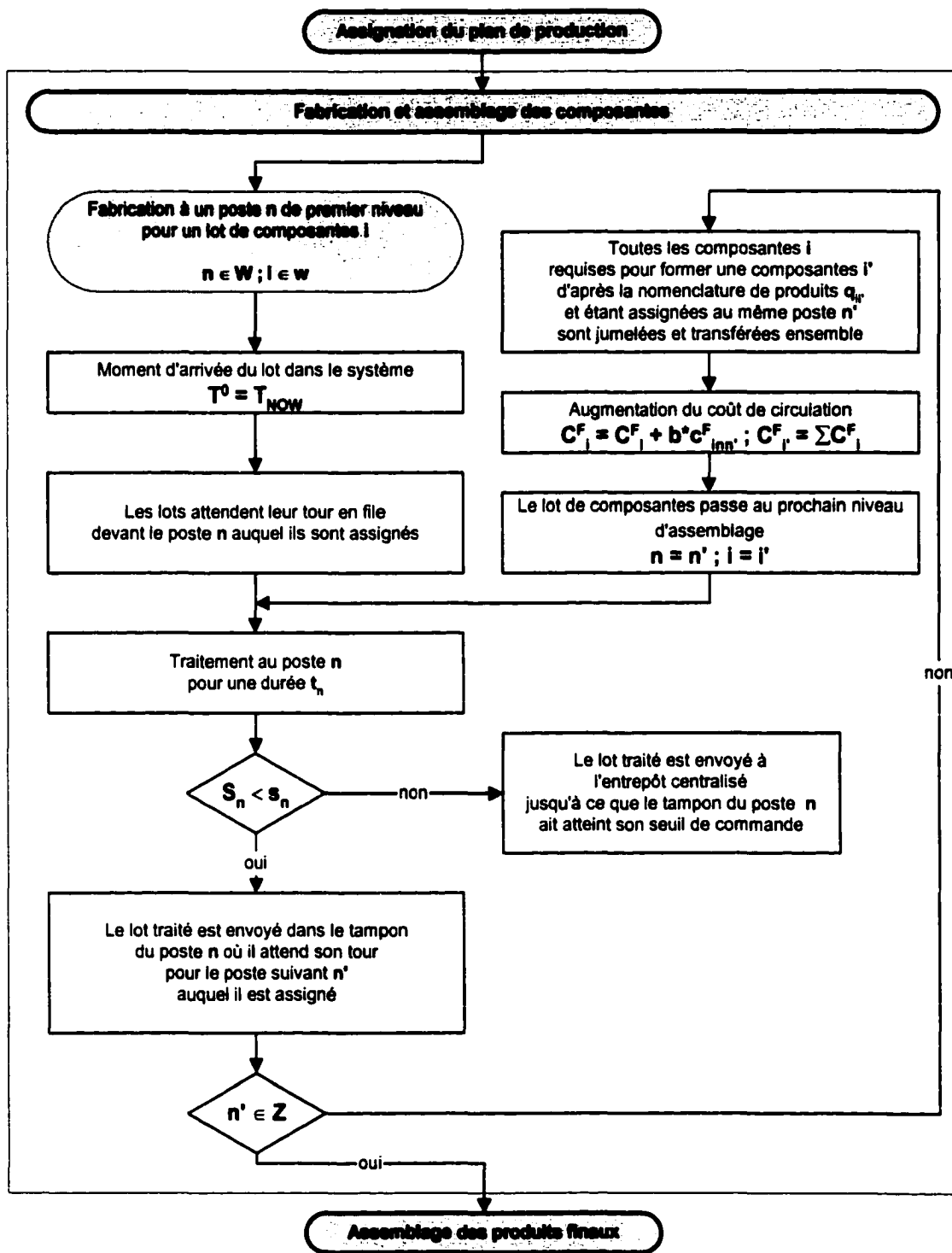


Figure 23 Diagramme du réseau de fabrication des composants

Le moment d'arrivée d'un lot dans ce sous-réseau est noté dans son attribut T^0 . Le moment d'arrivée correspond au temps présent de simulation T_{NOW} . Cet attribut servira à la fin pour calculer le temps que les produits ont passé dans le système.

Les lots sont ensuite acheminés à la section du sous-réseau de fabrication correspondant au processeur de premier niveau auquel ils ont été assignés. Ils se retrouvent dans une file d'attente, devant le processeur auquel ils ont été assignés.

Un processeur traite les lots un à la fois et l'ordre de traitement est celui du premier arrivé, premier servi. Les lots demeurent dans la file jusqu'à ce que leur tour arrive et que le lot précédent ait libéré le processeur.

Quand le processeur se libère, le lot en tête de file l'accapare pour la durée requise à sa fabrication. Le temps requis pour le traitement d'un lot sur chaque processeur (t_n) a été défini dans l'énoncé de contrôle. Après le temps de traitement, la ressource est libérée, ce qui permet au lot suivant dans la file d'attente de l'accaparer à son tour.

Après qu'un lot ait été traité à un poste de fabrication, il est acheminé vers un tampon, tout juste en aval du poste où il a été fabriqué. Il existe donc autant de tampons qu'il y a de processeurs et les tampons sont tous en aval de leur processeur respectif. Les lots demeurent dans le tampon jusqu'à ce qu'ils soient requis au poste suivant. Dans le cas présent, la capacité des tampons est illimitée. Mais il a été prévu qu'on puisse limiter la taille des tampons en spécifiant une capacité maximale (s_n) au lieu de la déclarer illimitée. Ainsi, si on choisait de limiter la capacité des tampons et qu'un tampon se retrouvait plein, les pièces supplémentaires seraient acheminées vers un espace dédié dans

l'entrepôt centralisé. Les lots y demeureraient jusqu'à ce que le tampon atteigne son seuil de commande. Tous les processeurs de fabrication et d'assemblage possèdent leur espace tampon ainsi qu'un espace dédié dans l'entrepôt centralisé au cas où le tampon serait rempli.

Si le prochain poste de la gamme de fabrication est un processeur de dernier niveau, le lot est alors envoyé à la section d'assemblage des produits finaux. Sinon, le lot passe à la prochaine étape de la présente section.

Si le prochain poste de la gamme de fabrication n'est pas un processeur de dernier niveau, on vérifie alors si plus d'une composante i est requise pour former une composante i' , d'après la nomenclature de produits. Si c'est le cas, les composantes nécessaires qui sont toutes assignées à un même poste d'assemblage sont jumelées. Les composantes groupées seront transférées ensemble au poste suivant afin d'y être assemblées.

Le coût de circulation est ensuite calculé. Pour ce faire, le coût de circulation de chaque lot de composantes est augmenté du coût afférent au transfert d'un lot entre le processeur du niveau précédent et celui où sera effectué l'assemblage. Si plus d'une composante i est requise pour former une composante i' , les coûts de circulation de tous les lots de composantes i sont additionnés et le total est appliqué au lot de composantes i' .

Le processeur n' où vient d'être transféré le groupe de composantes devient le processeur n qui va procéder à leur assemblage. De même, le groupe de composantes i jumelées prend le statut de la composante i' qu'il va former. On a donc maintenant un groupe i prêt à être traité au poste n .

Le groupe de composantes est ensuite acheminé à la section du sous-réseau d'assemblage correspondant au processeur de niveau supérieur auquel il a été assigné. Le groupe accapare le processeur pour la durée requise à son assemblage puis il est acheminé vers le tampon en aval du poste.

Le processus continue ainsi jusqu'à ce que les composantes soient passées à travers le procédé de fabrication du premier niveau ainsi qu'à travers ceux d'assemblage du second et du troisième niveau. Après quoi les lots de composantes de troisième niveau [G, S et T] demeurent dans leur tampon respectif, en attente pour l'assemblage final au dernier sous-réseau.

5.2.4 Assemblage des produits finaux

La conception du dernier sous-réseau de simulation pose deux difficultés. Il est d'une part important que lors de l'assemblage, le modèle de simulation assemble des pièces appartenant toutes au même modèle. Il faut d'autre part que toutes les composantes requises à l'assemblage d'un produit final soient disponibles dans les tampons des processeurs de troisième niveau avant de procéder à l'assemblage.

Pour surmonter ces difficultés, il a d'abord été présumé à la section 5.2.2 que la logique d'assignation employée permettait de répartir les différents produits sur tous les niveaux et tous les postes en quantité suffisante pour assurer leur disponibilité lorsqu'ils sont requis. On sait ensuite que le plan de production que l'on cherche à reproduire a été conçu de façon à minimiser les coûts de circulation. La majorité des pièces assemblées à un poste de type C proviennent alors logiquement des postes G, S et T les plus proches du poste C en question. Aussi, le sous-réseau d'assemblage aux processeurs C effectue une recherche des composantes à assembler en considérant la proximité des

tampons par rapport à un poste C. Il a été décidé qu'un poste d'assemblage final traiterait en priorité les pièces se trouvant dans les tampons les plus près de lui.

Le diagramme symbolisant le sous-réseau de simulation pour l'assemblage des produits finaux est présenté à la figure 24. Il existe en fait un sous-réseau pour chaque processeur d'assemblage final. Le fonctionnement est le même pour tous.

Les postes d'assemblage final [C] ont un horaire de travail sur 16h seulement et ils débutent leur production 8h après tous les autres. Ainsi, quand l'horloge de la simulation atteint 28800s, les postes d'assemblage final sont activés.

Voici comment le sous-réseau d'assemblage aux processeurs de dernier niveau effectue la recherche de composantes à assembler. Dans le présent exemple, les seules composantes entrant dans la fabrication de tous les modèles de tableaux de bord sans exception sont les l'indicateurs généraux. Tous les modèles comportent en effet soit une ou deux composantes de type G tandis que ce ne sont pas tous les modèles qui comportent une composante de type S ou une de type T.

Alors quand un sous-réseau représentant un poste d'assemblage final est activé, le modèle commence par rechercher parmi les cinq tampons n des processeurs G un lot de composantes qui a été assigné au poste n' représenté par le sous-réseau.

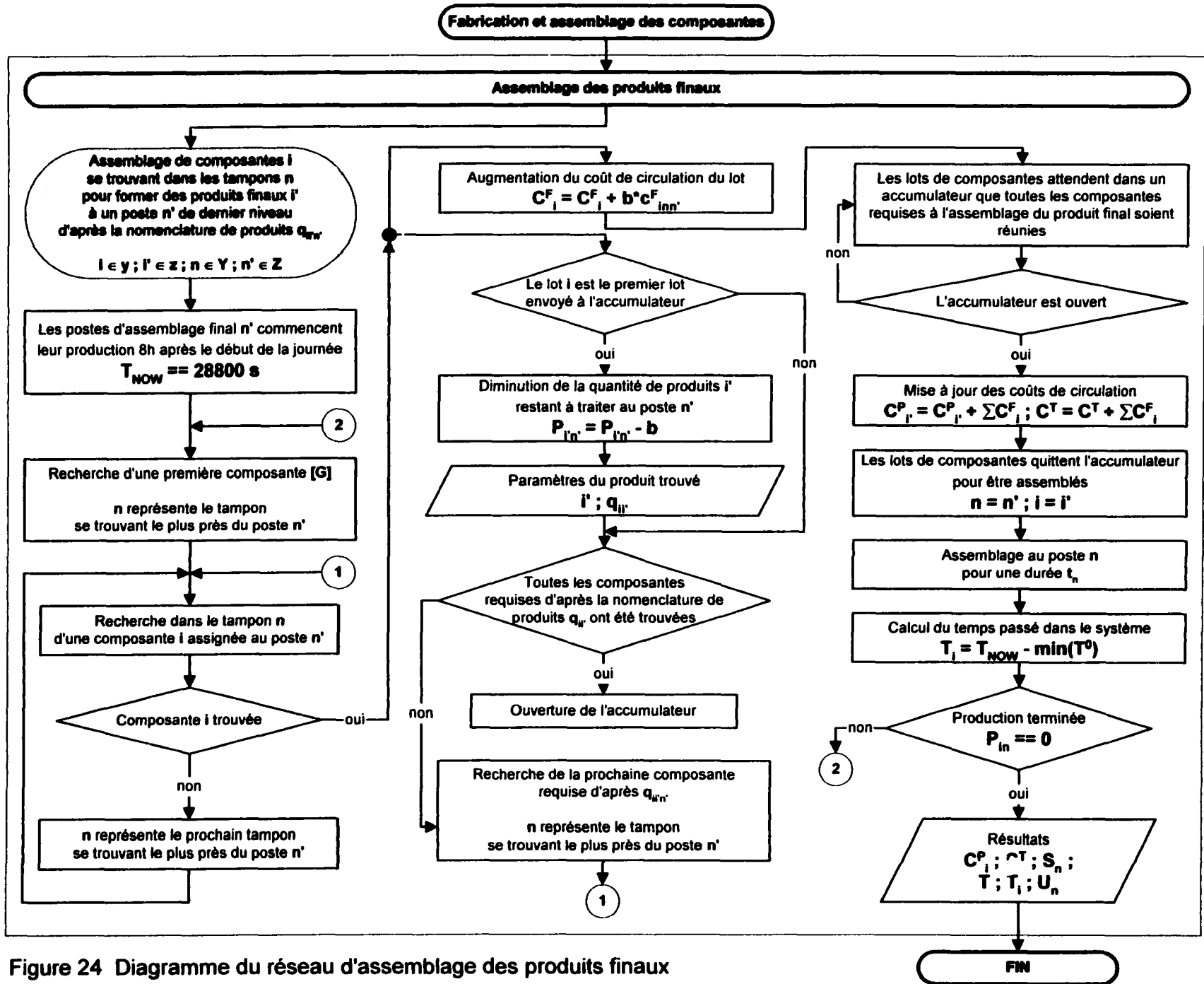


Figure 24 Diagramme du réseau d'assemblage des produits finaux

La recherche débute dans le tampon G le plus près du poste C en question et vérifie s'il s'y trouve une entité assignée à ce poste C. Si aucune entité respectant cette exigence n'est trouvée dans le premier tampon, la recherche continue dans le second tampon le plus près, puis dans le tampon suivant, et ainsi de suite jusqu'à ce que la recherche ait été effectuée dans les cinq tampons de type G.

Si aucun lot de composantes G assigné à ce poste C n'a été trouvé, c'est qu'aucun lot assigné à ce poste n'a encore été fabriqué. Il y a alors une petite attente, puis la recherche reprend à partir du premier tampon le plus près. Lorsqu'un premier lot de composantes G assigné au poste C est trouvé, deux actions sont exécutées.

D'une part, la quantité de produits de modèle i' assignés au poste C est diminuée de la taille d'un lot. Puis les paramètres concernant le produit final sont mémorisés; c'est-à-dire le modèle de produit final dont il s'agit ainsi que les composantes requises à sa fabrication d'après la gamme de fabrication.

D'autre part, le coût de circulation pour le lot de composantes G trouvé est calculé comme à la section précédente. Pour ce faire, le coût de circulation du lot est augmenté du coût afférent au transfert d'un lot entre le processeur du niveau précédent et celui où sera effectué l'assemblage final. Le lot est par la suite envoyé dans un accumulateur pour y attendre que toutes les autres composantes requises soient trouvées à leur tour.

Après avoir trouvé un premier lot de composantes de type G, le modèle vérifie si d'autres composantes sont requises pour l'assemblage du produit final. Si c'est le cas, la recherche des autres lots composantes reprend pendant que le premier lot trouvé demeure dans l'accumulateur.

La recherche des autres composantes s'effectue de la même façon que celle pour le premier lot de composantes G. Selon le type de composante requise (G, S ou T), le modèle débute sa recherche par le tampon (G, S ou T) le plus près du poste C et vérifie s'il s'y trouve un lot de composantes assigné à ce poste. Si aucun lot respectant cette exigence n'est trouvé dans le premier tampon, la recherche continue dans le second tampon le plus près, puis dans le tampon suivant, et ainsi de suite jusqu'à ce que la recherche ait été effectuée dans tous les tampons contenant des composantes du type de celles recherchées.

Lorsqu'un nouveau lot de composantes est trouvé, son coût de circulation est calculé puis il va rejoindre le premier lot de composantes G dans l'accumulateur, dans l'attente que toutes les composantes requises soient réunies. Quand cela est fait, l'accumulateur est alors ouvert et les composantes qui y sont réunies sont prêtes à être assemblées.

Les coûts de circulation sont ensuite mis à jour. Comme plus d'une composante i est requise pour former un produit final i' , le coût de circulation de chaque lot de composantes (C^F_i) est additionné et le total est appliqué au coût du lot de produits finaux ($C^F_{i'}$). Ce coût est ajouté au coût de circulation cumulé pour l'ensemble des produits finaux de modèle i' ($C^P_{i'}$) et il est également ajouté au coût de circulation total (C^T) pour l'ensemble des modèles.

Le processeur n' où sont acheminés les lots de composantes devient le processeur n qui va procéder à leur assemblage final. De même, les composantes i groupées prennent le statut du produit final i' qu'elles vont former. On a donc maintenant un regroupement de lots i prêt à être assemblé au poste n .

Le groupe de lots arrive au processeur d'assemblage final et accapare le processeur pour la durée t_n requise à son assemblage. Pendant ce temps, l'accumulateur est refermé, en attente du prochain groupe de composantes. Dans ce travail, la durée t_n est considérée comme étant déterministe et elle correspond à la durée moyenne de traitement.

Quand le processeur a fini d'assembler le lot de produits finaux, le temps que le lot a passé dans le système est calculé. Pour ce faire, le modèle calcule la différence entre le moment présent indiqué par l'horloge de la simulation et le moment d'arrivée du premier lot de composantes ayant servi à la fabrication de ce produit.

Le lot de produits finaux quitte alors le réseau de simulation. Tous les renseignements contenus dans ses attributs sont récoltés par le modèle. Les résultats seront compilés à la fin de la simulation.

Quand un lot est fini d'assembler par un processeur, le modèle vérifie si la production assignée à ce poste a été complétée.

Si le processeur n'a pas terminé sa production, une nouvelle recherche pour un premier lot de composantes G est entreprise. Le fonctionnement est le même qu'au début de cette section de réseau. Le modèle commence donc par rechercher parmi les cinq tampons des processeurs G un lot qui a été assigné au présent poste C.

Si le processeur a terminé sa production, la simulation se poursuit aux autres processeurs, jusqu'à ce que tous aient complété la production qui leur était assignée. Lorsque tous les postes du dernier niveau ont complété leur

production, l'ensemble des données est alors compilé par le modèle puis les résultats sont présentés sous forme de rapport. On obtient des statistiques concernant le temps global de fabrication, le délai de fabrication des produits, le taux d'utilisation des processeurs, les coûts de circulation ainsi que le niveau des tampons.

La construction du modèle de simulation est maintenant terminée. La simulation peut à présent être exécutée pour reproduire les patrons de charge et de flux qui ont été obtenus à l'aide du modèle de planification agrégée avec une limite de 85% sur l'utilisation des processeurs. Les résultats de la simulation sont présentés et commentés à la section suivante.

5.3 Résultats dynamiques

Le modèle de simulation par événements discrets est utilisé d'une part afin de valider les résultats du plan détaillé. Il est employé d'autre part pour générer un complément d'information sur les mesures dynamiques de performance du système.

Le présent modèle a été conçu pour générer des informations concernant le temps global de fabrication, le délai de fabrication des produits, le taux d'utilisation des processeurs, les coûts de circulation ainsi que le niveau des tampons. Un rapport contenant ces renseignements est généré après l'exécution du modèle. Ce rapport est présenté à l'annexe G. Les principaux résultats sont résumés dans ce qui suit.

Pour que le modèle de simulation soit valide, il faut qu'il se comporte comme le système étudié. Il faut garder en mémoire que le but de la planification est de rencontrer la demande pour les produits tout en minimisant

les coûts de production. Dans notre cas, il est donc important que le déroulement de la simulation respecte les patrons de charge et de flux générés par le plan agrégé afin que les coûts de circulation soient près de l'optimal.

L'analyse primaire des résultats montre que les patrons de charge et de flux sont bel et bien respectés. Le fait de produire par lots de 25 ne nuit donc pas au respect du plan. Voyons alors les mesures dynamiques de la performance qui sont fournies par l'exécution du modèle de simulation.

5.3.1 Temps global de fabrication

Le temps global de fabrication est le délai de fabrication de la dernière unité complétée. Ici, il représente le temps requis par le modèle de simulation pour compléter la fabrication des six produits, d'après le plan de production agrégé. Le résultat est présenté au tableau 28.

Tableau 28

Temps global de fabrication

s	h:min
136227	37:50

Le tableau 28 montre que le temps global de fabrication est d'un peu moins de 38h, soit près de 14h de plus que le temps de production prévu. Il ne faut cependant pas en conclure que le plan de production est infaisable. Voyons où surviennent les retards. Le tableau 29 présente le moment où chaque processeur termine sa production, donnant le temps en secondes ainsi qu'en heures et minutes.

Tableau 29

Fin de la production aux processeurs

Poste	s	h:min
AS1	64401	17:53
AS2	73641	20:27
AT1	66466	18:28
AT2	72766	20:13
B1	14582	4:03
B2	73621	20:27
B3	73621	20:27
B4	73801	20:30
B5	73441	20:24
B6	73621	20:27
BS	75902	21:05
BT	74708	20:45
G1	129675	36:01
G2	132615	36:50
G3	84722	23:32
G4	120776	33:33
G5	122246	33:57
S1	47561	13:13
S2	91036	25:17
S3	88686	24:38
S4	82224	22:50
S5	89274	24:48
T1	105354	29:16
T2	109816	30:30
T3	109816	30:30
T4	111091	30:52
C01	110700	30:45
C02	130466	36:14
C03	124244	34:31
C04	133733	37:09
C05	85265	23:41
C06	89695	24:55
C07	121538	33:46
C08	120311	33:25
C09	136226	37:50
C10	68849	19:07

On voit d'abord que tous les postes du premier niveau, soit les processeurs AS, AT et B, ainsi que ceux du second niveau, soit les processeurs B, terminent leur production dans les délais prévus. En effet, tous les postes se sont vus assigner au maximum une production valant 85% de 24h, ce qui représente 20h24. Le dernier poste B à compléter sa production est B4, qui termine à 20h30. Les six minutes supplémentaires de production proviennent du fait de produire par lots de 25 plutôt que par lots unitaires, ce qui a fait légèrement augmenter la production assignée à certains postes et diminuer à d'autres.

Puisque tous les postes des niveaux précédents ont terminé leur production à temps, on devrait s'attendre à ce que les postes du troisième niveau, soit les postes G, S et T, terminent eux aussi à temps. Ce n'est cependant pas le cas.

Les délais sont principalement causés par le fait d'avoir choisi de reproduire le plan de production agrégé plutôt que le plan détaillé. Rappelons que cette décision a été prise car il était nécessaire de diminuer la taille du problème afin de pouvoir le modéliser dans un temps raisonnable. Comme le plan agrégé ne fournit pas d'indication quant à l'échelonnement des tâches sur les différents postes, il devient difficile et voire même impossible d'effectuer un ordonnancement des tâches qui soit aussi efficace que celui du modèle d'optimisation.

Une analyse du déroulement de la simulation a démontré que la logique d'assignation décrite à la section 5.2 ne permet donc pas de répartir la production de composantes de premier et second niveaux pour toujours assurer leur disponibilité lorsqu'ils sont requis aux postes du troisième niveau. Cela

entraîne des délais et les postes subissent des temps morts. Ces délais se répercutent nécessairement sur les processeurs du dernier niveau.

Voyons plus en détail ce qu'il en est de la fin de la production aux postes du dernier niveau, donc aux processeurs C. Si les composantes nécessaires à l'assemblage des produits finaux sont disponibles à temps dans les tampons du troisième niveau, chaque processeur C devrait terminer sa production peu après les postes du troisième niveau qui le fournissent en composantes. Le VMN pour tous les produits, présenté à la fin du chapitre 3, donne les postes du troisième niveau qui sont prédécesseurs aux processeurs C, d'après le plan agrégé. Le tableau 30 présente cette information pour chaque poste C. Dans la deuxième colonne du tableau, le dernier des prédécesseurs d'un poste C qui termine sa production est en gras et son temps de fin de production est inscrit dans la colonne suivante. Les dernières colonnes donnent ensuite le temps de fin de production du processeur C en question ainsi que la différence entre la fin de production des deux niveaux.

Tableau 30

Fin de la production aux niveaux 3 et 4

Poste	Prédécesseurs	Fin du 3 ^e niveau	Fin du 4 ^e niveau	Délai
C01	G1 , T2	36h01	30h45	<0
C02	G1 , S1, T1	36h01	36h14	0h13
C03	G1, G2 , S2, T1, T2	36h50	34h31	<0
C04	G2 , S2, T2	36h50	37h09	0h19
C05	G2 , G3, S3	36h50	23h41	<0
C06	G3, S3, S4, T3	30h30	24h55	<0
C07	G4 , S4, T3	33h33	33h46	0h13
C08	G4, G5 , S4, S5, T4	33h57	33h25	<0
C09	G5 , S5, T3, T4	33h57	37h50	3h53
C10	G5 , T4	33h57	19h07	<0

Tous les postes du dernier niveau, sauf un, achèvent leur production soit avant ou quelques minutes après leurs prédécesseurs. Le seul processeur d'assemblage final à achever sa production bien après ses prédécesseurs est le poste C9. Ce poste termine en effet 3h53 après le poste G5 qui est le dernier de ses prédécesseurs à compléter sa production.

L'explication de ce délai est que le sous-réseau d'assemblage final a été conçu en se basant sur l'hypothèse que les composantes sont disponibles à temps dans les tampons du troisième niveau. L'hypothèse s'est avérée juste pour tous les postes d'assemblage final, sauf C9. Au cours de la simulation, le processeur C9 se retrouve donc parfois paralysé après avoir trouvé un premier lot de composantes G. Le poste demeure alors improductif tant que les composantes requises à l'assemblage final ne sont pas toutes disponibles. Le poste C9 accumule alors du retard. Lorsque ses prédécesseurs terminent leur production, il lui reste encore du retard à rattraper, causant un délai de 3h53.

La logique employée pour effectuer le groupement de composantes à assembler au dernier niveau présente donc certaines déficiences. Le fait de bloquer un poste d'assemblage final après qu'un premier lot de composantes ait été trouvé paralyse le poste lorsque les autres composantes ne sont pas présents dans les tampons. Il faudrait utiliser une méthode différente, qui envoie le groupe de composantes aux postes du dernier niveau seulement lorsque toutes les composantes sont disponibles.

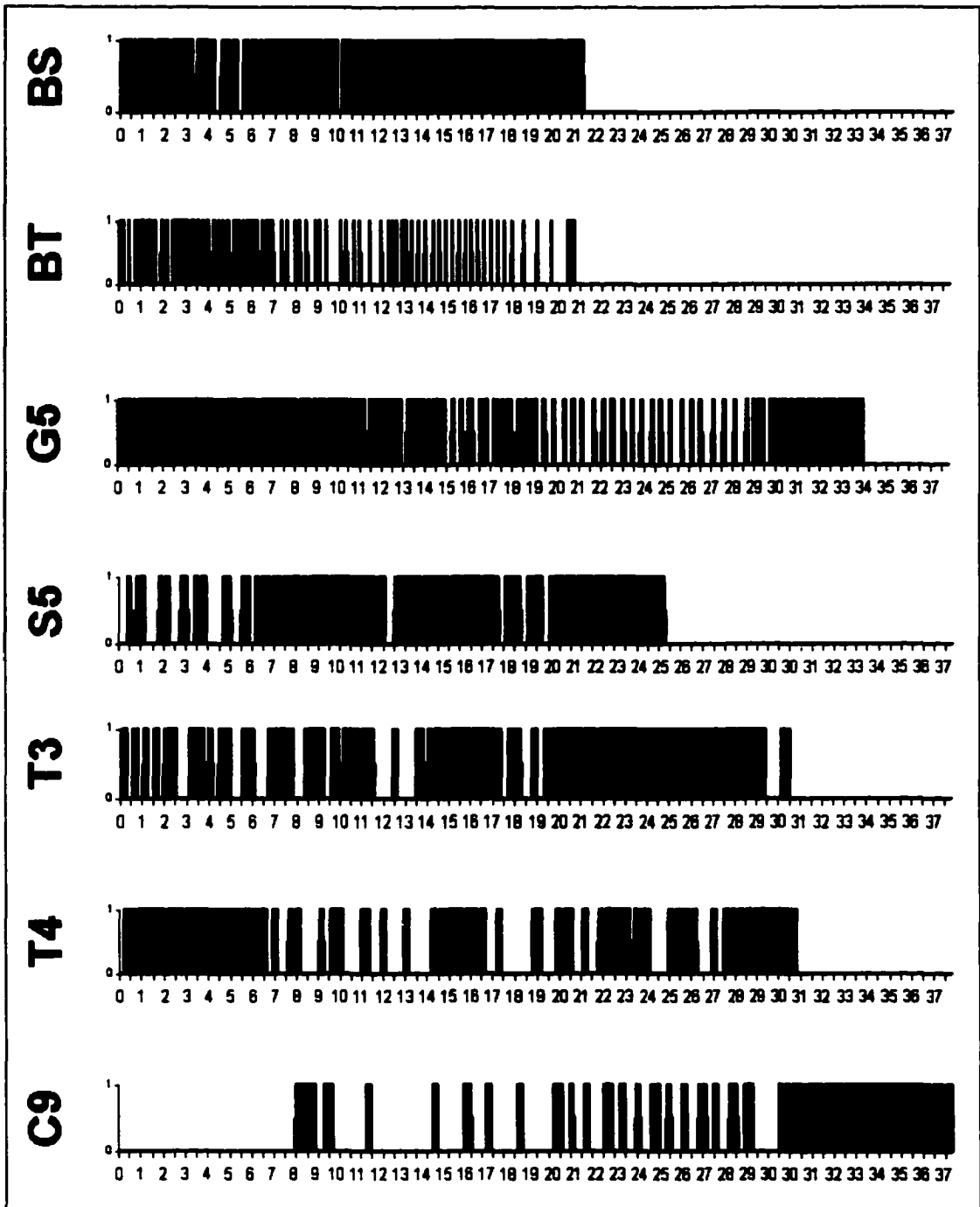


Figure 25 Occupation des postes prédécesseurs à C9

Le déroulement de la production au poste C9 est pris comme exemple pour expliquer le fonctionnement de la logique d'assignation. La figure 25 présente des graphiques montrant l'occupation de C9 et de ses prédécesseurs pendant la durée de la simulation. Puisque les postes du premier niveau n'ont pas de temps morts, la figure ne montre que l'occupation des postes des niveaux deux à quatre. Les délais survenant au poste C9 et à ses prédécesseurs sont interprétés dans ce qui suit.

Le poste C9 assemble uniquement des produits de modèles C et F. Il doit traiter 731 produits de modèle C (valant 40% ou 2/5 de sa charge) et 1145 de modèle F (60% ou 3/5). Une analyse du déroulement de la simulation montre que C9 attend après les composantes de modèle C mais pas après celles de modèle F. Rappelons qu'il entre 2 composantes G, 1 S et 1 T dans la composition d'un modèle C. Les délais surviennent quand un premier lot de composantes G de modèle C est trouvé. En effet, un bon moment s'écoule avant qu'un deuxième lot de composantes G de modèle C arrive dans les tampons du troisième niveau.

Comme le montrent les VMN présentés à la fin du chapitre 3, le processeur C9 est alimenté par les postes du troisième niveau G5, S5, T3 et T4. Ces postes sont parfois arrêtés par manque de composantes à traiter. Rappelons que le modèle de simulation effectue l'assignation d'un produit à un processeur d'après le poids que possède ce produit sur la production totale du processeur. Le poste G5 est alimenté en composantes à parts presque égales par les postes B5 et B6. les bobines de modèle C représentent 70% de la production totale au poste B6 et moins de 8% de la production au poste B5. La fréquence d'arrivée de composantes au poste G5 via B6 est donc faible. C'est pourquoi la production au poste C9 est parfois retardée par manque de composantes G.

Le fait de reproduire le plan de production agrégée permet de simplifier grandement le problème de simulation mais complique le problème d'ordonnement. Le temps global de fabrication est trop long pour qu'on puisse le comparer à celui des modèles d'optimisation. Pour avoir un délai de production raisonnable, il faudrait revoir certains aspects du réseau. Le temps global de fabrication influe sur certaines mesures de performance. Il s'agit des délais de fabrication, des taux d'utilisation et du niveau des tampons. D'autres résultats ne sont cependant pas influencés par le temps de fabrication. Cela comprend les coûts de circulation de même que les patrons de charge et de flux.

La section suivante présente les résultats de la simulation concernant les délais de fabrication des produits.

5.3.2 Délai de fabrication des produits

Le délai de fabrication est la durée nécessaire à la production d'une unité depuis le lancement de l'ordre de fabrication jusqu'à la livraison du produit, ce qui correspond au temps passé dans le système par un produit. Les résultats sont présentés au tableau 31.

Le modèle de simulation fournit des renseignements sur l'aspect dynamique du système de production. Ainsi, en plus du délai de fabrication requis pour compléter la fabrication de chaque modèle, on obtient la moyenne et l'écart type du temps passé dans le système par les produits.

Comme on pouvait s'y attendre suite aux résultats de la section précédente sur le temps global de fabrication, l'assemblage final de certains produits prend fin après 24h. La production de modèles B, C et F se termine

respectivement après 30h45, 35h42 et 37h50. La production des modèles A, D et E se termine cependant bien dans les temps, soit après 19h47, 15h15 et 12h10. Comme il a été expliqué plus tôt, les retards sont causés par l'absence de certaines composantes requises à l'assemblage.

Tableau 31

Délai de fabrication des produits

Type Produit	Temps moyen		Écart-type		Délai de fabrication	
	s	h:min	s	h:min	s	h:min
A	49848	13:51	12126	3:22	71213	19:47
B	67747	18:49	24186	6:43	110700	30:45
C	76982	21:23	27738	7:42	128513	35:42
D	41649	11:34	7485	2:05	54900	15:15
E	36080	10:01	4285	1:11	43808	12:10
F	80926	22:29	31650	8:47	136226	37:50
Tous	71224	19:47	29277	8:08	136226	37:50

Malgré le fait que la simulation donne un temps global et des délais de fabrication plus longs, d'autres résultats sont toutefois comparables à ceux des plans de production générés par les modèles d'optimisation. La section suivante présente les résultats de la simulation concernant les taux d'utilisation des processeurs.

5.3.3 Taux d'utilisation des processeurs

Le taux d'utilisation des machines est une mesure du degré d'emploi d'une ressource qu'on obtient par le rapport entre le temps productif d'une machine et le temps disponible. Les résultats concernant l'utilisation des processeurs suite à l'exécution de la simulation sont présentés au tableau 32. Les mêmes

résultats provenant du plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé sont quant à eux présentés au tableau 33.

Le tableau 32 présente les statistiques recueillies sur les processeurs, soit leur charge, c'est-à-dire le nombre de pièces que chacun a traitées, leur temps productif ainsi que leur taux d'utilisation calculés sur toute la durée de la simulation. Comme le temps global de fabrication est plus long que prévu, une cinquième colonne a été ajoutée au tableau, donnant le taux d'utilisation calculé sur la durée planifiée de 24h. Puisque la durée de chaque tâche est considérée comme étant fixe, le temps où un poste est utilisé correspond au nombre de composantes traitées sur ce poste multiplié par le temps de traitement sur ce poste. Regardons par exemple l'utilisation du poste AS1.

Les résultats du tableau 32 montrent que ce poste a fabriqué 5750 composantes. Le temps requis pour fabriquer une unité est de 11,2s. Si on multiplie la quantité d'unités traitées par le temps de fabrication, on obtient une durée totale de production de 64400s pour le poste AS1. Le tableau donne également un taux d'utilisation de 47,3% pour ce poste, ce qui est assez faible. Bien que le poste AS1 ait terminé sa production avant la durée planifiée de 24h, son taux d'utilisation a été calculé d'après la durée totale de la simulation, soit 37h50 ou 136227s.

Tableau 32

Taux d'utilisation des processeurs (simulation)

Poste	Nombre de pièces traitées	Temps productif (s)	% utilisation sur 37h50	% utilisation sur 24h
AS1	5750	64400	47,3%	74,5%
AS2	6575	73640	54,1%	85,2%
AT1	5275	66465	48,8%	76,9%
AT2	5775	72765	53,4%	84,2%
B1	2025	14580	10,7%	16,9%
B2	10225	73620	54,0%	85,2%
B3	10225	73620	54,0%	85,2%
B4	10250	73800	54,2%	85,4%
B5	10200	73440	53,9%	85,0%
B6	10225	73620	54,0%	85,2%
BS	12325	35126	25,8%	40,7%
BT	11050	23647	17,4%	27,4%
G1	6250	73500	54,0%	85,1%
G2	6250	73500	54,0%	85,1%
G3	6275	73794	54,2%	85,4%
G4	6250	73500	54,0%	85,1%
G5	4750	55860	41,0%	64,7%
S1	300	7050	5,2%	8,2%
S2	3125	73438	53,9%	85,0%
S3	3150	74025	54,3%	85,7%
S4	3125	73438	53,9%	85,0%
S5	2625	61688	45,3%	71,4%
T1	2875	73313	53,8%	84,9%
T2	2900	73950	54,3%	85,6%
T3	2875	73313	53,8%	84,9%
T4	2400	61200	44,9%	70,8%
C01	1800	46980	43,7%	81,6%
C02	1875	48938	45,6%	85,0%
C03	1875	48938	45,6%	85,0%
C04	1875	48938	45,6%	85,0%
C05	1900	49590	46,2%	86,1%
C06	1875	48938	45,6%	85,0%
C07	1875	48938	45,6%	85,0%
C08	1900	49590	46,2%	86,1%
C09	1875	48938	45,6%	85,0%
C10	350	9135	8,5%	15,9%

Tableau 33

Taux d'utilisation des processeurs (plan détaillé)

Poste	Nombre de pièces traitées	Temps productif (s)	% utilisation sur 24h
AS1	5737	64253	74,4%
AS2	6557	73440	85,0%
AT1	5258	66251	76,7%
AT2	5760	72576	84,0%
B1	2028	14602	16,9%
B2	10200	73440	85,0%
B3	10200	73440	85,0%
B4	10200	73440	85,0%
B5	10200	73440	85,0%
B6	10200	73440	85,0%
BS	12294	35038	40,6%
BT	11018	23579	27,3%
G1	6245	73440	85,0%
G2	6245	73440	85,0%
G3	6245	73440	85,0%
G4	6245	73440	85,0%
G5	4736	55700	64,5%
S1	307	7213	8,3%
S2	3125	73440	85,0%
S3	3125	73440	85,0%
S4	3125	73440	85,0%
S5	2612	61376	71,0%
T1	2880	73440	85,0%
T2	2880	73440	85,0%
T3	2880	73440	85,0%
T4	2378	60639	70,2%
C01	1793	46789	81,2%
C02	1876	48960	85,0%
C03	1876	48960	85,0%
C04	1876	48960	85,0%
C05	1876	48960	85,0%
C06	1876	48960	85,0%
C07	1876	48960	85,0%
C08	1876	48960	85,0%
C09	1876	48960	85,0%
C10	355	9276	16,1%

En assignant les tâches sur chaque poste d'après l'ordonnancement optimal, le temps global de fabrication se rapprocherait beaucoup plus du 24h planifié. Les taux d'utilisation des processeurs seraient alors comparables à ceux prévus par le plan détaillé.

Si on considère une durée de 24h pour le temps global de fabrication, on peut calculer à nouveau le taux d'utilisation du poste AS1 en divisant cette fois son temps productif par la durée planifiée de 24h ($64400 \div 86400$). On obtient alors un taux de 74,5%. Ce résultat est présenté à la dernière colonne du tableau 32. On peut alors comparer l'utilisation des processeurs dans la simulation (tableau 32) à celle dans le plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé (tableau 33). Dans le plan détaillé, le taux d'utilisation du processeur AS1 est de 74,4%. Les résultats concordent donc. La petite différence est causée par le fait qu'on produit par lots de 25 dans la simulation et par lots unitaires dans les modèles d'optimisation.

Dans le tableau 33, le temps productif des processeurs des premier, second et troisième niveaux ne dépasse pas 73440s et celui des postes de dernier niveau ne dépasse pas 48960s. Cela est dû au fait qu'on a reproduit le plan de production généré par le modèle agrégé, où l'utilisation des postes est limitée à 85% (85% de 24h donne 73440s et 85% de 16h donne bien 48960s). Pour ce qui est de la simulation, la dernière colonne du tableau 32 montre que le taux d'utilisation des processeurs est légèrement supérieur, pour atteindre 86,1% aux postes C5 et C8. Encore ici, la différence provient de la production par lots de 25.

La section suivante présente les résultats de la simulation concernant les coûts de circulation des produits.

5.3.4 Coûts de circulation

Le coût de circulation est lié au déplacement des produits entre deux postes de travail ou entre un poste et un lieu de stockage. Les coûts de circulation sont résumés au tableau 34.

Tableau 34

Coûts de circulation

Type Produit	Quantité de produits fabriqués	Coût de Circulation (\$)
A	1525	361,49
B	3350	836,11
C	5625	2526,78
D	725	147,27
E	550	223,44
F	5425	1536,04
Total	17200	5631,13

Comme on a reproduit le plan de production généré par le modèle agrégé, on s'attend à ce que les coûts de circulation de la simulation soient très semblables à ceux du plan agrégé.

Effectivement, les coûts de circulation du plan agrégé sont de 5617,05 \$ et ceux de la simulation sont de 5631,13 \$. La différence provient simplement du fait qu'avec le modèle de simulation, la production a été effectuée par lots de 25 tandis qu'elle était par lots unitaires pour le modèle d'optimisation. Le flux des composantes a donc subi quelques changements pour être adapté aux lots et quelques pièces supplémentaires ont été fabriquées. La différence est néanmoins minime, soit 0,25%.

Il a de plus été montré dans la section précédente que la différence entre les taux d'utilisation planifiés et ceux que l'on obtiendrait si la durée de simulation était plus près de 24h est minime. Ces résultats montrent que le fait de simuler une production par lots de 25 ne nuit pas à la précision des résultats.

En simulant cependant une production par lots, le temps d'exécution est grandement diminué car cela réduit beaucoup le nombre d'entités qui circulent dans le système. Le programme ayant moins d'événements à gérer, le temps requis par le programme de simulation pour exécuter le modèle est raccourci dans un ratio de $(1/b)$ où b représente la taille des lots.

La section suivante présente les résultats de la simulation concernant le niveau des tampons.

5.3.5 Niveau des tampons

Le niveau des tampons est l'ensemble des produits semi-finis qui sont conservés entre divers postes de travail. Le niveau des tampons fourni par la simulation est présenté au tableau 35 tandis que ceux du plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé sont présentés au tableau 36.

La simulation fournit des indications concernant le niveau moyen contenu dans chaque tampon en terme de lots ainsi que le niveau maximum de lots qui s'est trouvé dans le tampon au cours de la simulation. Elle donne également des informations sur le temps d'attente des lots qui ont séjourné dans les tampons. Ces mesures sont dynamiques car elles sont continuellement mises à jour par le modèle, tout au long de la simulation. Ces résultats sont présentés au tableau 35.

Le plan détaillé fournit quant à lui des mesures statiques du niveau des tampons. C'est-à-dire que ces données sont fournies par le plan seulement pour le nombre d'intervalles de planification qui a été choisi. Dans le présent exemple, la journée de production était divisée en 24 intervalles. Le plan détaillé indique alors le niveau de chaque tampon pour les 24 périodes détaillées sur le plan. Afin de comparer ces résultats à ceux de la simulation, la moyenne du niveau des tampons de chaque processeur a été calculée et le niveau maximal atteint au cours des 24 périodes a été noté. Ces résultats sont présentés au tableau 35.

Avec le réseau de simulation actuel, il faut 37h50 pour compléter le plan de production. Les pièces demeurent donc plus longtemps dans les tampons et le niveau de ceux-ci est plus élevé que ce qui devrait être. L'analyse des deux tableaux confirme cela. Règle générale, plus les postes sont loin dans la gamme de fabrication et plus le niveau de leur tampon dépasse ce qui avait été prévu.

On peut voir par exemple que pour les tampons AS, la différence est mince. Les niveaux [moyen ; maximal] du tampon AS1 sont [11.1 ; 36] pour la simulation et [12.6 ; 27] pour le plan détaillé. De même, les niveaux du tampon AS2 sont [4.5 ; 17] pour la simulation et [8.0 ; 15] pour le plan détaillé. La différence devient beaucoup plus marquée aux niveaux supérieurs, comme par exemple au tampon G5 pour lequel les niveaux sont [44.4 ; 80] pour la simulation et [7.4 ; 23] pour le plan détaillé.

L'ordre d'assignation des tâches dans le modèle de simulation fait en sorte que les produits ne sont pas fabriqués d'après la séquence optimale du plan détaillé. Cela affecte nécessairement le niveau des tampons ainsi que le temps qu'y séjournent les pièces, en attente d'être transférées au poste suivant.

Tableau 35

Niveau des tampons (simulation)

Poste	Niveau Moyen (lots)	Niveau Maximal (lots)	Temps d'attente moyen s	h:min
AS1	11,1	36	6548	1:49
AS2	4,5	17	2353	0:39
AT1	16,2	55	10435	2:54
AT2	2,9	19	1697	0:28
B1	6,0	48	10040	2:47
B2	100,6	200	33507	9:18
B3	2,7	18	899	0:15
B4	0,2	7	79	0:01
B5	18,7	52	6231	1:44
B6	74,6	165	24832	6:54
BS	3,5	13	953	0:16
BT	4,7	28	1434	0:24
G1	12,3	96	6724	1:52
G2	17,2	44	9374	2:36
G3	15,0	89	8164	2:16
G4	7,4	27	4055	1:08
G5	44,4	80	31846	8:51
S1	5,0	10	56582	15:43
S2	29,7	64	32352	8:59
S3	5,4	48	5861	1:38
S4	25,2	52	27480	7:38
S5	23,9	53	30948	8:36
T1	9,1	40	10810	3:00
T2	19,7	42	23153	6:26
T3	2,9	21	3358	0:56
T4	5,8	37	8261	2:18

Tableau 36

Niveau des tampons (plan détaillé)

Poste	Niveau Moyen (lots)	Niveau Maximal (lots)
AS1	12,6	27
AS2	8,0	15
AT1	14,9	31
AT2	6,5	12
B1	0,0	0
B2	8,0	18
B3	6,2	29
B4	3,7	20
B5	8,5	30
B6	13,3	30
BS	9,9	29
BT	6,1	25
G1	33,2	73
G2	11,6	31
G3	26,8	73
G4	33,5	73
G5	7,4	23
S1	2,7	6
S2	12,7	31
S3	15,0	33
S4	11,4	31
S5	3,1	10
T1	12,7	28
T2	9,7	28
T3	8,1	26
T4	0,7	6

La plupart des tampons ont des niveaux bien différents lorsqu'on compare les résultats du modèle de simulation à ceux du modèle détaillé. La figure 26 présente le niveau des tampons B2 et G5. L'observation de ces graphiques montre que les quantités de lots se trouvant à chaque heure dans ces tampons sont totalement différentes pour la planification détaillée et le déroulement de la simulation.

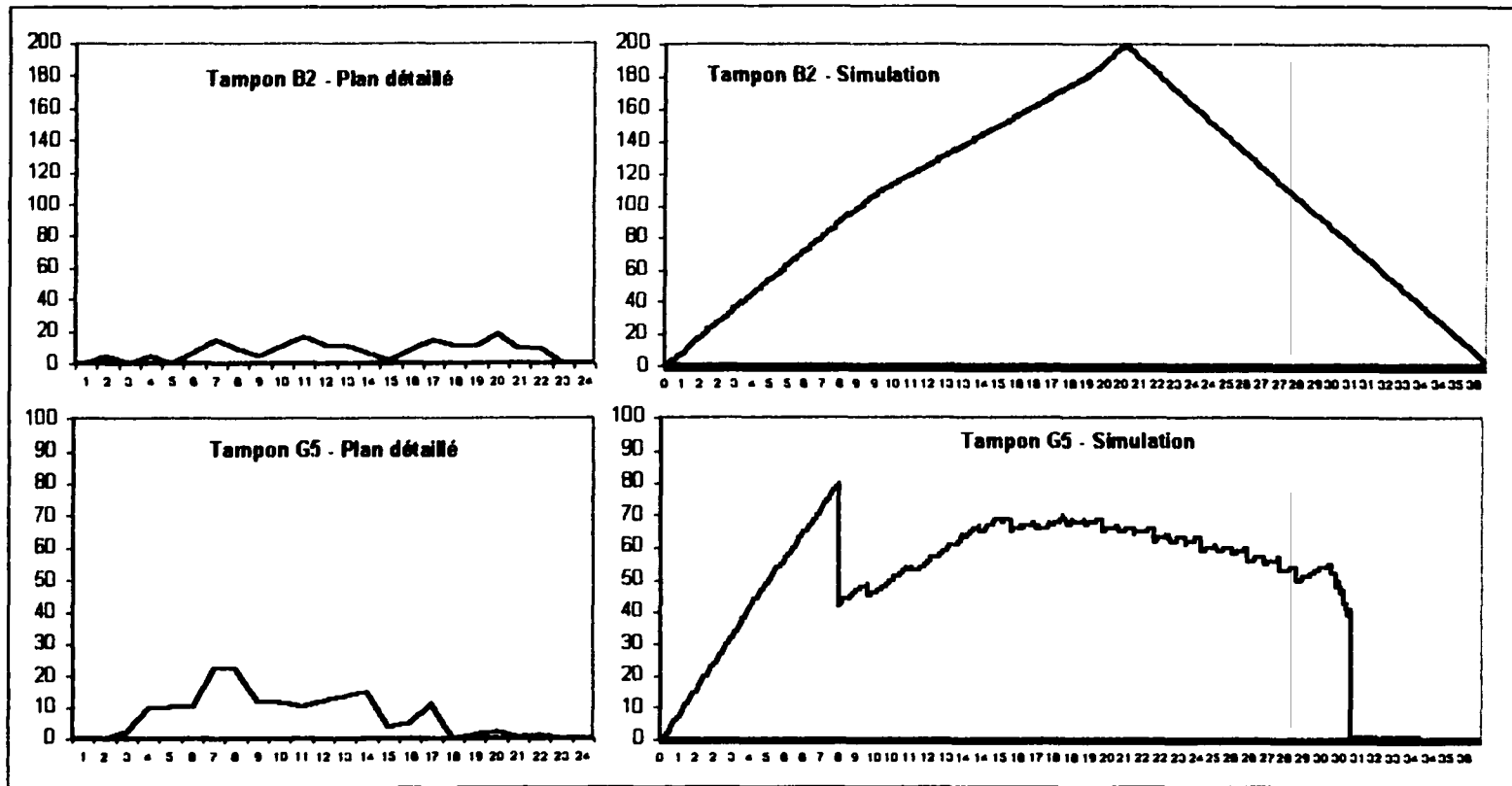


Figure 26 Niveau des tampons du plan détaillé et de la simulation (B)

On pouvait déjà s'attendre à une telle divergence suite aux résultats présentés dans les tableaux 35 et 36. En effet, dans ces tableaux, les niveaux [moyen ; maximal] du tampon B2 sont [100.6 ; 200] pour la simulation et [8.0 ; 18] pour le plan détaillé. De même, les niveaux du tampon G5 sont [44.4 ; 80] pour la simulation et [7.4 ; 23] pour le plan détaillé.

Cependant, le niveau des tampons de certains postes, notamment ceux du premier niveau, ont une fluctuation assez semblable si on compare les résultats des deux modèles. La figure 27 présente par exemple le niveau des tampons AS1, BS et G3 du plan détaillé et de la simulation.

L'examen de ces graphiques montre dans ce cas que les quantités de pièces se trouvant à chaque heure dans ces tampons sont très semblables pour la planification détaillée et le déroulement de la simulation.

Bien que le temps global de circulation soit plus élevé que ce qui avait été prévu, l'exécution du modèle de simulation a néanmoins permis de valider les principaux résultats. Effectivement, les coûts de circulation correspondent aux coûts optimaux du plan agrégé et les patrons de charge et de flux sont respectés. De plus, on a vu que le fait de produire par lots de 25 a une influence très minime sur les résultats et permet de diminuer significativement le temps d'exécution de la simulation.

Les résultats générés par les modèles d'optimisation, soit les modèles de planification agrégée et détaillée ainsi que ceux générés par le modèle de simulation sont analysés dans le prochain chapitre. Une discussion quant aux forces et aux faiblesses de chaque méthode ainsi que le champ d'application propre à chacune y est exposée.

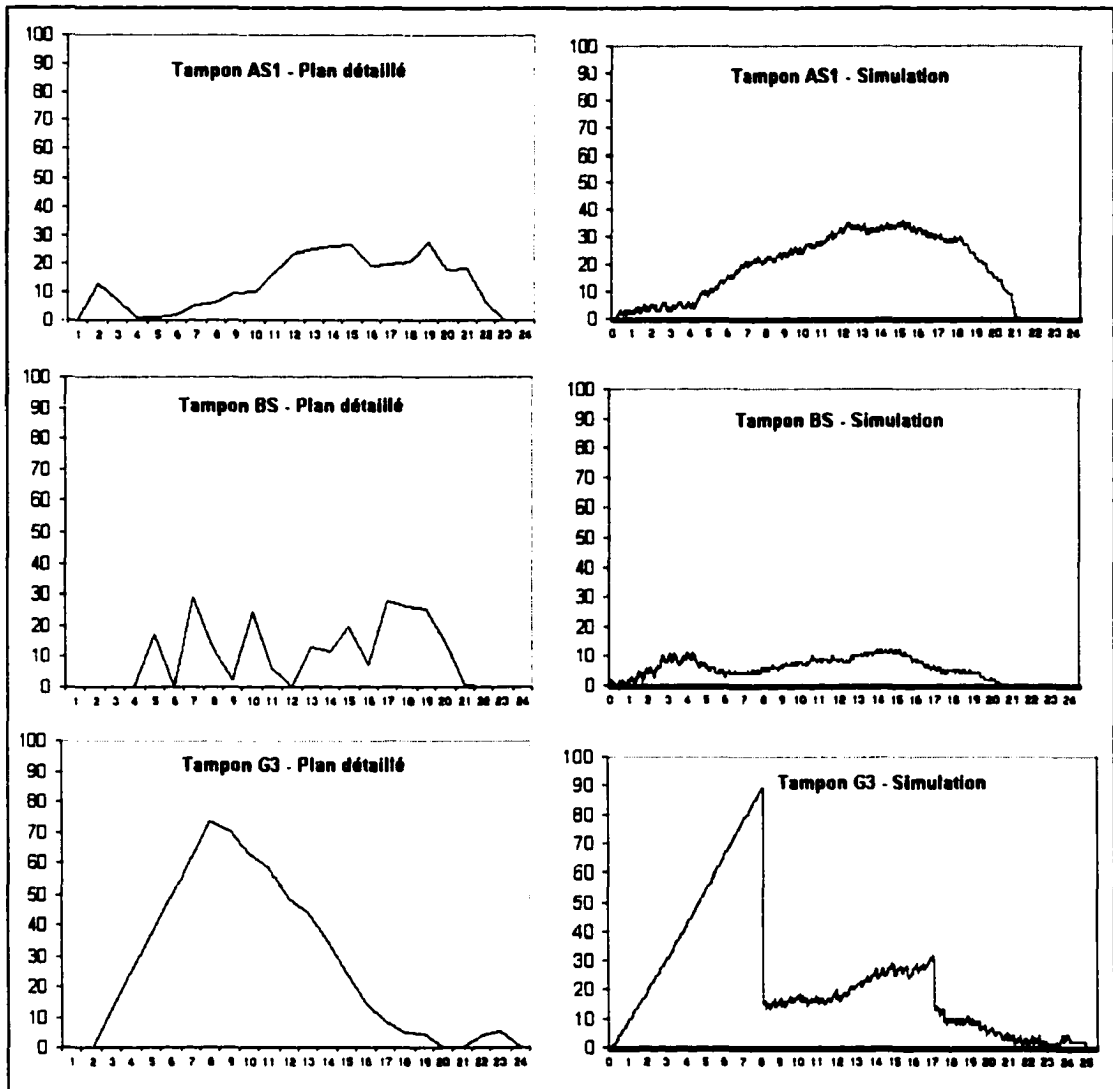


Figure 27 Niveau des tampons du plan détaillé et de la simulation (A)

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

6.1 Introduction

Plusieurs incertitudes entourent la conception et la planification des chaînes d'approvisionnement et des réseaux manufacturiers. Une charpente contextuelle pour l'évaluation quantitative et la gestion des réseaux manufacturiers a été développée lors de nos travaux. On y propose entre autres des modèles linéaires pour la planification agrégée et détaillée de la production ainsi qu'un modèle développé à l'aide de la simulation par événements discrets. Ces modèles sont employés à différentes étapes de la planification des réseaux manufacturiers, dans le cadre de la conception de chaînes d'approvisionnement. Ils sont employés dans cette recherche pour caractériser un système afin d'en permettre une conception et un contrôle plus efficace.

Le modèle de planification agrégée est d'abord employé dans le chapitre 3 pour évaluer la capacité de production des firmes soumissionnaires répondant à l'offre d'une entreprise réseau. Ce modèle est utilisé en second lieu pour comparer différentes configurations de réseau et pour éliminer celles offrant des performances non satisfaisantes. Le modèle de planification détaillée est ensuite utilisé dans le chapitre 4 pour concevoir le plan de production détaillé d'une firme en se basant sur les meilleurs nœuds potentiels qui ont été identifiés par le plan agrégé. Il est par ailleurs utilisé pour évaluer l'influence qu'ont certains paramètres sur le comportement d'un système. Ces deux premiers

modèles génèrent des mesures statiques de la performance du système. Un modèle de simulation est finalement développé dans le chapitre 5 pour valider les résultats des modèles linéaires et obtenir des mesures dynamiques de la performance du système.

Un système manufacturier agile est employé comme exemple et il est décrit au chapitre 2. Ce système représente un des nœuds d'une chaîne d'approvisionnement qui est modélisé à l'aide des modèles linéaires et de simulation. Les résultats générés par ces modèles sont analysés et interprétés dans ce qui suit.

6.2 Modèle de planification agrégée

Ce modèle est employé pour établir des plans agrégés de production pour des réseaux flexibles de processeurs en contexte de production agile. L'objectif du modèle développé est de déterminer des patrons de flux entre les processeurs et les patrons de charge de ces processeurs, qui minimisent l'ensemble des coûts.

On utilise principalement le modèle de planification agrégée pour vérifier la capacité de production d'un système dans le contexte de la gestion des chaînes d'approvisionnement. Ce modèle est secondairement employé afin de comparer différentes configurations de réseaux.

6.2.1 Comparaison de réseaux

En ce qui concerne la comparaison de réseaux, le modèle de planification agrégée permet d'obtenir rapidement l'ensemble des coûts de production pour différentes configurations de réseaux. Il génère parallèlement les patrons de flux

et de charge associés aux plans de production, ce qui permet d'en observer l'étalement général et d'évaluer le système de gestion qui serait requis. L'information fournie par cet outil aide le décideur au moment de la conception de réseaux pour appuyer ses choix.

6.2.2 Gestion des chaînes d'approvisionnement

En ce qui concerne la gestion des chaînes d'approvisionnement, le modèle de planification agrégée est employé pour évaluer la capacité de production d'un fournisseur qui désire soumissionner, suite à l'appel d'offre d'une entreprise réseau.

Si le fournisseur possède suffisamment de capacité, un plan de production est généré. Ce plan inclut les coûts de production et identifie les tronçons et les nœuds qui devraient être empruntés par les produits lors de leur fabrication. Le fournisseur indique alors à l'entreprise réseau sur quelles offres il soumissionne, à quel coût et quels sont les délais de livraison.

6.2.3 Hypothèses

Bien qu'un problème d'ordonnement soit à la base un problème d'optimisation en nombres entiers, les modèles de planification employés dans ce travail emploient des variables en nombres réels. Il a en effet été expliqué à la section 1.2 que l'emploi de variables en nombres réels offrait un bon compromis entre vitesse de résolution et précision des résultats.

Dans ce travail, seuls les coûts de circulation ont été considérés lors de l'exécution du modèle de planification agrégée car les autres coûts étaient considérés comme étant fixes. Le modèle est néanmoins conçu pour tenir

compte de l'ensemble des coûts de production, soit les coûts de manutention des produits, ceux pour le traitement des produits ainsi que ceux pour l'opération des processeurs. Si ces coûts ne sont pas fixes mais qu'ils sont plutôt variables, ils doivent alors être considérés lors de la modélisation.

6.3 Planification détaillée sur les nœuds du plan agrégé

Le modèle de planification détaillée est principalement utilisé ici dans le cadre de la conception des chaînes d'approvisionnement. Lorsque la soumission d'une firme est retenue par l'entreprise réseau, ce fournisseur doit produire son plan de production détaillé.

6.3.1 Gestion des chaînes d'approvisionnement

On ne peut pas utiliser le modèle agrégé pour effectuer une planification détaillée car ce plan présente des données accumulées en périodes journalières ou hebdomadaires. Un tel plan ne peut donc pas fournir d'indication sur la charge de travail échelonnée et précise devant être assignée aux processeurs. C'est pourquoi on utilise le modèle détaillé, qui répartit les données sur des intervalles de planification plus courts, générant un plan plus précis.

Il a été expliqué à la section 3.6 que plus le niveau de précision désiré est élevé, plus le modèle détaillé devient lourd et complexe à résoudre. Comme on désire faire rouler le modèle de planification détaillée souvent, il devient nécessaire de minimiser sa complexité afin qu'il puisse être résolu rapidement. Tout comme le modèle de planification agrégée, la complexité du présent modèle est d'abord réduite par l'utilisation de variables en nombres réels.

Ensuite, pour diminuer davantage la complexité du problème, le modèle détaillé assigne une charge de travail échelonnée et précise seulement aux nœuds processeurs qui ont été identifiés à l'aide du modèle de planification agrégée, lors de la première étape du procédé de soumission. Il s'agit d'inclure dans l'énoncé du problème à résoudre seulement les équations qui concernent les nœuds et les tronçons définis précédemment par le plan agrégé. Cela réduit significativement le nombre de variables et de contraintes que doit considérer le modèle détaillé. La résolution du problème est alors effectuée plus rapidement. On peut donc opter pour un plan détaillé très précis et compenser l'augmentation de la complexité du problème par l'utilisation des résultats du plan agrégé comme paramètres d'entrée au modèle de planification détaillée. Cette méthode permet ainsi d'obtenir un bon compromis entre la précision et le temps de résolution.

Cette expérience démontre l'utilité et la complémentarité des deux modèles de planification pour la conception de chaînes d'approvisionnement dans un contexte de systèmes manufacturiers agiles.

Mais pour avoir un plan détaillé réalisable, il est toutefois nécessaire de tenir compte des délais qui sont engendrés par la séquence de fabrication. Il faut alors garder un jeu en limitant le taux d'utilisation permis de certains processeurs dans le plan agrégé.

6.3.2 Hypothèses

Les résultats de la section 4.4 montrent qu'il est possible d'obtenir un plan détaillé qui n'utilise que les nœuds identifiés par le plan agrégé et que les patrons de flux des deux plans sont très semblables. Le total des pièces produites respecte bien la demande, ce qui confirme l'hypothèse voulant que

l'emploi de variables en nombres réels n'entache pas la pertinence des résultats.

Dans l'exemple présenté, on garde dans le plan agrégé un jeu de 15% pour tous les processeurs. On ne cherche pas dans ce travail à déterminer le taux d'utilisation optimal mais on désire simplement garder une marge suffisante pour obtenir une solution au modèle détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé. Ce taux peut cependant être facilement modifié. Comme les deux modèles linéaires ont un temps de résolution relativement court, il devient aisé d'effectuer plusieurs tests pour déterminer les meilleurs taux limitant l'utilisation de chaque type de processeurs. Il serait ainsi possible d'employer différents taux d'utilisation, selon le niveau de la gamme de fabrication.

Le risque de pannes des machines n'a pas été considéré dans ce travail, car cela n'était pas nécessaire pour les expériences effectuées. Il serait toutefois facile d'en tenir compte en diminuant proportionnellement le taux d'utilisation permis à chaque poste dans les modèles de planification agrégée et détaillée.

6.4 Modèle de planification détaillée

Tout comme le modèle de planification agrégée, l'objectif du modèle de planification détaillée est de déterminer les patrons de flux et de charge tout en s'assurant que l'ensemble des coûts d'opération, de production et de transport sont minimisés. Contrairement au plan agrégé, le plan détaillé indique également le niveau des tampons et de l'inventaire centralisé.

Le modèle détaillé diffère principalement du modèle agrégé en ce qui a trait à l'échelonnement temporel du travail. Avec le premier modèle, les données

sont agrégées par périodes journalières ou hebdomadaires alors qu'avec le second, la production est répartie sur plusieurs périodes à l'intérieur d'une journée. Ces intervalles de planification permettent de générer un plan beaucoup plus précis qui se rapproche davantage de la réalité. Un tel plan permet d'assigner des tâches aux processeurs en contrôlant les quantités produites sur chaque poste ainsi que les moments de début et de fin de chaque tâche.

L'application du modèle de planification détaillée à la gestion des chaînes d'approvisionnement a été considérée à la section 6.3. Ce modèle est également utilisé pour évaluer l'influence qu'ont certains paramètres sur les patrons de flux du système. Les résultats de ces expériences sont analysés et interprétés dans ce qui suit.

6.4.1 Comparaison de réseaux

Tout comme le modèle de planification agrégée, le modèle de planification détaillée peut être employé pour comparer différentes configurations de réseaux. À la section 4.5, le modèle de planification détaillée permet d'obtenir rapidement l'ensemble des coûts de production selon différentes configurations de réseaux. Il génère également les patrons de flux et de charge associés aux plans de production, ce qui permet d'en observer l'étalement et d'évaluer le système de gestion qui serait requis. L'information détaillée fournie par cet outil aide elle aussi le décideur au moment de la conception de réseaux pour appuyer ses choix.

6.4.2 Influence du nombre d'intervalles de planification

L'expérience de la section 4.6 où l'on fait varier le nombre d'intervalles de planification dans le plan détaillé indique d'abord que plus le nombre d'intervalles est élevé, plus le coût de circulation se rapproche du coût de la solution optimale générée par le plan agrégé. En effet, le plan agrégé représente le cas du plan détaillé où le nombre d'intervalles de planification tend vers l'infini et leur durée tend vers zéro.

Ce qu'on recherche en générant un plan de production détaillé, c'est un horaire qui présente les coûts les plus bas possible, tout en étant réalisable et possible à gérer. Plus un plan est détaillé, plus les coûts de circulation sont bas mais plus il est difficile à gérer; ce qui nécessite un meilleur système de gestion.

Le modèle détaillé peut alors être employé pour évaluer le coût de différents plans en fonction du nombre d'intervalles de planification. Cela permet de choisir le niveau de précision du plan en fonction de la complexité des flux qui devra être gérée.

6.4.3 Tolérance des réseaux

Les expériences 4.7, 4.8 et 4.9 où on limite la capacité des tampons et où l'on fait varier le coût de transport des pièces vers l'entrepôt centralisé permettent de déterminer si un réseau est tolérant. Un réseau est tolérant s'il est capable de maintenir un patron de flux et de charge sans trop déroger de la solution optimale.

Dans ces essais, les coûts additionnels pour le transport des pièces sont déterminés de façon à ce qu'ils soient comparables aux coûts de circulation

entre les processeurs. Pour simplifier les expériences, les coûts ne tiennent compte ici que des coûts de transit. Ils ne considèrent pas d'autres coûts comme ceux associés au maintien en stock, au matériel de transport et aux installations d'entreposage. Tous ces coûts devraient être inclus dans un modèle plus représentatif de la réalité.

6.5 Modèle de simulation

Comme il l'a été mentionné dans les chapitres précédents, les modèles d'optimisation permettent de résoudre des problèmes de taille réaliste en un temps raisonnable. Ces outils fournissent cependant des mesures statiques sur la performance des systèmes. Puisqu'on veut obtenir des informations concernant l'aspect dynamique du système, il est nécessaire de recourir à un autre outil.

La simulation par événements discrets considère le côté dynamique d'un système car le temps de simulation est avancé en accord avec le déplacement des entités à travers le réseau de simulation.

La simulation est employée dans le chapitre 5 à la fois pour valider les résultats des modèles mathématiques et pour fournir des mesures dynamiques de la performance du système étudié. Pour ce faire, on cherche à reproduire le plan de production représenté par les réseaux manufacturiers virtuels (VMN) du chapitre 3. L'exécution de la simulation fournit des informations touchant le temps global de fabrication, le délai de fabrication des produits, le taux d'utilisation des processeurs, les coûts de circulation ainsi que le niveau des tampons.

6.5.1 Hypothèses

Lors de la construction du modèle de simulation, plusieurs hypothèses sont posées. La première concerne le choix du plan de production devant être reproduit. Pour simplifier le modèle, il est décidé à la section 5.1 de reproduire le plan de production agrégé où le taux d'utilisation des postes est limité à 85%. On a vu que ce plan laisse en effet suffisamment de latitude pour prévoir les délais causés par la gamme de fabrication car on obtient une solution satisfaisante au modèle détaillé basé sur le plan agrégé. Il devrait alors être possible de compléter le plan agrégé dans les délais prévus, à l'aide du modèle de simulation.

Cette hypothèse est toutefois infirmée par la durée globale de circulation résultant de la simulation. Il faut effectivement compter 37h50 pour compléter la production qu'il était prévu d'effectuer en 24h. Bien que le plan agrégé laisse assez de jeu pour prévoir les délais causés par la gamme de fabrication, ce plan ne donne aucune directive quant au déroulement dynamique de la production sur les postes. Sans ces indications, il est alors difficile, voire impossible de concevoir un modèle de simulation qui puisse reproduire l'ordonnancement optimal du plan agrégé.

La meilleure solution serait alors de reproduire le plan de production détaillé sur 24 intervalles de planification plutôt que le plan de production agrégé sur une période d'une journée. Les patrons de flux du plan agrégé sont en fait très complexes car ils couvrent l'ensemble de la production en un seul intervalle de planification d'une durée de 24h. Le plan détaillé fournit quant à lui des informations sur le déroulement de la production pour chaque intervalle de planification. Le fait d'employer le plan détaillé éliminerait les délais car les patrons de flux pour chaque période sont très simples si on les compare à ceux

du plan agrégé. Le plan de production détaillé pourrait alors être plus facilement reproduit à l'aide de la logique d'assignation. La difficulté consiste alors à balancer le plan car le plan détaillé présente ses résultats sous forme de données continues. Pour pouvoir utiliser ces valeurs dans le modèle de simulation, il faut donc les amener sous forme discrète et les modifier afin que, pour chaque poste, les flux entrants, la charge ainsi que les flux sortant soient balancés. Une routine automatique pourrait être conçue à cette fin, ce qui permettrait d'accélérer la tâche de balancement tout en éliminant les risques d'erreur.

Une autre supposition concerne l'utilisation de lots de production. Afin de diminuer la durée de la simulation, on choisit d'effectuer une production par lots pour réduire le nombre d'événements que le programme aura à gérer. On présume que cette simplification ne nuira pas à la précision des résultats.

Les résultats des sections 6.3.3 et 6.3.4 valident cette affirmation. Effectivement, si on regarde les coûts de circulation et les taux d'utilisation, la différence entre les résultats de la simulation et ceux du modèle de planification détaillée est très faible. De plus, la comparaison entre un scénario de simulation où la production s'effectue par lots unitaires et un scénario où elle s'effectue par lots de 25 donnent une durée de simulation 25 fois plus courte avec des lots de 25. L'utilisation de lots de production réduit donc significativement le temps machine requis pour l'exécution du modèle.

Une hypothèse est posée lors de l'initialisation des paramètres de production. On conçoit à la section 5.2.2 une logique d'assignation basée sur l'importance de la charge de chaque produit sur un poste. Il est supposé que grâce à cette logique d'assignation, les composantes seront réparties sur tous les niveaux et tous les postes en quantité suffisante, de façon à assurer leur

disponibilité lorsqu'elles sont requises aux processeurs d'assemblage. Si c'est le cas, cela devrait maximiser le taux d'utilisation des processeurs et minimiser le temps global requis pour la complétion de toute la demande.

Il apparaît cependant que la logique d'assignation ne permet pas de bien répartir la production de composantes de premier et second niveaux pour assurer leur disponibilité lorsqu'ils sont requis aux postes du troisième niveau. Cela entraîne des délais et les postes subissent des temps morts. Ces délais se répercutent sur les postes du dernier niveau et le temps global de fabrication dépasse alors ce qui avait été prévu. La logique d'assignation devrait cependant bien fonctionner si l'on reproduit le plan détaillé plutôt que le plan agrégé.

Une dernière hypothèse concerne le choix de la logique employée lors de l'assemblage final. La conception du sous-réseau où s'effectue l'assemblage final des composantes emploie une méthode de recherche des composantes à assembler qui dépend de la disponibilité des pièces au moment de leur assemblage. Le modèle recherche dans les tampons de troisième niveau la première composante qui est assignée à un poste de dernier niveau. Lorsque cette composante est trouvée, elle est envoyée au processeur en question.

Les résultats de la section 5.3.1 montrent qu'un poste demeure en arrêt tant que les autres composantes requises à la fabrication du produit final ne sont pas toutes disponibles. Cela retarde inutilement la fin de la production car le processeur pourrait plutôt assembler un autre produit dont toutes les composantes sont déjà disponibles.

Pour ce faire, il faudrait modifier le mode de recherche des composantes. Le modèle pourrait employer des nœuds de détection qui soient constamment en veille et qui envoient un signal lorsque toutes les composantes requises pour

l'assemblage d'un produit sont disponibles dans les tampons. Les postes du dernier niveau ne seraient ainsi pas paralysés par un manque de composantes et concentreraient leur production sur les groupes complets, prêts à être assemblés. De cette façon, le temps global de fabrication obtenu par la simulation serait conforme aux attentes. De plus, le fait que le modèle ne tourne plus en rond pendant la recherche de composantes diminuerait également le nombre d'événements générés en cours de simulation, ce qui réduirait le temps machine requis pour l'exécution du modèle.

6.5.2 Résultats

Malgré les défauts de conception du présent modèle de simulation, l'exécution de la simulation a tout de même démontré que cette méthode fournit des informations appréciables concernant l'aspect dynamique d'un système. Un programme de simulation présente également ses résultats sous forme de distributions de probabilité. Les données sont effectivement toutes exprimées en terme de valeurs minimales, maximales et moyennes. De plus, l'écart type sur la moyenne est donné pour chaque résultat. Les résultats fournis comprennent entre autres l'utilisation des processeurs, les délais de fabrication, les coûts de circulation, le niveau des stocks, la longueur des files d'attente ainsi que les temps d'attente en file.

Le modèle de simulation peut être employé pour évaluer la performance du système à l'aide de différents scénarios. On peut se servir de cet outil pour vérifier si certains paramètres de coûts qui ont été négligés peuvent avoir une influence sur le choix des patrons de charge et de flux optimaux. On pourrait donc inclure les coûts de maintien en stock dans les modèles détaillés et de simulation et vérifier si ces coûts qui ont été négligés jusqu'ici sont vraiment négligeables ou s'ils sont problématiques. Comme la simulation fournit des

mesures dynamiques et continues concernant le niveau des tampons, ces résultats sont beaucoup plus précis que ceux du modèle détaillé, ce qui permet d'estimer la véritable influence des coûts de stockage.

Le prochain et dernier chapitre conclut ce travail. L'application de chaque méthode dans le cadre de la conception des chaînes d'approvisionnement y est discutée.

CONCLUSION

Dans ce travail, la programmation linéaire et la simulation par événements discrets ont été utilisées pour développer des outils de planification de production qui sont employés lors de la conception de chaînes d'approvisionnement.

Champs d'application des techniques utilisées

Le modèle de planification agrégée est employé pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement par les firmes soumissionnaires afin d'évaluer leur capacité de répondre à la demande d'une entreprise réseau. Sa grande rapidité d'exécution permet aux firmes qui doivent répondre à plus d'une offre de tester plusieurs scénarios afin de déterminer les offres auxquelles elles peuvent répondre. Cet outil assiste ainsi les soumissionnaires dans le choix des offres les plus rentables et les informe de la faisabilité des plans. Les plans de production générés incluent les coûts de production et identifient les tronçons et les nœuds qui seront empruntés par les produits au moment de leur fabrication.

Toujours dans le cadre de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, le modèle détaillé est ensuite employé par les fournisseurs dont les soumissions ont été retenues par l'entreprise réseau. Le modèle détaillé génère un plan précis qui assigne une charge de travail seulement aux processeurs qui ont été identifiés par le modèle agrégé lors de l'étape de soumission, ce qui diminue la complexité du problème et en accélère la résolution. Le fait d'offrir au modèle

détaillé le choix de n'utiliser que les tronçons déterminés par le modèle agrégé diminue grandement la quantité d'équations et accélère la résolution du modèle.

Le modèle détaillé fournit des indications concernant les patrons de flux des pièces entre les différents niveaux de processeurs, les patrons de charge à chaque poste, le niveau des tampons et le coût du plan de production. Ses renseignements sont accumulés sur des périodes d'une ou quelques heures, voire même de moins d'une heure. Les résultats se rapprochent alors bien plus de la réalité et permettent de faciliter le contrôle des opérations lorsque le fournisseur exécute son plan de production.

Les deux modèles linéaires génèrent malgré tout des résultats statiques qui ne permettent pas d'évaluer la dynamique d'un système. Contrairement aux modèles de planification, la simulation par événements discrets prend en compte l'aspect dynamique d'un procédé et permet de voir son impact sur le système entier. Cet outil permet alors de valider l'information générée par les modèles linéaires. La simulation apporte donc une information complémentaire importante sur la performance dynamique du système.

Quand cette information est incorporée dans le modèle, les résultats deviennent plus précis et plus représentatifs des performances du vrai système. Cela permet aux preneurs de décision d'évaluer des changements dans une partie de la chaîne d'approvisionnement et de voir leur impact sur les autres composantes du système et même sur la performance du système entier.

Il est avantageux d'utiliser conjointement la planification agrégée, la planification détaillée ainsi que la simulation par événements discrets pour caractériser un système manufacturier agile. Chaque outil apporte son lot de réponses à des problèmes que l'on rencontre à différents niveaux lors de la

conception des chaînes d'approvisionnement. La simulation est employée comme outil stratégique au début de la phase de conception. La planification agrégée est employée comme outil tactique de planification à moyen terme tandis que la planification détaillée est employée comme outil tactique de planification à court terme.

Les trois outils sont en fait complémentaires. Ensemble, ils permettent de faciliter la conception des chaînes d'approvisionnement et d'en améliorer le contrôle.

Travaux futurs

Dans l'exemple présenté, on garde dans le plan agrégé un jeu de 15% pour tous les processeurs, ce qui donnait une marge suffisante pour obtenir une solution au modèle détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé. Il serait cependant profitable de déterminer les taux d'utilisation optimaux qui permette à la fois de générer une solution au modèle détaillé tout en maximisant l'utilisation des machines.

Il serait avantageux d'automatiser l'échange de données entre le modèle de planification agrégée et le modèle détaillé lorsqu'on conçoit un plan détaillé sur les nœuds identifiés par le plan agrégé. On pourrait utiliser un filtre qui ne conserve que les équations ayant trait aux nœuds et aux tronçons identifiés dans le plan agrégé. Une routine transcrirait ensuite ces équations dans le modèle détaillé. Le nombre d'équations serait alors grandement diminué et la résolution du problème s'effectuerait bien plus rapidement.

On pourrait également automatiser l'échange de données entre le modèle d'optimisation et le modèle de simulation. Il s'agirait d'exporter les résultats du

plan de production dans un fichier à la fin de la résolution en définissant un format approprié. Ce fichier serait par la suite lu par le modèle de simulation lors de son exécution. Cela réduirait la quantité de données à manipuler et diminuerait le risque d'erreur.

Les résultats de la simulation pourraient être grandement améliorés, d'une part en reproduisant le plan du modèle détaillé plutôt que le plan agrégé et d'autre part en modifiant le sous-réseau d'assemblage final. Avec ces modifications, les résultats du modèle de simulation devraient être beaucoup plus près des résultats attendus. Cela permettrait ainsi de valider les résultats des modèles de planification.

Une des grandes forces de la simulation par événements discrets est qu'elle permet d'incorporer la variation ainsi que les interdépendances d'un système. Elle permet d'évaluer l'incertitude du procédé, comme la variabilité de la demande, de l'approvisionnement ou du temps de transit, et de voir son impact sur le système. La simulation pourrait ainsi être exécutée à nouveau en considérant alors le côté aléatoire du système. On pourrait par exemple employer les distributions de probabilité s'ajustant à la demande des produits et à la durée des opérations plutôt que de fixer ces paramètres. On pourrait également tenir compte de la probabilité que surviennent des pannes. On pourrait alors pousser plus loin l'analyse des mesures dynamiques de performance du système et tirer pleinement profits des avantages de cet outil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson, C.R. et Paine F.T. (1975) : Managerial Perceptions and Strategic Behavior. *Academy of Management Journal*, 18, pp. 811-823.
- Askin, R.G. et Standridge, C.R. (1993) : Flexible manufacturing systems *Modeling and analysis of manufacturing systems*, John Wiley & sons, New York, N.Y., chap. 5, pp. 125-162.
- Atmani, A. et Lashdari, R.S. (1998) : Model of machine-tool selection and operation allocation in FMS, *International Journal of Production Research*, 36, (5), Mai.
- Baker, K.R. (1974) : *Introduction to sequencing and scheduling*, John Wiley, New York, N.Y.
- Balogun, O.O., Popplewell, K. (1999) : Towards the integration of flexible manufacturing system scheduling, *International Journal of Production Research*, 37, 3399-3428.
- Banks, J. (1998) : *Handbook of simulation*, John Wiley & sons, York, New York.
- Bateman, R.E., Bowden, R.G., Gogg, T.J., Harrell, C.R. et Mott, J.R.A. (1997) : System improvement using simulation. 5^e édition, Promodel Corp., Orem, Utah.
- Berkin, D., Brazier, M., Klungle, R., Menawat, A. et Na, H.S. (1995) : Management of simulation technology in large companies, Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, *Society for Computer Simulation*, San Diego, Californie, pp. 361-366.
- Black, J., Bulat, J., Colwell, B, Combs, R. et Potvin, H. (1996) : Simulation in automotive industry: today and the next five years, *Proceedings of the Autofact Conference*, SME, Dearborn, Michigan, pp. 947-961.
- Bowman, E.H. (1959) : The schedule – sequencing problem, *Operations Research*, 7, pp. 621-624.
- Browne, J. (1984) : Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, April 1984, pp. 114-117.
- Choobineh, F. (1986) : Justification of Flexible Manufacturing Systems, *Proceedings, 1986 International Computers in Engineering Conference and Exh.*, pp. 269-279.
- Clay, G.R., Grange, F. (1997) : Evaluating forecasting algorithms and stocking level strategies using discrete-event simulation, *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Piscataway, N.J, pp. 817-824.
- Conway, R.W, Maxwell, W.L. et Miller, L.W. (1967) : *Theory of scheduling*. Addison-Wesley, Reading, Massachusett.

- Copacino, W. C. (1997): *Supply chain management: The basics and beyond*, St. Lucie Press, Boca Raton, Floride.
- D'Amours, S., Montreuil et B., Soumis, F. (1996): Price-based planning and scheduling of multi-product orders in symbiotic manufacturing networks *European Journal of Operational Research*, 96, pp. 148-166.
- D'Amours, S., Montreuil, B., Lefrancois, P. et SOUMIS, F. (1999a): Networked manufacturing: The impact of information sharing *International Journal of Production Economics*, 58, pp. 63-79.
- D'Amours, S., Montreuil B. et Moke, J. (1999b) : Contract-Based tactical planning of a supply chain *FUCAM*, Glasgow, Juillet 1999.
- Dantzig, G.B. (1960) : A machine-job scheduling model, *Management science*, 6, pp. 191-196.
- De Villiers, M.-E., ACGPS, HEC. (1993) : *Dictionnaire de la gestion de la production et des stocks*, Ed. Québec/Amérique, Presses HEC, Montréal, Québec.
- Fox, M.S. et Smith, S.F. (1984) : ISIS – a knowledge-based system for factory scheduling, *Experts Systems*, 1, 25-48.
- Fox, J.G. (1991) : Effective application of simulation in the life cycle of a manufacturing cell project, *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 411-418.
- French, S. (1982): *Sequencing and scheduling – An introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, Ellis Horwood, New York, N.Y., chap. 9.
- Geller, T.L., Lammers, S.E. et Mackulak, G.T. (1995): « Methodology for simulation application to virtual manufacturing environments », *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, Piscataway, N.J., pp. 909-916.
- Goldman, S.L., Nagel, R.N. et Preiss, K. (1995): *Agile competitors and virtual organizations* Van Nostrand Reinhold, Division of International Thomson Publishing, New York, N.Y.
- Graehl, D. (1992) : Insights into carrier control: a simulation of a power and free conveyor through an automotive paint shop, *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 925-932.
- Grant, H. et Clapp, C. (1988) : Making production scheduling more efficient helps control manufacturing costs and improve productivity, *IIE Transactions*, 20, 54-62.
- Gunal, A., Grajo, E. et Blanck, D. (1994) : Generalization of an AS/RS model in SIMAN/Cinema, *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 857-865.
- Gupta, Y.P., Evans, G.W. et Gupta, M.C. (1991) : A review of multi-criterion approaches to FMS scheduling problems. *International Journal of Production Economics*, 22, 13-31.
- Gupta, T. et Arasakesari, S. (1991) : Capacity planning in wood products industry using simulation, *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 435-440.

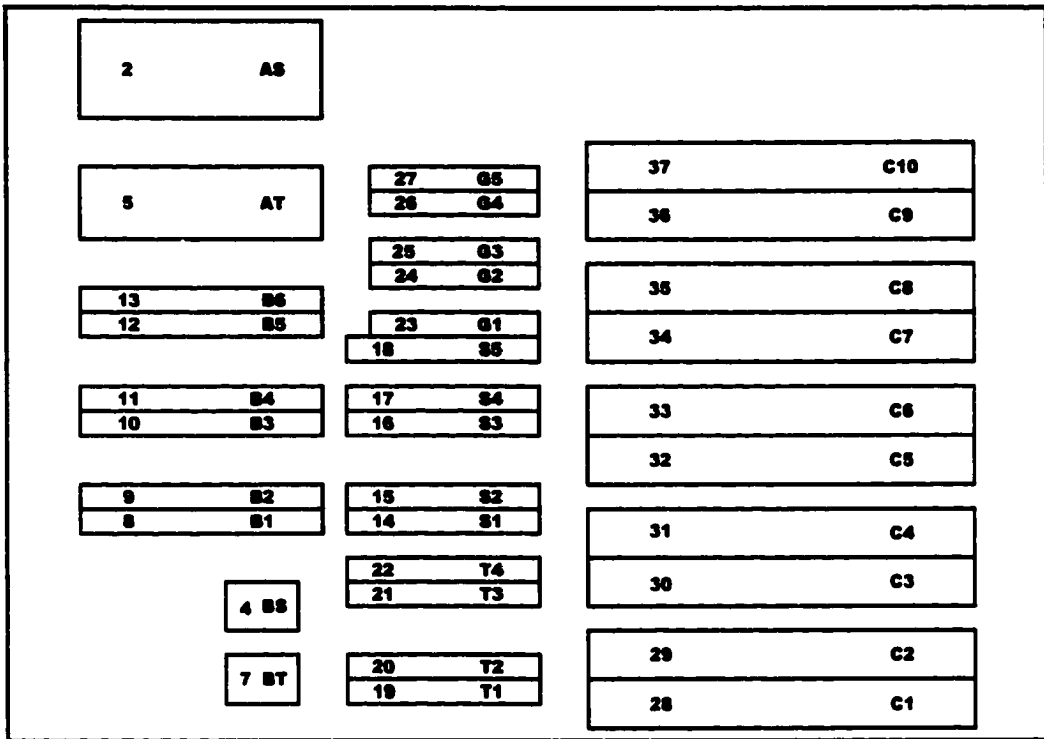
- Hillier, F.S. et Lieberman, G.J. (1990) : *Introduction to Mathematical Programming*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Hurtubise, S., Olivier, C. et Gharbi, A. (2000): Conceptual framework for the management of manufacturing networks *POMS World conference on production and operation management*, Séville, Août 2000.
- Northwestern University (2001) : *Linear Programming – F.A.Q.*, Optimization Technology Center, Northwestern University and Argonne National Laboratory, <http://www-unix.mcs.anl.gov/otc/Guide/faq/linear-programming-faq.html>
- University of Baltimore (2001) : *Systems Simulation: The Shortest Path from Learning to Applications*, University of Baltimore, <http://ubmail.ubalt.edu/~harsham/simulation/sim.htm>
- Jagdev, H.S. et Browne, J. (1998): The extended enterprise – a context for manufacturing *Production Planning and Control*, 9(3), pp. 216-229.
- Jeyebalan, V.J. et Otto, N.C. (1992) : Simulation of material delivery systems with dolly trains, *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 916-924.
- Jiang, J. et Hsias, W.C. (1994) : Mathematical programming for the scheduling problem with alternate process plans in FMS, *Computers and Industrial Engineering*, 27, (1-4), septembre.
- Kim, S.R. (1986) : Multi objective decision making model for a flexible manufacturing system. Kusiak (ed.) *Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies*, New York, North Holland.
- Leung, L.C., Maheshwari, S.K. et Miller, W.A. (1993) : Concurrent part assignment and tool allocation in FMS with material handling considerations, *International Journal of Production Research*, 31, (1), pp. 117-138.
- Manne, A.S. (1960) : On the job-shop scheduling problem, *Operations Research*, 8, pp. 219-223.
- Miles, R.E. et Snow, C.C. (1978) : *Organizational Strategy, Structure and Process*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Miles, R.E., Snow, C.C., Myer, A.D., et Coleman, H.D. (1978) : Organizational Strategy, Structure and Process, *Academy of Management Review*, 3, (3), pp. 546-562.
- Miles, R.E., Snow, C.C., et Charles, C. (1992) : Causes of Failure in Network Organizations, *California Management Review*, 34, (4), pp. 53-70.
- Montreuil, B., Lefrancois, P., Ramudhin, A. et D'Amours, S. (1992): A conceptual introduction to symbiotic manufacturing networks *Proceedings of CEMIT 92 / CECOIA 3Conference*, Tokyo, Japon, pp. 505-508.
- Musselman, K.J. (1998) : Guidelines for success *Handbook of simulation*, John Wiley & sons, New York, N.Y., chap.22, pp. 721-744.
- Myint, S. et Tabucanon, M.T. (1994) : A multiple-criteria approach to machine selection for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 33, pp. 121-131.

- Myles, R.E. et Snow, C.C. (1992): Causes of failure in network organizations *California Management Review*, 34(4), pp. 53-71.
- Norbert, Y., Ouellet, R. et Parent, R. (1999) : Chapitre 6 – La programmation linéaire en nombre entier, *La recherche opérationnelle*, 2^e édition, Gaetan Morin Ed., Montréal, Québec.
- Olivier, C., Montreuil, B., Lefrancois, P. et Maley, J.G. (1994): Evaluating layouts for mass customizing factories *Proceedings of 10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*, Ottawa, Toronto, pp. 862-869.
- Olivier, C., Montreuil, B. et Lefrancois, P. (1996): A conceptual framework for planning and control of virtual manufacturing networks in agile production context, *Proceedings of Rensselaer's Fifth International Conference*, Grenoble, France, pp. 154-159.
- Olivier, C., (1998): *Méthodologie d'évaluation des aménagements d'usines organisées en réseaux de processeurs agiles*, Thèse de doctorat non publiée, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Ste-Foy, Québec.
- Pinedo, M. (1995) : *Scheduling – Theory, Algorithms and Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Poulin, D., Montreuil, B. et Gauvin, S., (1994) : *L'entreprise réseau. Bâtir aujourd'hui l'organisation de demain*, Publi-Relais, Montréal, Québec.
- Pressman, R.S. (1997): Analysis Modeling. *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 4^e édition, McGraw-Hill, New York, N.Y., pp. 298-340.
- Pritsker, A.A.B., et O'Reilly, J.J. (1999) : *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, 2^e édition, John Wiley & sons, York, N.Y.
- Ramudhin, A., Montreuil, B. et Lefrancois, P. (1994): Scheduling project activities in a distributed environment *European Journal of Operational Research*, 78(2), pp. 242-251.
- Rinnooy Kan, A.H.G. (1976) : Machine scheduling problems : Classification, complexity and computations, PhD thesis, University of Amsterdam.
- Saaty, T.L. (1980) : *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Sethi, A.K. et Sethi, A.P. (1990) : Flexibility in manufacturing: A survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2, pp. 289-328.
- Smith, M.L., Ramesh, R., Dudek, R.A. et Blair, E.L. (1986) : Characteristics of US flexible manufacturing systems – a survey, *Proceedings of the second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems : Operations Research Models and Applications*, (Amsterdam : Elsevier Science), pp. 477-486.
- Snow, C.C., Miles, R.E. et Coleman, H.J. (1992) : Managing 21st century network organizations, *Organizational Dynamics*, 20, (3), pp. 5 - 19.

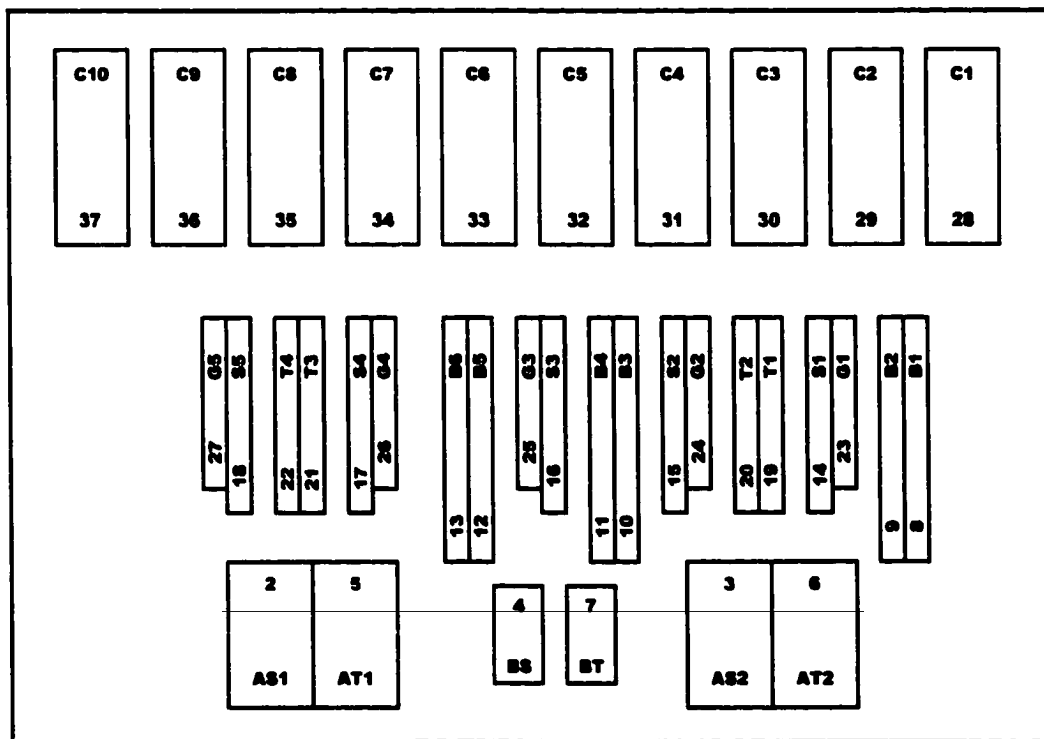
- Stevenson, W.J. (1999a) : Linear Programming *Production Operations Management*, 6^e édition, Irwin McGraw-Hill, New York, N.Y., chap. 5b, pp. 233-266.
- Stevenson, W.J. (1999b) : Simulation *Production Operations Management*, 6^e édition, Irwin McGraw-Hill, New York, N.Y., chap. 19b, pp. 845-865.
- Tsay, Tayur, S., Ganeshan, R. et Magazine, M. (1999): Modeling supply chain contracts: A review. *Quantitative models for supply chain management*, Tayur, Ganeshan and Magazine, Norwell, Massachusetts, pp. 299-336.
- Ulgen, O. (1983) : Society for Computer Simulation, GENTLE: GENERALized Transfer Line Emulation, *Proceedings of the Conference on Simulation in Inventory and Production Control*, Society for Computer Simulation, San Diego, Californie, pp. 25-30.
- Ulgen, O., Gunal, A., Grajo, E. et Shore, J. (1994) : The role of simulation in design and operation of body and paint shops in vehicle assembly plants, *Proceedings of the European Simulation Symposium*, Society for Computer Simulation International, San Diego, Californie, pp. 124-128.
- Van Hentenryck, P. (1999a) : ILOG OPL Studio 2.1 *Optimisation programming language. Reference Manual*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Van Hentenryck, P. (1999b) : ILOG OPL Studio 2.1 *Optimisation programming language. Users Manual*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Vasilash, G. (1995) : Chrysler's CAD/CAM commitment, *Production*, Novembre, pp. 46-50.
- Wabalickis, R.N. (1988) : Justification of FMS with the Analytic Hierarchy Process, *Journal of Manufacturing Systems*, 7 (3), pp. 175-182.
- Wagner, H.M. (1959) : An integer programming model for machine scheduling, *Naval Research Logistics*, 6, pp. 131-140.
- Wyland, B., Buxton, K. et Fuqua B. (2000) : Simulating the supply chain. *IIE Solutions*, Janvier, pp. 37-42.

ANNEXE A

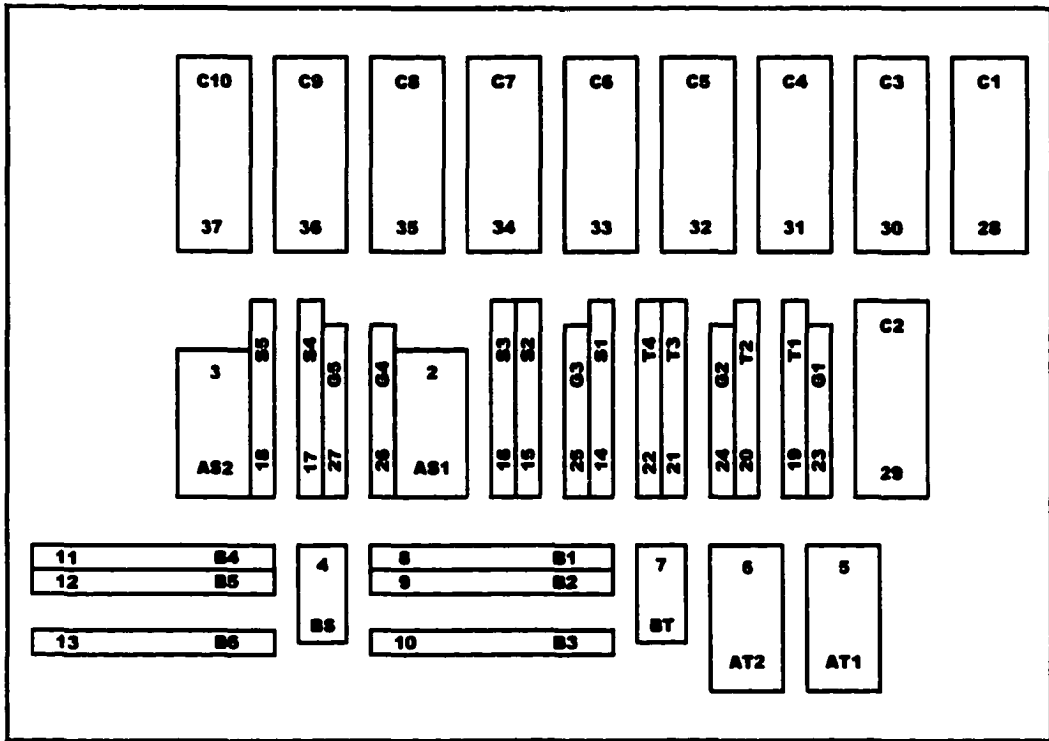
RÉSEAUX ÉTUDIÉS



Réseau 02



Réseau 05



Réseau 06

ANNEXE B

COÛTS DE CIRCULATION DES TROIS RÉSEAUX

*** COUTS DE CIRCULATION POUR L'AMENAGEMENT 02 ***

```
dist_B_BT = [[0.06563], /* dist entre B et BT */
             [0.07188],
             [0.09063],
             [0.09688],
             [0.11563],
             [0.12813]];

dist_B_BS = [[0.04688], /* dist entre B et BS */
             [0.05313],
             [0.07188],
             [0.07813],
             [0.09688],
             [0.10938]];

/* distance entre les postes B et G */
dist_B_G = [[0.06250,0.07500,0.08125,0.09375,0.10000],
            [0.05625,0.06875,0.07500,0.08750,0.09375],
            [0.03750,0.05000,0.05625,0.06875,0.07500],
            [0.03125,0.04375,0.05000,0.06250,0.06875],
            [0.01250,0.02500,0.03125,0.04375,0.05000],
            [0.01875,0.01875,0.02500,0.03750,0.04375]];

/* dist entre AT et T */
dist_AT_T = [[0.16563,0.15938,0.14063,0.13438]];

/*dist entre AS et S*/
dist_AS_S = [[0.15625,0.15000,0.13125,0.12500,0.10625]];

/* dist entre BT et T */
dist_BT_T = [[0.01563,0.01563,0.03438,0.04063]];

/* dist entre BS et S */
dist_BS_S = [[0.03438,0.04063,0.05938,0.06563,0.08438]];

/* dist entre G et C */
dist_G_C =
[[0.16563,0.14063,0.13438,0.10938,0.10313,0.07813,0.07188,0.07813,0.10313,0.12813],
 [0.17813,0.15313,0.14688,0.12188,0.11563,0.09063,0.08438,0.06563,0.09063,0.11563],
 [0.18438,0.15938,0.15313,0.12813,0.12188,0.09688,0.09063,0.06563,0.06563,0.09063],
 [0.19688,0.17188,0.16563,0.14063,0.13438,0.10938,0.10313,0.07813,0.07188,0.07813],
 [0.20313,0.17813,0.17188,0.14688,0.14063,0.11563,0.10938,0.08438,0.07813,0.07188]];

/* dist entre S et C */
dist_S_C =
[[0.11563,0.09063,0.08438,0.06875,0.07500,0.09688,0.10313,0.14063,0.13438,0.15938],
 [0.12188,0.09688,0.09063,0.06563,0.06563,0.09063,0.09688,0.12188,0.12813,0.15313],
 [0.14063,0.11563,0.10938,0.08438,0.07813,0.07188,0.07813,0.10313,0.10938,0.12813],
 [0.14688,0.12188,0.11563,0.09063,0.08125,0.06563,0.07188,0.09688,0.12188,0.14688],
 [0.15938,0.13438,0.12813,0.10313,0.09688,0.07188,0.06563,0.08438,0.10938,0.13438]];

/* dist entre T et C */
dist_T_C =
[[0.07188,0.07813,0.08438,0.10938,0.11563,0.14063,0.14688,0.17188,0.17813,0.20313],
 [0.07813,0.07188,0.07813,0.10313,0.10938,0.13438,0.14063,0.16563,0.17188,0.19688],
 [0.09688,0.07188,0.06563,0.08438,0.09063,0.11563,0.12188,0.14688,0.15313,0.17813],
 [0.10313,0.07813,0.07188,0.07813,0.08438,0.10938,0.11563,0.13438,0.14688,0.17188]];
```

***** COUTS DE CIRCULATION POUR L'AMENAGEMENT 05 *****

/* Dist_B_BS */

[[0.10625],
[0.10000],
[0.03125],
[0.02500],
[0.01875],
[0.02500]];

/* Dist_B_BT */

[[0.08750],
[0.08125],
[0.01250],
[0.00625],
[0.03750],
[0.04375]];

/* Dist_B_G */

[[0.02500,0.06250,0.10625,0.14375,0.18750],
[0.01875,0.05625,0.10000,0.13750,0.18125],
[0.06250,0.02500,0.03125,0.06875,0.11250],
[0.06875,0.03125,0.02500,0.06250,0.10625],
[0.10000,0.06250,0.01875,0.03125,0.07500],
[0.10625,0.06875,0.02500,0.02500,0.06875]];

/* Dist_AS_S */

[[0.15313,0.11563,0.08438,0.03438,0.02813],
[0.03438,0.02813,0.05938,0.10938,0.14063]];

/* Dist_BS_S */

[0.10000,0.06250,0.03125,0.05625,0.08750]

/* Dist_AT_T */

[[0.11563,0.10938,0.02813,0.03438],
[0.02813,0.03438,0.14688,0.15313]];

/* Dist_BT_T */

[0.06875,0.06250,0.08750,0.09375]

/* Dist_G_C */

[[0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250,0.13750,0.16250,0.18750,0.21250],
[0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000,0.17500],
[0.13125,0.10625,0.08125,0.05625,0.03125,0.03125,0.05625,0.08125,0.10625,0.13125],
[0.16875,0.14375,0.11875,0.09375,0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375],
[0.21250,0.18750,0.16250,0.13750,0.11250,0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000]];

/* Dist_S_C */

[[0.05625,0.03125,0.03125,0.05625,0.08125,0.08750,0.11250,0.13750,0.16250,0.18750],
[0.09375,0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375,0.11875,0.14375,0.16875],
[0.12500,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250,0.13750],
[0.17500,0.15000,0.12500,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750],
[0.20625,0.18125,0.15625,0.13125,0.10625,0.08125,0.05625,0.03125,0.03125,0.05625]];

/* Dist_T_C */

[[0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375,0.11875,0.14375,0.16875,0.19375],
[0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250,0.13750,0.16250,0.18750],
[0.18750,0.16250,0.13750,0.11250,0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000,0.07500],
[0.19375,0.16875,0.14375,0.11875,0.09375,0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875]];

***** COUTS DE CIRCULATION POUR L'AMENAGEMENT 06 *****

/* Dist_B_BS */

[[0.08125],
[0.08750],
[0.10000],
[0.01250],
[0.01875],
[0.03125]];

/* Dist_B_BT */

[[0.01250],
[0.01875],
[0.03125],
[0.11875],
[0.12500],
[0.13750]];

/* Dist_B_G */

[[0.06875,0.04375,0.02813,0.07813,0.09063],
[0.07500,0.05000,0.03438,0.08438,0.09688],
[0.08750,0.06250,0.04688,0.09688,0.10938],
[0.15625,0.13125,0.09063,0.04375,0.03125],
[0.16250,0.13750,0.09688,0.05000,0.03750],
[0.17500,0.15000,0.10938,0.06250,0.05000]];

/* Dist_AS_S */

[[0.05000,0.03125,0.02500,0.03750,0.05000],
[0.10625,0.08750,0.08125,0.03125,0.01875]];

/* Dist_BS_S */

[0.08750,0.06875,0.06250,0.01250,0.02500],

/* Dist_AT_T */

[[0.01875,0.03125,0.05000,0.05625],
[0.02500,0.01250,0.03125,0.03750]];

/* Dist_BT_T */

[0.05000,0.03750,0.01875,0.01250],

/* Dist_G_C */

[[0.06250,0.09375,0.03750,0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000,0.16250],
[0.08750,0.11875,0.06250,0.05000,0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000],
[0.12500,0.15625,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250],
[0.17500,0.18125,0.15000,0.12500,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250],
[0.18750,0.19375,0.16250,0.13750,0.11250,0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000]];

/* Dist_S_C */

[[0.11250,0.15000,0.08750,0.06250,0.03750,0.01250,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250],
[0.13125,0.16875,0.10625,0.08125,0.05625,0.03125,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375],
[0.13750,0.17500,0.11250,0.08750,0.06250,0.03750,0.01250,0.03750,0.06250,0.08750],
[0.18750,0.22500,0.16250,0.13750,0.11250,0.08750,0.06250,0.03750,0.01250,0.03750],
[0.20000,0.23750,0.17500,0.15000,0.12500,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.02500]];

/* Dist_T_C */

[[0.06250,0.09375,0.03750,0.01250,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250,0.13750,0.16250],
[0.07500,0.10625,0.05000,0.02500,0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000],
[0.09375,0.12500,0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375,0.11875,0.14375],
[0.10000,0.13125,0.07500,0.05000,0.02500,0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500]];

ANNEXE C

MODÈLE AGRÉGÉ ET FICHIERS DE DONNÉES

```

/*-----*/
/* CONCEPTION D'UN MODELE D'OPTIMISATION MATHEMATIQUE */
/* EN PLANIFICATION AGREEE DE LA PRODUCTION */
/* REALISE PAR Stephanie HURTUBISE, ing.stag. */
/* DEBUTE LE 26 JUIN 2000 */
/* REVISE LE 03 JUILLET 2000 */
/*-----*/
/* MODELE PROVENANT DE LA THESE DE DOCTORAT DE */
/* CLAUDE OLIVIER, ing., Ph.D. (septembre 1998) */
/* AMENAGEMENT Q2, JCOUR 17, sigma=25+ */
/* COMPOSITION DES PRODUITS (p. 77) */
/* SPECIFICATION GENERALE DES PROCEDES (p. 163) */
/* AMENAGEMENT Q2 (p. 170) */
/* CHOIX DES PROCESSEURS (p. 191-194) */
/* COUTS DE CIRCULATION (p. 324-337) */
/*-----*/
/* DEFINITION DES PARAMETRES */
/*-----*/

enum mac_B ... /* processeurs de type B */
enum mac_AS ... /* processeurs de type AS */
enum mac_AT ... /* processeurs de type AT */
enum mac_BS ... /* processeurs de type BS */
enum mac_BT ... /* processeurs de type BT */
enum mac_G ... /* processeurs de type G */
enum mac_S ... /* processeur de type S */
enum mac_T ... /* processeurs de type T */
enum mac_C ... /* processeurs de type C */
enum produits ... /* produits fabriques et assembles */
enum pieces ... /* composantes G, S et T à assembler */
int dem[produits] = ... /* demande pour chaque produit */
int compo[pieces,produits] = ... /* composition ch. produit */
int grand_M = ... /* tres grande valeur-utilisation interdite */

/* capacite de temps (en secondes) des processeurs */
float cap_B = ...
float cap_BT = ...
float cap_BS = ...
float cap_AT = ...
float cap_AS = ...
float cap_G = ...
float cap_S = ...
float cap_T = ...
float cap_C = ...

/* distance entre les processeurs de chaque niveau */
float dist_B_BT[mac_B,mac_BT] = ...
float dist_B_BS[mac_B,mac_BS] = ...
float dist_B_G[mac_B,mac_G] = ...
float dist_AT_T[mac_AT,mac_T] = ...
float dist_AS_S[mac_AS,mac_S] = ...
float dist_BT_T[mac_BT,mac_T] = ...
float dist_BS_S[mac_BS,mac_S] = ...
float dist_G_C[mac_G,mac_C] = ...
float dist_S_C[mac_S,mac_C] = ...
float dist_T_C[mac_T,mac_C] = ...

/* temps requis pour fabriquer ou assembler
/* une piece ou un produit */
float temps_B = ...
float temps_BT = ...
float temps_BS = ...
float temps_AT = ...
float temps_AS = ...
float temps_G = ...
float temps_S = ...
float temps_T = ...
float temps_C = ...

/*-----*/
/* DEFINITION DES VARIABLES */
/*-----*/

/* production à chaque processeur */
var float+ prod_B[mac_B,produits];
var float+ prod_BT[mac_BT,produits];
var float+ prod_BS[mac_BS,produits];
var float+ prod_AT[mac_AT,produits];
var float+ prod_AS[mac_AS,produits];
var float+ prod_G[mac_G,produits];
var float+ prod_S[mac_S,produits];
var float+ prod_T[mac_T,produits];
var float+ prod_C[mac_C,produits];

/* circulation entre les processeurs de chaque niveau */
var float+ flux_B_BT[mac_B, mac_BT,produits];
var float+ flux_B_BS[mac_B, mac_BS,produits];
var float+ flux_B_G[mac_B, mac_G,produits];
var float+ flux_AT_T[mac_AT, mac_T,produits];
var float+ flux_AS_S[mac_AS, mac_S,produits];
var float+ flux_BT_T[mac_BT, mac_T,produits];
var float+ flux_BS_S[mac_BS, mac_S,produits];
var float+ flux_G_C[mac_G, mac_C,produits];
var float+ flux_S_C[mac_S, mac_C,produits];
var float+ flux_T_C[mac_T, mac_C,produits];

/* qté de produits en inventaire à chaque processeur */
var float+ inv_B[mac_B,produits];
var float+ inv_BT[mac_BT,produits];
var float+ inv_BS[mac_BS,produits];
var float+ inv_AT[mac_AT,produits];
var float+ inv_AS[mac_AS,produits];
var float+ inv_G[mac_G,produits];
var float+ inv_S[mac_S,produits];
var float+ inv_T[mac_T,produits];

/*-----*/
/* FONCTION OBJECTIF : Minimiser la distance parcourue */
/*-----*/
minimize
sum(i in produits) (
sum(n in mac_C) (
sum(m in mac_G) flux_G_C[m,n,i] * dist_G_C[m,n] +
sum(n in mac_C) (
sum(m in mac_S) flux_S_C[m,n,i] * dist_S_C[m,n] +
sum(n in mac_C) (
sum(m in mac_T) flux_T_C[m,n,i] * dist_T_C[m,n] +
sum(n in mac_T) (
sum(m in mac_AT) flux_AT_T[m,n,i] * dist_AT_T[m,n] +
sum(n in mac_T) (
sum(m in mac_BT) flux_BT_T[m,n,i] * dist_BT_T[m,n] +
sum(n in mac_S) (
sum(m in mac_BS) flux_BS_S[m,n,i] * dist_BS_S[m,n] +
sum(n in mac_S) (
sum(m in mac_AS) flux_AS_S[m,n,i] * dist_AS_S[m,n] +
sum(n in mac_G) (
sum(m in mac_B) flux_B_G[m,n,i] * dist_B_G[m,n] +
sum(n in mac_BT) (
sum(m in mac_B) flux_B_BT[m,n,i] * dist_B_BT[m,n] +
sum(n in mac_BS) (
sum(m in mac_B) flux_B_BS[m,n,i] * dist_B_BS[m,n]);

/*-----*/
/* CONTRAINTES */
/*-----*/

subject to {

/* Respect de la demande */
forall(i in produits)
sum(m in mac_C) prod_C[m,i] = dem[i];

/*-----*/
/* BALANCEMENT DES ENTREES-SORTIES */
/*-----*/
/* PREMIER NIVEAU */
/*-----*/
/* ? flux_out = production */
/*-----*/

/*-----*/
/* Processeurs B */
/*-----*/
forall(i in produits)
forall(m in mac_B) /* F_OUT = P */
sum(n in mac_BT) flux_B_BT[m,n,i] +
sum(o in mac_BS) flux_B_BS[m,o,i] +
sum(p in mac_G) flux_B_G[m,p,i] = prod_B[m,i];

/*-----*/
/* Processeurs AT */
/*-----*/
forall(i in produits)
forall(m in mac_AT) /* F_OUT = P */
sum(n in mac_T) flux_AT_T[m,n,i] = prod_AT[m,i];

/*-----*/
/* Processeurs AS */
/*-----*/
forall(i in produits)
forall(m in mac_AS) /* F_OUT = P */
sum(n in mac_S) flux_AS_S[m,n,i] = prod_AS[m,i];

/*-----*/
/* NIVEAUX INTERMEDIAIRES */
/*-----*/
/* ? flux_in = production */
/* ? flux_out = production */
/*-----*/

/*-----*/
/* Processeurs BT */
/*-----*/
forall(i in produits)
forall(n in mac_BT) /* F_IN = P */
sum(m in mac_B) flux_B_BT[m,n,i] = prod_BT[n,i];
forall(i in produits)
forall(m in mac_BT) /* F_OUT = P */
sum(n in mac_T) flux_BT_T[m,n,i] = prod_BT[m,i];

```

```

/*-----*/
/* Processeurs BS */
/*-----*/
forall(i in produits)
  forall(n in mac_BS) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_B) flux_B_BS[m,n,i] = prod_BS[n,i];
forall(i in produits)
  forall(m in mac_BS) /* F_OUT = P */
    sum(n in mac_S) flux_BS_S[m,n,i] = prod_BS[m,i];

/*-----*/
/* Processeurs G */
/*-----*/
forall(i in produits)
  forall(n in mac_G) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_B) flux_B_G[m,n,i] = prod_G[n,i];
forall(i in produits)
  forall(m in mac_G) /* F_OUT = P */
    sum(n in mac_C) flux_G_C[m,n,i] = prod_G[m,i];

/*-----*/
/* Processeurs S */
/*-----*/
forall(i in produits)
  forall(n in mac_S) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_AS) flux_AS_S[m,n,i] = prod_S[n,i];
forall(i in produits)
  forall(n in mac_S) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_BS) flux_BS_S[m,n,i] = prod_S[n,i];
forall(i in produits)
  forall(m in mac_S) /* F_OUT = P */
    sum(n in mac_C) flux_S_C[m,n,i] = prod_S[m,i];

/*-----*/
/* Processeurs T */
/*-----*/
forall(i in produits)
  forall(n in mac_T) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_AT) flux_AT_T[m,n,i] = prod_T[n,i];
forall(i in produits)
  forall(n in mac_T) /* F_IN = P */
    sum(m in mac_BT) flux_BT_T[m,n,i] = prod_T[n,i];
forall(i in produits)
  forall(m in mac_T) /* F_OUT = P */
    sum(n in mac_C) flux_T_C[m,n,i] = prod_T[m,i];

/*-----*/
/* DERNIER NIVEAU - Processeurs C */
/*-----*/
/* ? flux_in = production */
forall(i in produits)
  forall(n in mac_C)
    sum(m in mac_S) flux_G_C[m,n,i] * compo[G,i] *
prod_C[n,i];
forall(i in produits)
  forall(n in mac_C)
    sum(m in mac_S) flux_S_C[m,n,i] * compo[S,i] *
prod_C[n,i];
forall(i in produits)
  forall(n in mac_C)
    sum(m in mac_T) flux_T_C[m,n,i] * compo[T,i] *
prod_C[n,i];

/*-----*/
/* LIMITE DE CAPACITE DE PRODUCTION */
/*-----*/
forall(m in mac_B)
  sum(i in produits) prod_B[m,i] * temps_B <= cap_B;
forall(m in mac_BT)
  sum(i in produits) prod_BT[m,i] * temps_BT <= cap_BT;
forall(m in mac_BS)
  sum(i in produits) prod_BS[m,i] * temps_BS <= cap_BS;
forall(m in mac_AT)
  sum(i in produits) prod_AT[m,i] * temps_AT <= cap_AT;
forall(m in mac_AS)
  sum(i in produits) prod_AS[m,i] * temps_AS <= cap_AS;
forall(m in mac_G)
  sum(i in produits) prod_G[m,i] * temps_G <= cap_G;
forall(m in mac_S)
  sum(i in produits) prod_S[m,i] * temps_S <= cap_S;
forall(m in mac_T)
  sum(i in produits) prod_T[m,i] * temps_T <= cap_T;
forall(m in mac_C)
  sum(i in produits) prod_C[m,i] * temps_C <= cap_C;
};

```

```

/*-----*/
/* DONNÉES POUR L'AMÉNAGEMENT 02 */
/*-----*/
/* Modele de planification agrégée de la production */
/*-----*/

mac_B = {B1,B2,B3,B4,B5,B6}; /* 6 machines type B */
mac_AS = {AS}; /* 1 machines type AS */
mac_AT = {AT}; /* 1 machines type AT */
mac_BS = {BS}; /* 1 machines type BS */
mac_BT = {BT}; /* 1 machines type BT */
mac_G = {G1,G2,G3,G4,G5}; /* 5 machines type G */
mac_S = {S1,S2,S3,S4,S5}; /* 5 machines type S */
mac_T = {T1,T2,T3,T4}; /* 4 machines type T */
mac_C = {C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10}; /* 10 mach type C */

produits = {dash_A,dash_B,dash_C,dash_D,dash_E,dash_F,
dash_G,dash_H,dash_I,dash_J,dash_K,dash_L};
/* 12 produits */

pieces = {G,S,T}; /* types de composants pour former des C */

/* demande du jour 17 sigma 25 pour 12 produits */
dem = {1512,1450,2055,713,532,946,
462,2941,3108,2206,953,277};

/* tests de demande */
/*dem = {1512,1304,2055,713,532,792,
462,2941,3108,2035,822,277};*/
/*dem = {110,120,130,140,150,160,170,180,190,200,210,220};*/
/*dem = {500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,500};*/
/*dem = {800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800};*/

/* composition réelle G,S,T des 12 produits */
compo = {{2,1,2,1,1,1,2,2,2,2,1,2},
{0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1},
{1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0}};

/* composition unitaire G,S,T des 12 produits */
/*compo = {{1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
{0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1},
{1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0}};*/

grand_M = 1000000; /* tres grande valeur=utilisation interdite */

cap_B = 86400; /* capacité temps des machines traitant les B */
cap_BT = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BT */
cap_BS = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BS */
cap_AT = 864000; /* cap. temps des machines traitant les AT */
cap_AS = 864000; /* cap. temps des machines traitant les AS */
cap_G = 86400; /* cap. temps des machines traitant les G */
cap_S = 86400; /* cap. temps des machines traitant les S */
cap_T = 86400; /* cap. temps des machines traitant les T */
cap_C = 57600; /* cap. temps des machines traitant les C */

dist_B_BT = {{0.06563}, /* dist entre B et BT */
{0.07188},
{0.09063},
{0.09688},
{0.11563},
{0.12813}};

dist_B_BS = {{0.04688}, /* dist entre B et BS */
{0.05313},
{0.07188},
{0.07813},
{0.09688},
{0.10938}};

/* distance entre les postes B et G */
dist_B_G = {{0.06250,0.07500,0.08125,0.09375,0.10000},
{0.05625,0.06875,0.07500,0.08750,0.09375},
{0.03750,0.05000,0.05625,0.06875,0.07500},
{0.03125,0.04375,0.05000,0.06250,0.06875},
{0.01250,0.02500,0.03125,0.04375,0.05000},
{0.01875,0.03125,0.03750,0.04375,0.05000}};

/* dist entre AT et T */
dist_AT_T = {{0.16563,0.15938,0.14063,0.13438}};

/*dist entre AS et S*/
dist_AS_S = {{0.15625,0.15000,0.13125,0.12500,0.10625}};

/* dist entre BT et T */
dist_BT_T = {{0.01563,0.01563,0.03438,0.04063}};

/* dist entre BS et S */
dist_BS_S = {{0.03438,0.04063,0.05938,0.06563,0.08438}};

/* dist entre G et C */
dist_G_C = {{0.16563,0.14063,0.13438,0.10938,0.10313,
0.07813,0.07188,0.07813,0.10313,0.12813},
{0.17813,0.15313,0.14688,0.12188,0.11563,
0.09063,0.08438,0.06563,0.09063,0.11563},
{0.18438,0.15938,0.15313,0.12813,0.12188,
0.09688,0.09063,0.06563,0.06563,0.09063},
{0.19688,0.17188,0.16563,0.14063,0.13438,
0.10938,0.10313,0.07813,0.07188,0.07813},
{0.20313,0.17813,0.17188,0.14688,0.14063,
0.11563,0.10938,0.08438,0.07813,0.07188}};

/* dist entre S et C */
dist_S_C = {{0.11563,0.09063,0.08438,0.06875,0.07500,
0.09688,0.10313,0.14063,0.13438,0.15938},
{0.12188,0.09688,0.09063,0.06563,0.06563,
0.09063,0.09688,0.12188,0.12813,0.15313},
{0.14063,0.11563,0.10938,0.08438,0.07813,
0.07188,0.07813,0.10313,0.10938,0.12813},
{0.14688,0.12188,0.11563,0.09063,0.08125,
0.06563,0.07188,0.09688,0.12188,0.14688},
{0.15938,0.13438,0.12813,0.10313,0.09688,
0.07188,0.06563,0.08438,0.10938,0.13438}};

/* dist entre T et C */
dist_T_C = {{0.07188,0.07813,0.08438,0.10938,0.11563,
0.14063,0.14688,0.17188,0.17813,0.20313},
{0.07813,0.07188,0.07813,0.10313,0.10938,
0.13438,0.14063,0.16563,0.17188,0.19688},
{0.09688,0.07188,0.06563,0.08438,0.09063,
0.11563,0.12188,0.14688,0.15313,0.17813},
{0.10313,0.07813,0.07188,0.07813,0.08438,
0.10938,0.11563,0.13438,0.14688,0.17188}};

temps_B = 7.2; /* temps de traitement pour fabriquer un B */
temps_BT = 2.14; /* temps de traitement pour fabriquer un BT */
temps_BS = 2.85; /* temps de traitement pour fabriquer un BS */
temps_AT = 12.6; /* temps de traitement pour fabriquer un AT */
temps_AS = 11.2; /* temps de traitement pour fabriquer un AS */
temps_G = 11.76; /* temps de traitement pour fabriquer un G */
temps_S = 23.5; /* temps de traitement pour fabriquer un S */
temps_T = 25.5; /* temps de traitement pour fabriquer un T */
temps_C = 26.1; /* temps de traitement pour assembler un C */

```

```

-----/
/* DONNÉES POUR L'AMÉNAGEMENT 05 */
-----/
/* Modèle de planification agrégée de la production */
-----/

mac_B = {B1,B2,B3,B4,B5,B6}; /* 6 machines type B */
mac_AS = {AS1,AS2}; /* 2 machines type AS */
mac_AT = {AT1,AT2}; /* 2 machines type AT */
mac_BS = {BS}; /* 1 machines type BS */
mac_BT = {BT}; /* 1 machines type BT */
mac_G = {G1,G2,G3,G4,G5}; /* 5 machines type G */
mac_S = {S1,S2,S3,S4,S5}; /* 5 machines type S */
mac_T = {T1,T2,T3,T4}; /* 4 machines type T */
mac_C = {C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10}; /* 10 mach type C */

produits = {dash_A,dash_BFK,dash_CGI,dash_D,dash_E,dash_HJL};
/* 6 produits */

pieces = {G,S,T}; /* types de composantes pour former des C */

dem = {1512,3349,5625,713,532,5424};

compo = [[{2,1,2,1,1,2}, /* composition G,S,T de 6 produits*/
{0,0,1,1,1,1},
{1,1,1,0,1,0}];

grand_M = 1000000; /* tres grande valeur=utilisation interdite */

cap_B = 86400; /* capacite temps des machines traitant les B */
cap_BT = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BT */
cap_BS = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BS */
cap_AT = 86400; /* cap. temps des machines traitant les AT */
cap_AS = 86400; /* cap. temps des machines traitant les AS */
cap_G = 86400; /* cap. temps des machines traitant les G */
cap_S = 86400; /* cap. temps des machines traitant les S */
cap_T = 86400; /* cap. temps des machines traitant les T */
cap_C = 57600; /* cap. temps des machines traitant les C */

dist_B_BT = [[{0.08750},
{0.08125},
{0.01250},
{0.00625},
{0.03750},
{0.04375}];

dist_B_BS = [[{0.10625},
{0.10000},
{0.03125},
{0.02500},
{0.01875},
{0.02500}];

/* distance entre les postes B et G */
dist_B_G = [[{0.02500,0.06250,0.10625,0.14375,0.18750},
{0.01875,0.05625,0.10000,0.13750,0.18125},
{0.06250,0.02500,0.03125,0.06875,0.11250},
{0.06875,0.03125,0.02500,0.06250,0.10625},
{0.10000,0.06250,0.01875,0.03125,0.07500},
{0.10625,0.06875,0.02500,0.02500,0.06875}];

/* dist entre AT et T */
dist_AT_T = [[{0.11563,0.10938,0.02813,0.03438},
{0.02813,0.03438,0.14688,0.15313}];

/*dist entre AS et S*/
dist_AS_S = [[{0.15313,0.11563,0.08438,0.03438,0.02813},
{0.03438,0.02813,0.05938,0.10938,0.14063}];

/* dist entre BT et T */
dist_BT_T = [[{0.06875,0.06250,0.08750,0.09375}];

/* dist entre BS et S */
dist_BS_S = [[{0.10000,0.06250,0.03125,0.05625,0.08750}];

/* dist entre G et C */
dist_G_C = [[{0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,
0.11250,0.13750,0.16250,0.18750,0.21250},
{0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000,
0.07500,0.10000,0.12500,0.15000,0.17500},
{0.13125,0.10625,0.08125,0.05625,0.03125,
0.03125,0.05625,0.08125,0.10625,0.13125},
{0.16875,0.14375,0.11875,0.09375,0.06875,
0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375},
{0.21250,0.18750,0.16250,0.13750,0.11250,
0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000}];

/* dist entre S et C */
dist_S_C = [[{0.05625,0.03125,0.03125,0.05625,0.08125,
0.08750,0.11250,0.13750,0.16250,0.18750},
{0.09375,0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,
0.06875,0.09375,0.11875,0.14375,0.16875},
{0.12500,0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,
0.03750,0.06250,0.08750,0.11250,0.13750},
{0.17500,0.15000,0.12500,0.10000,0.07500,
0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,0.08750},
{0.20625,0.18125,0.15625,0.13125,0.10625,
0.08125,0.05625,0.03125,0.03125,0.05625}];

/* dist entre T et C */
dist_T_C = [[{0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875,
0.09375,0.11875,0.14375,0.16875,0.19375},
{0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250,
0.08750,0.11250,0.13750,0.16250,0.18750},
{0.18750,0.16250,0.13750,0.11250,0.08750,
0.06250,0.03750,0.02500,0.05000,0.07500},
{0.19375,0.16875,0.14375,0.11875,0.09375,
0.06875,0.04375,0.01875,0.04375,0.06875}];

temps_B = 7.2; /* temps de traitement pour fabriquer un B */
temps_BT = 2.14; /* temps de traitement pour fabriquer un BT */
temps_BS = 2.85; /* temps de traitement pour fabriquer un BS */
temps_AT = 12.6; /* temps de traitement pour fabriquer un AT */
temps_AS = 11.2; /* temps de traitement pour fabriquer un AS */
temps_G = 11.76; /* temps de traitement pour fabriquer un G */
temps_S = 23.5; /* temps de traitement pour fabriquer un S */
temps_T = 25.5; /* temps de traitement pour fabriquer un T */
temps_C = 26.1; /* temps de traitement pour assembler un C */

```

```

-----
/* DONNÉES POUR L'AMÉNAGEMENT 06 */
-----
/* Modèle de planification agrégée de la production */
-----

mac_B = {B1,B2,B3,B4,B5,B6}; /* 6 machines type B */
mac_AS = {AS1,AS2}; /* 2 machines type AS */
mac_AT = {AT1,AT2}; /* 2 machines type AT */
mac_BS = {BS1}; /* 1 machines type BS */
mac_BT = {BT}; /* 1 machines type BT */
mac_G = {G1,G2,G3,G4,G5}; /* 5 machines type G */
mac_S = {S1,S2,S3,S4,S5}; /* 5 machines type S */
mac_T = {T1,T2,T3,T4}; /* 4 machines type T */
mac_C = {C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10}; /* 10 mach type C */

produits = {dash_A,dash_BFK,dash_CGI,dash_D,dash_E,dash_HJL};
/* 6 produits */

pieces = {G,S,T}; /* types de composantes pour former des C */

dem = {1512,3349,5625,713,532,5424};

compo = {{2,1,2,1,1,2}, /* composition G,S,T de 6 produits */
         {0,0,1,1,1,1},
         {1,1,1,0,1,0}};

grand_M = 1000000; /* tres grande valeur=utilisation interdite */

cap_B = 86400; /* capacite temps des machines traitant les B */
cap_BT = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BT */
cap_BS = 86400; /* cap. temps des machines traitant les BS */
cap_AT = 86400; /* cap. temps des machines traitant les AT */
cap_AS = 86400; /* cap. temps des machines traitant les AS */
cap_G = 86400; /* cap. temps des machines traitant les G */
cap_S = 86400; /* cap. temps des machines traitant les S */
cap_T = 86400; /* cap. temps des machines traitant les T */
cap_C = 57600; /* cap. temps des machines traitant les C */

dist_B_BT = {{0.01250},
             {0.01875},
             {0.03125},
             {0.11875},
             {0.12500},
             {0.13750}};

dist_B_BS = {{0.08125},
             {0.08750},
             {0.10000},
             {0.01250},
             {0.01875},
             {0.03125}};

/* distance entre les postes B et G */
dist_B_G = {{0.06875,0.04375,0.02913,0.07613,0.09063},
            {0.07500,0.05000,0.03438,0.08438,0.09694},
            {0.08750,0.06250,0.04688,0.09688,0.10938},
            {0.15625,0.13125,0.09063,0.04375,0.03125},
            {0.16250,0.13750,0.09688,0.05000,0.03750},
            {0.17500,0.15000,0.10938,0.06250,0.05000}};

/* dist entre AT et T */
dist_AT_T = {{0.01875,0.03125,0.05000,0.05625},
            {0.02500,0.01250,0.03125,0.03750}};

/*dist entre AS et S*/
dist_AS_S = {{0.05000,0.03125,0.02500,0.03750,0.05000},
            {0.10625,0.08750,0.08125,0.03125,0.01875}};

/* dist entre BT et T */
dist_BT_T = {{0.05000,0.03750,0.01875,0.01250}};

/* dist entre BS et S */
dist_BS_S = {{0.05000,0.03750,0.01875,0.01250}};

/* dist entre G et C */
dist_G_C = {{0.06250,0.09375,0.03750,0.02500,0.05000,
            0.07500,0.10000,0.12500,0.15000,0.16250},
            {0.08750,0.11875,0.06250,0.05000,0.02500,
            0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000},
            {0.12500,0.15625,0.10000,0.07500,0.05000,
            0.02500,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250},
            {0.17500,0.18125,0.15000,0.12500,0.10000,
            0.07500,0.05000,0.02500,0.03750,0.06250},
            {0.18750,0.19375,0.16250,0.13750,0.11250,
            0.08750,0.06250,0.03750,0.02500,0.05000}};

/* dist entre S et C */
dist_S_C = {{0.11250,0.15000,0.08750,0.06250,0.03750,
            0.01250,0.03750,0.06250,0.08750,0.11250},
            {0.13125,0.16875,0.10625,0.08125,0.05625,
            0.03125,0.01875,0.04375,0.06875,0.09375},
            {0.13750,0.17500,0.11250,0.08750,0.06250,
            0.03750,0.01250,0.03750,0.06250,0.08750},
            {0.18750,0.22500,0.16250,0.13750,0.11250,
            0.08750,0.06250,0.03750,0.01250,0.03750},
            {0.20000,0.23750,0.17500,0.15000,0.12500,
            0.10000,0.07500,0.05000,0.02500,0.02500}};

/* dist entre T et C */
dist_T_C = {{0.06250,0.09375,0.03750,0.01250,0.03750,
            0.06250,0.08750,0.11250,0.13750,0.16250},
            {0.07500,0.10625,0.05000,0.02500,0.02500,
            0.05000,0.07500,0.10000,0.12500,0.15000},
            {0.09375,0.12500,0.06875,0.04375,0.01875,
            0.04375,0.06874,0.09375,0.11875,0.14375},
            {0.10000,0.13125,0.07500,0.05000,0.02500,
            0.02500,0.05000,0.07500,0.10000,0.12500}};

temps_B = 7.2; /* temps de traitement pour fabriquer un B */
temps_BT = 2.14; /* temps de traitement pour fabriquer un BT */
temps_BS = 2.85; /* temps de traitement pour fabriquer un BS */
temps_AT = 12.6; /* temps de traitement pour fabriquer un AT */
temps_AS = 11.2; /* temps de traitement pour fabriquer un AS */
temps_G = 11.76; /* temps de traitement pour fabriquer un G */
temps_S = 23.5; /* temps de traitement pour fabriquer un S */
temps_T = 25.5; /* temps de traitement pour fabriquer un T */
temps_C = 26.1; /* temps de traitement pour assembler un C */

```

ANNEXE D

RÉSULTATS DU MODÈLE AGRÉGÉ (AMÉNAGEMENT-05, LIMITÉ À 85%)

Script file ma0813
 Nombre itérations : 527
 Temps résolution : 0,862 sec.
 Valeur objective : 5617,06\$

 AFFICHAGE_AGRÉGÉ_PAR_POSTE

Flux	B1	BT	0
Flux	B2	BT	0
Flux	B3	BT	1531
Flux	B4	BT	9487
Flux	B5	BT	0
Flux	B6	BT	0
Flux	B1	BS	0
Flux	B2	BS	0
Flux	B3	BS	6338
Flux	B4	BS	0
Flux	B5	BS	5956
Flux	B6	BS	0
Flux	B1	G1	1401
Flux	B1	G2	627
Flux	B1	G3	0
Flux	B1	G4	0
Flux	B1	G5	0
Flux	B2	G1	4844
Flux	B2	G2	5356
Flux	B2	G3	0
Flux	B2	G4	0
Flux	B2	G5	0
Flux	B3	G1	0
Flux	B3	G2	262
Flux	B3	G3	2069
Flux	B3	G4	0
Flux	B3	G5	0
Flux	B4	G1	0
Flux	B4	G2	0
Flux	B4	G3	713
Flux	B4	G4	0
Flux	B4	G5	0
Flux	B5	G1	0
Flux	B5	G2	0
Flux	B5	G3	3463
Flux	B5	G4	0
Flux	B5	G5	781
Flux	B6	G1	0
Flux	B6	G2	0
Flux	S2	C10	0
Flux	S3	C1	0
Flux	S3	C2	0

Flux	B6	G3	0
Flux	B6	G4	6245
Flux	B6	G5	3955
Flux	AT1	T1	0
Flux	AT1	T2	0
Flux	AT1	T3	2880
Flux	AT1	T4	2378
Flux	AT2	T1	2880
Flux	AT2	T2	2880
Flux	AT2	T3	0
Flux	G2	C8	0
Flux	AT2	T4	0
Flux	AS1	S1	0
Flux	AS1	S2	0
Flux	AS1	S3	0
Flux	AS1	S4	3125
Flux	AS1	S5	2612
Flux	AS2	S1	307
Flux	AS2	S2	3125
Flux	AS2	S3	3125
Flux	AS2	S4	0
Flux	AS2	S5	0
Flux	BT	T1	2880
Flux	BT	T2	2880
Flux	BT	T3	2880
Flux	BT	T4	2378
Flux	BS	S1	307
Flux	BS	S2	3125
Flux	BS	S3	3125
Flux	BS	S4	3125
Flux	BS	S5	2612
Flux	G1	C1	1793
Flux	G1	C2	3695
Flux	G1	C3	757
Flux	G1	C4	0
Flux	G1	C5	0
Flux	G1	C6	0
Flux	G1	C7	0
Flux	G1	C8	0
Flux	G1	C9	0
Flux	G1	C10	0
Flux	G2	C1	0
Flux	G2	C2	0
Flux	G2	C3	2368
Flux	G2	C4	3752
Flux	G2	C5	125
Flux	G2	C6	0
Flux	G2	C7	0
Flux	G2	C8	0
Flux	G2	C9	0
Flux	T2	C10	0
Flux	T3	C1	0
Flux	T3	C2	0

Flux	G2	C10	0
Flux	G3	C1	0
Flux	G3	C2	0
Flux	G3	C3	0
Flux	G3	C4	0
Flux	G3	C5	2913
Flux	G3	C6	3332
Flux	G3	C7	0
Flux	G3	C8	0
Flux	G3	C9	0
Flux	G3	C10	0
Flux	G4	C1	0
Flux	G4	C2	0
Flux	G4	C3	0
Flux	G4	C4	0
Flux	G4	C5	0
Flux	G4	C6	0
Flux	G4	C7	3752
Flux	G4	C8	2493
Flux	G4	C9	0
Flux	G4	C10	0
Flux	G5	C1	0
Flux	G5	C2	0
Flux	G5	C3	0
Flux	G5	C4	0
Flux	G5	C5	0
Flux	G5	C6	0
Flux	G5	C7	0
Flux	G5	C8	629
Flux	G5	C9	3752
Flux	G5	C10	355
Flux	S1	C1	0
Flux	S1	C2	307
Flux	S1	C3	0
Flux	S1	C4	0
Flux	S1	C5	0
Flux	S1	C6	0
Flux	S1	C7	0
Flux	S1	C8	0
Flux	S1	C9	0
Flux	S1	C10	0
Flux	S2	C1	0
Flux	S2	C2	0
Flux	S2	C3	1249
Flux	S2	C4	1876
Flux	S2	C5	0
Flux	S2	C6	0
Flux	S2	C7	0
Flux	S2	C8	0
Flux	S2	C9	0
Prod	C1	.	1793
Prod	C2	.	1876
Prod	C3	.	1876

Flux	S3	C3	0	Flux	T3	C3	0	Prod	C4	1876
Flux	S3	C4	0	Flux	T3	C4	0	Prod	C5	1876
Flux	S3	C5	1876	Flux	T3	C5	0	Prod	C6	1876
Flux	S3	C6	1249	Flux	T3	C6	420	Prod	C7	1876
Flux	S3	C7	0	Flux	T3	C7	1876	Prod	C8	1876
Flux	S3	C8	0	Flux	T3	C8	0	Prod	C9	1876
Flux	S3	C9	0	Flux	T3	C9	584	Prod	C10	355
Flux	S3	C10	0	Flux	T3	C10	0			
Flux	S4	C1	0	Flux	T4	C1	0			
Flux	S4	C2	0	Flux	T4	C2	0			
Flux	S4	C3	0	Flux	T4	C3	0			
Flux	S4	C4	0	Flux	T4	C4	0			
Flux	S4	C5	0	Flux	T4	C5	0			
Flux	S4	C6	207	Flux	T4	C6	0			
Flux	S4	C7	1876	Flux	T4	C7	0			
Flux	S4	C8	1043	Flux	T4	C8	1876			
Flux	S4	C9	0	Flux	T4	C9	147			
Flux	S4	C10	0	Flux	T4	C10	355			
Flux	S5	C1	0							
Flux	S5	C2	0	Prod	B1		2028			
Flux	S5	C3	0	Prod	B2		10200			
Flux	S5	C4	0	Prod	B3		10200			
Flux	S5	C5	0	Prod	B4		10200			
Flux	S5	C6	0	Prod	B5		10200			
Flux	S5	C7	0	Prod	B6		10200			
Flux	S5	C8	736	Prod	AS1		5737			
Flux	S5	C9	1876	Prod	AS2		6557			
Flux	S5	C10	0	Prod	AT1		5258			
Flux	T1	C1	0	Prod	AT2		5760			
Flux	T1	C2	1569	Prod	BS		12294			
Flux	T1	C3	1311	Prod	BT		11018			
Flux	T1	C4	0	Prod	G1		6245			
Flux	T1	C5	0	Prod	G2		6245			
Flux	T1	C6	0	Prod	G3		6245			
Flux	T1	C7	0	Prod	G4		6245			
Flux	T1	C8	0	Prod	G5		4736			
Flux	T1	C9	0	Prod	S1		307			
Flux	T1	C10	0	Prod	S2		3125			
Flux	T2	C1	1793	Prod	S3		3125			
Flux	T2	C2	0	Prod	S4		3125			
Flux	T2	C3	565	Prod	S5		2612			
Flux	T2	C4	523	Prod	T1		2880			
Flux	T2	C5	0	Prod	T2		2880			
Flux	T2	C6	0	Prod	T3		2880			
Flux	T2	C7	0	Prod	T4		2378			
Flux	T2	C8	0							
Flux	T2	C9	0							

ANNEXE E

RÉSULTATS DU MODÈLE DÉTAILLÉ SUR LES NŒUDS IDENTIFIÉS PAR LE MODÈLE AGRÉGÉ

POSTE	MOD	PÉR	PROD	POSTE	MOD	PÉR	PROD	POSTE	MOD	PÉR	PROD
B2	A	8	193,9	B4	A	9	134,5	B6	B	9	308,9
B2	A	9	261,2	B4	A	11	141,2	B6	B	13	256,6
B2	A	10	500,0	B4	A	12	206,1	B6	B	15	137,9
B2	A	11	86,5	B4	A	14	160,7	B6	B	16	413,0
B2	A	12	500,0	B4	A	16	134,5	B6	B	19	26,6
B2	A	14	357,5	B4	A	20	24,7	B6	B	20	122,8
B2	A	15	500,0	B4	B	4	109,7	B6	C	1	306,1
B2	A	17	4,3	B4	B	6	141,2	B6	C	2	500,0
B2	A	18	306,1	B4	B	8	344,0	B6	C	3	500,0
B2	A	20	70,4	B4	B	9	365,5	B6	C	4	500,0
B2	A	21	244,2	B4	B	10	290,5	B6	C	5	311,3
B2	B	6	500,0	B4	B	11	141,2	B6	C	7	500,0
B2	B	11	198,0	B4	B	12	293,9	B6	C	10	215,2
B2	B	16	21,1	B4	B	13	65,4	B6	C	12	204,5
B2	B	18	21,2	B4	B	15	147,9	B6	C	13	243,4
B2	B	21	137,9	B4	B	16	141,2	B6	C	14	500,0
B2	B	22	77,1	B4	B	17	492,3	B6	C	16	87,0
B2	C	1	372,4	B4	B	19	79,7	B6	C	17	298,6
B2	C	2	484,6	B4	B	21	233,5	B6	C	18	193,9
B2	C	3	500,0	B4	C	1	52,7	B6	C	20	71,1
B2	C	4	500,0	B4	C	2	235,4	B6	C	21	268,6
B2	C	5	500,0	B4	C	4	347,1	B6	C	22	224,1
B2	C	7	259,1	B4	C	5	500,0	B6	E	8	281,6
B2	C	8	306,1	B4	C	6	358,8	B6	E	19	250,4
B2	C	9	221,8	B4	C	7	500,0	B6	F	1	87,1
B2	C	13	500,0	B4	C	10	157,2	B6	F	5	188,7
B2	C	14	142,5	B4	C	13	128,4	B6	F	6	57,5
B2	C	16	364,7	B4	C	14	275,6	B6	F	8	218,4
B2	C	18	172,6	B4	C	16	224,4	B6	F	9	191,1
B2	C	19	235,7	B4	C	18	225,8	B6	F	10	284,8
B2	F	1	127,6	B4	C	19	420,3	B6	F	11	500,0
B2	F	7	195,3	B4	C	20	366,3	B6	F	12	295,5
B2	F	9	17,0	B4	C	21	224,6	B6	F	15	362,1
B2	F	11	215,6	B4	D	2	123,5	B6	F	17	201,4
B2	F	16	114,2	B4	D	10	52,3	B6	F	18	306,1
B2	F	17	495,7	B4	D	18	137,9	B6	F	19	223,0
B2	F	19	264,3	B4	E	17	7,7	B6	F	20	306,1
B3	A	3	141,2	B4	F	1	306,1	B6	F	21	231,4
B3	A	12	36,0	B4	F	3	500,0	B6	F	22	275,9
B3	A	15	66,5	B4	F	8	14,8				
B3	B	3	246,6	B4	F	11	217,6				
B3	B	4	67,3	B4	F	13	306,1				
B3	B	6	97,9	B4	F	14	63,7				
B3	B	9	91,0	B4	F	15	352,1				
B3	B	11	88,5	B4	F	18	136,3				
B3	B	13	243,1	B4	F	20	109,0				
B3	B	15	90,8	B4	F	21	42,0				
B3	B	18	124,8	B5	B	14	49,9				
B3	B	22	30,3	B5	B	16	4,1				
B3	C	1	500,0	B5	C	1	346,8				
B3	C	2	273,8	B5	C	2	21,9				
B3	C	4	342,1	B5	C	4	500,0				
B3	C	5	500,0	B5	C	8	500,0				
B3	C	8	500,0	B5	C	11	500,0				
B3	C	9	195,7	B5	C	12	500,0				
B3	C	11	300,5	B5	C	16	418,9				
B3	C	14	229,7	B5	C	17	193,9				
B3	C	15	342,7	B5	C	18	194,2				
B3	C	16	500,0	B5	C	19	358,4				
B3	C	17	259,7	B5	C	21	36,1				
B3	C	19	382,1	B5	D	3	23,8				
B3	C	20	500,0	B5	D	7	61,4				
B3	C	21	328,0	B5	D	14	450,1				
B3	C	22	275,9	B5	D	16	77,0				
B3	D	4	90,6	B5	D	19	141,6				
B3	D	11	111,0	B5	D	20	64,7				
B3	E	9	213,4	B5	D	21	92,1				
B3	E	10	93,0	B5	F	1	153,2				
B3	E	13	256,9	B5	F	2	478,1				
B3	E	18	375,2	B5	F	3	476,2				
B3	E	19	117,9	B5	F	5	500,0				
B3	F	2	226,2	B5	F	6	500,0				
B3	F	3	112,2	B5	F	7	438,6				
B3	F	6	402,1	B5	F	9	500,0				
B3	F	7	500,0	B5	F	10	500,0				
B3	F	10	407,0	B5	F	13	500,0				
B3	F	12	464,0	B5	F	15	500				
B3	F	14	270,3	B5	F	17	306,122				
B3	F	17	240,3	B5	F	18	305,849				
B3	F	21	172,0	B5	F	20	435,261				
B4	A	1	141,2	B5	F	21	371,785				
B4	A	2	141,2	B5	F	22	306,122				
B4	A	4	43,3	B6	B	1	53,8873				
B4	A	8	141,2	B6	B	6	442,516				

POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ
AS1	C	1	248,4	AT1	C	10	285,7	BS	F	12	291,1
AS1	C	2	14,0	AT1	C	14	215,3	BS	F	13	471,2
AS1	C	5	124,1	AT1	C	17	282,4	BS	F	15	190,0
AS1	C	6	254,7	AT1	C	19	119,6	BS	F	16	1000,0
AS1	C	7	321,4	AT1	C	20	284,4	BS	F	18	240,3
AS1	C	9	271,1	AT1	C	21	144,5	BS	F	21	305,2
AS1	C	10	168,2	AT1	E	11	105,1	BS	F	22	371,8
AS1	C	11	321,4	AT1	E	12	285,7				
AS1	C	12	183,6	AT1	E	21	141,2				
AS1	C	16	233,4	AT2	A	1	285,7	BT	A	2	141,2
AS1	C	20	321,4	AT2	A	2	13,4	BT	A	3	141,2
AS1	E	10	153,2	AT2	A	4	285,7	BT	A	4	141,2
AS1	E	15	128,4	AT2	A	7	6,3	BT	A	7	43,3
AS1	E	16	88,1	AT2	A	8	3,4	BT	A	9	141,2
AS1	E	17	162,2	AT2	A	9	144,5	BT	A	11	134,5
AS1	E	22	0,1	AT2	A	10	3,4	BT	A	12	141,2
AS1	F	1	73,0	AT2	A	12	141,2	BT	A	13	141,2
AS1	F	4	153,2	AT2	A	13	141,2	BT	A	14	36,0
AS1	F	5	197,3	AT2	A	14	177,1	BT	A	15	225,6
AS1	F	6	66,7	AT2	A	16	141,2	BT	A	16	56,8
AS1	F	8	321,4	AT2	A	17	134,5	BT	A	17	134,5
AS1	F	9	50,3	AT2	A	18	18,0	BT	A	18	9,7
AS1	F	12	137,9	AT2	A	19	16,5	BT	A	22	24,7
AS1	F	13	321,4	AT2	B	7	97,9	BT	B	4	246,6
AS1	F	14	321,4	AT2	B	9	88,4	BT	B	5	177,0
AS1	F	17	159,3	AT2	B	10	141,2	BT	B	7	97,9
AS1	F	18	321,4	AT2	B	11	285,7	BT	B	8	141,2
AS1	F	22	105,3	AT2	B	12	144,5	BT	B	9	224,9
AS2	C	2	153,2	AT2	B	14	105,2	BT	B	10	297,1
AS2	C	3	237,4	AT2	B	17	151,3	BT	B	11	328,5
AS2	C	4	321,4	AT2	B	20	136,6	BT	B	12	141,2
AS2	C	7	321,4	AT2	B	21	103,5	BT	B	13	293,9
AS2	C	8	129,3	AT2	C	2	272,3	BT	B	14	243,1
AS2	C	9	168,2	AT2	C	3	285,7	BT	B	15	65,4
AS2	C	10	147,0	AT2	C	5	285,7	BT	B	16	147,9
AS2	C	12	204,5	AT2	C	6	285,7	BT	B	17	141,2
AS2	C	13	321,4	AT2	C	8	282,4	BT	B	18	492,3
AS2	C	15	321,4	AT2	C	9	52,8	BT	B	20	77,4
AS2	C	16	168,2	AT2	C	10	141,2	BT	B	22	233,5
AS2	C	17	15,0	AT2	C	13	137,8	BT	C	2	282,4
AS2	C	18	41,7	AT2	C	14	3,4	BT	C	3	226,8
AS2	C	19	153,2	AT2	C	15	285,7	BT	C	4	282,4
AS2	C	20	153,2	AT2	C	16	144,5	BT	C	5	282,4
AS2	C	21	251,4	AT2	C	18	267,8	BT	C	6	564,7
AS2	C	22	55,0	AT2	C	19	269,2	BT	C	8	858,8
AS2	D	3	84,0	AT2	C	20	149,1	BT	C	9	372,0
AS2	D	5	39,5	AT2	C	21	182,2	BT	C	14	285,6
AS2	D	9	52,3	AT2	C	22	117,6	BT	C	15	229,7
AS2	D	14	242,4					BT	C	16	275,6
AS2	D	17	153,2					BT	C	17	468,1
AS2	D	19	141,6	BS	C	2	306,4	BT	C	18	259,7
AS2	F	1	321,4	BS	C	3	233,4	BT	C	19	225,8
AS2	F	2	168,2	BS	C	4	99,3	BT	C	20	420,3
AS2	F	5	282,0	BS	C	5	306,4	BT	C	21	366,3
AS2	F	6	321,4	BS	C	6	1035,7	BT	C	22	224,6
AS2	F	8	192,1	BS	C	9	628,0	BT	E	11	153,2
AS2	F	9	100,9	BS	C	12	621,9	BT	E	15	128,4
AS2	F	10	174,4	BS	C	14	678,6	BT	E	19	7,7
AS2	F	11	321,4	BS	C	16	127,3	BT	E	20	242,7
AS2	F	12	116,9	BS	C	17	418,9				
AS2	F	14	79,0	BS	C	18	193,9				
AS2	F	16	153,2	BS	C	19	194,2				
AS2	F	17	153,2	BS	C	20	183,6				
AS2	F	18	279,8	BS	C	21	291,1				
AS2	F	19	26,6	BS	C	22	306,3				
AS2	F	20	168,2	BS	D	4	23,8				
AS2	F	21	70,1	BS	D	6	33,5				
AS2	F	22	266,4	BS	D	7	57,1				
				BS	D	8	61,4				
				RS	D	13	111,0				
AT1	B	4	285,7	BS	D	15	131,4				
AT1	B	6	285,7	BS	D	17	153,2				
AT1	B	7	285,7	BS	D	20	141,6				
AT1	B	11	180,6	BS	E	11	153,2				
AT1	B	13	285,7	BS	E	14	128,4				
AT1	B	14	70,4	BS	E	19	250,4				
AT1	B	16	285,7	BS	F	2	153,2				
AT1	B	17	3,4	BS	F	3	226,2				
AT1	B	18	285,7	BS	F	4	771,6				
AT1	B	22	126,0	BS	F	6	193,9				
AT1	C	1	272,9	BS	F	7	193,9				
AT1	C	2	285,7	BS	F	8	317,3				
AT1	C	3	285,7	BS	F	9	545,2				
AT1	C	9	285,7	BS	F	11	153,2				

POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ
G1	A	9	179,2	G3	F	4	306,1	S2	C	3	153,2
G1	A	10	275,9	G3	F	5	306,1	S2	C	4	153,2
G1	A	11	308,1	G3	F	6	306,1	S2	C	5	99,3
G1	A	12	280,3	G3	F	7	306,1	S2	C	6	153,2
G1	A	13	224,1	G3	F	8	306,1	S2	C	7	153,2
G1	A	14	275,9	G3	F	9	186,9	S2	C	8	153,2
G1	A	15	306,1	G3	F	10	237,7	S2	C	9	153,2
G1	A	16	306,1	G3	F	11	253,8	S2	C	10	153,2
G1	A	17	170,8	G3	F	12	217,6	S2	C	11	153,2
G1	A	18	78,7	G3	F	13	306,1	S2	C	12	153,2
G1	A	19	306,1	G3	F	14	306,1	S2	C	13	153,2
G1	A	21	70,4	G3	F	15	63,7	S2	C	14	153,2
G1	A	22	194,8	G3	F	16	256,2	S2	C	15	153,2
G1	A	23	49,4	G3	F	17	306,1	S2	C	16	153,2
G1	B	7	112,2	G3	F	18	306,1	S2	C	17	153,2
G1	B	8	157,9	G3	F	19	164,3	S2	C	18	153,2
G1	B	9	128,9	G3	F	20	305,8	S2	C	19	153,2
G1	B	17	21,1	G3	F	21	239,0	S2	C	20	153,2
G1	B	22	64,4	G3	F	22	214,0	S2	C	21	153,2
G1	B	23	77,1	G3	F	23	306,1	S2	C	22	153,2
G1	C	2	306,1	G4	B	8	306,1	S2	C	23	153,2
G1	C	3	178,5	G4	B	10	107,7	S2	F	5	53,9
G1	C	4	306,1	G4	B	11	174,1	S3	D	5	23,8
G1	C	5	306,1	G4	B	14	137,9	S3	D	7	33,5
G1	C	6	306,1	G4	B	15	137,9	S3	D	8	57,1
G1	C	7	193,9	G4	B	16	137,9	S3	D	9	9,1
G1	C	10	13,3	G4	B	18	306,1	S3	D	10	52,3
G1	C	14	30,3	G4	B	19	77,8	S3	D	15	111,0
G1	C	21	235,7	G4	B	20	55,7	S3	D	16	131,4
G1	F	3	127,6	G4	B	22	119,6	S3	D	19	153,2
G1	F	8	148,2	G4	C	2	306,1	S3	D	21	141,6
G1	F	10	17,0	G4	C	3	306,1	S3	F	3	153,2
G1	F	12	25,8	G4	C	4	306,1	S3	F	4	153,2
G1	F	13	82,0	G4	C	5	306,1	S3	F	5	129,4
G1	F	17	114,2	G4	C	6	306,1	S3	F	6	153,2
G1	F	18	227,4	G4	C	7	306,1	S3	F	7	119,6
G1	F	20	306,1	G4	C	9	306,1	S3	F	8	96,1
G1	F	22	46,9	G4	C	10	48,8	S3	F	9	144,1
G1	F	23	179,6	G4	C	12	306,1	S3	F	10	100,9
G2	B	10	25,0	G4	C	13	306,1	S3	F	11	153,2
G2	B	11	53,0	G4	C	14	188,2	S3	F	12	153,2
G2	B	12	137,9	G4	C	15	188,2	S3	F	13	153,2
G2	B	13	137,9	G4	C	16	168,2	S3	F	14	153,2
G2	B	16	90,8	G4	C	17	306,1	S3	F	15	42,2
G2	B	19	124,8	G4	C	19	228,4	S3	F	16	21,8
G2	B	20	21,2	G4	C	21	306,1	S3	F	17	153,2
G2	B	22	73,5	G4	C	22	186,6	S3	F	18	153,2
G2	B	23	30,3	G4	C	23	306,1	S3	F	20	153,2
G2	C	2	66,2	G4	E	10	149,6	S3	F	21	11,6
G2	C	3	306,1	G4	E	11	132,0	S3	F	22	153,2
G2	C	4	81,6	G4	E	20	250,4	S3	F	23	153,2
G2	C	5	306,1	G5	B	2	53,9	S4	C	3	153,2
G2	C	8	259,1	G5	B	11	21,3	S4	C	4	80,2
G2	C	9	306,1	G5	B	12	0,1	S4	C	6	153,2
G2	C	11	253,1	G5	B	15	122,8	S4	C	7	153,2
G2	C	12	60,4	G5	B	22	3,2	S4	C	8	153,2
G2	C	13	90,7	G5	C	3	193,9	S4	C	9	153,2
G2	C	14	306,1	G5	C	4	9,0	S4	C	10	153,2
G2	C	15	306,1	G5	C	6	30,3	S4	C	11	15,3
G2	C	16	215,3	G5	C	16	19,7	S4	C	13	153,2
G2	C	17	306,1	G5	C	18	29,1	S4	C	14	153,2
G2	C	18	306,1	G5	F	6	275,9	S4	C	15	153,2
G2	C	19	181,3	G5	F	9	275,9	S4	C	16	24,8
G2	C	20	284,9	G5	F	10	191,1	S4	C	17	153,2
G2	C	21	306,1	G5	F	11	284,8	S4	C	18	153,2
G2	C	22	232,6	G5	F	12	306,1	S4	C	19	153,2
G2	C	23	275,9	G5	F	13	306,1	S4	C	20	41,0
G2	F	8	47,1	G5	F	15	183,3	S4	C	21	30,4
G2	F	12	107,8	G5	F	16	286,4	S4	C	22	137,9
G3	B	9	119,2	G5	F	18	277,1	S4	C	23	153,1
G3	B	10	68,4	G5	F	19	306,1	S4	E	12	153,2
G3	B	12	88,5	G5	F	20	223,0	S4	E	16	128,4
G3	B	16	49,9	G5	F	21	306,1	S4	E	20	112,2
G3	B	19	3,9	G5	F	22	231,4	S4	E	21	122,8
G3	B	20	0,3	G5	F	23	275,9	S4	E	22	15,3
G3	B	21	2,4					S4	E	23	0,1
G3	D	3	123,5					S4	F	4	73,0
G3	D	11	52,3	S1	F	6	128,8	S4	F	5	153,2
G3	D	15	242,4	S1	F	8	61,1	S4	F	11	137,9
G3	D	19	137,9	S1	F	9	92,5	S5	C	8	116,6
G3	D	21	64,7	S1	F	16	15,0	S5	C	14	9,1
G3	D	22	92,1	S1	F	20	153,2	S5	C	15	15,3
G3	F	2	306,1	S1	F	21	73,5	S5	F	6	153,2
G3	F	3	182,7	S1	F	23	113,2	S5	F	7	74,2

POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ	POSTE	MOD	PÉR	QTÉ
S5	F	8	36,6	T3	C	10	136,1	C4	C	10	137,9
S5	F	9	80,6	T3	C	11	126,4	C4	C	11	137,9
S5	F	10	153,2	T3	C	13	141,2	C4	C	12	137,9
S5	F	13	137,9	T3	C	14	119,8	C4	C	13	137,9
S5	F	14	137,9	T3	C	15	141,2	C4	C	14	137,9
S5	F	15	137,9	T3	C	16	88,5	C4	C	15	137,9
S5	F	16	153,2	T3	C	17	134,5	C4	C	16	137,9
S5	F	17	153,2	T3	C	18	141,2	C4	C	17	137,9
S5	F	18	153,2	T3	C	19	141,2	C4	C	18	86,0
S5	F	20	82,9	T3	C	20	116,7	C4	C	19	137,9
S5	F	21	153,2	T3	C	21	137,9	C4	C	20	137,9
S5	F	22	152,0	T3	C	22	141,2	C4	C	21	135,9
S5	F	23	105,3	T3	C	23	134,7	C4	C	22	137,9
				T4	B	6	141,2	C4	C	23	137,9
				T4	B	9	141,2	C4	C	24	137,9
T1	A	3	141,2	T4	B	10	131,4	C4	F	18	51,9
T1	A	4	141,2	T4	B	11	141,2	C4	F	21	2,0
T1	A	5	141,2	T4	B	12	39,4	C5	D	9	114,4
T1	A	8	43,3	T4	B	14	131,4	C5	D	10	9,1
T1	A	10	141,2	T4	B	15	137,9	C5	D	17	83,6
T1	A	12	134,5	T4	B	16	12,7	C5	D	18	25,5
T1	A	13	141,2	T4	B	17	141,2	C5	D	20	137,9
T1	A	14	141,2	T4	B	18	141,2	C5	D	22	84,7
T1	A	15	36,0	T4	B	19	126,0	C5	F	9	23,5
T1	A	16	141,2	T4	B	20	130,6	C5	F	10	128,9
T1	A	17	141,2	T4	B	21	25,8	C5	F	11	137,9
T1	A	18	134,5	T4	B	23	119,6	C5	F	12	137,9
T1	A	19	6,5	T4	C	4	3,0	C5	F	13	137,9
T1	A	20	3,2	T4	C	13	89,7	C5	F	14	137,9
T1	A	23	24,7	T4	C	15	3,2	C5	F	15	137,9
T1	B	8	97,9	T4	C	20	2,9	C5	F	16	137,9
T1	B	12	6,7	T4	C	23	15,1	C5	F	17	54,4
T1	B	15	105,2	T4	E	12	101,7	C5	F	18	112,4
T1	B	19	8,1	T4	E	13	51,4	C5	F	19	137,9
T1	B	20	137,9	T4	E	16	128,4	C5	F	21	137,9
T1	B	22	132,7	T4	E	20	7,7	C5	F	22	73,2
T1	B	23	107,4	T4	E	21	101,5	C5	F	23	137,9
T1	C	6	141,2	T4	E	22	141,2	C5	F	24	137,9
T1	C	7	141,2					C8	B	10	49,7
T1	C	9	141,2					C8	B	11	137,9
T1	C	11	141,2	C2	A	10	89,6	C6	B	13	85,6
T1	C	18	6,7	C2	A	11	137,9	C6	B	14	2,9
T1	C	19	126,6	C2	A	12	129,4	C6	B	18	4,6
T1	C	21	141,2	C2	A	13	137,9	C6	B	19	45,4
T1	C	22	8,5	C2	A	14	137,9	C6	B	24	6,5
T1	C	23	9,1	C2	A	15	137,9	C6	D	13	52,3
T2	B	10	88,4	C2	A	16	137,9	C6	D	18	133,4
T2	B	11	141,2	C2	A	17	137,9	C6	D	24	92,1
T2	B	12	141,2	C2	A	18	115,7	C6	F	9	137,9
T2	B	13	141,2	C2	A	20	137,9	C6	F	10	88,3
T2	B	14	141,2	C2	A	21	49,2	C6	F	12	137,9
T2	B	20	5,2	C2	A	23	137,9	C6	F	14	135,1
T2	C	3	141,2	C2	A	24	24,7	C6	F	15	137,9
T2	C	4	141,2	C2	B	10	48,3	C6	F	16	137,9
T2	C	5	141,2	C2	B	18	9,2	C6	F	17	137,9
T2	C	6	141,2	C2	F	9	137,9	C6	F	20	137,9
T2	C	7	141,2	C2	F	12	8,5	C6	F	21	15,0
T2	C	8	141,2	C2	F	18	13,1	C6	F	24	30,5
T2	C	9	141,2	C2	F	19	137,9	C7	C	9	137,9
T2	C	10	52,8	C2	F	21	88,8	C7	C	10	137,9
T2	C	15	141,2	C2	F	22	137,9	C7	C	11	137,9
T2	C	16	141,2	C2	F	24	113,2	C7	C	12	137,9
T2	C	17	141,2	C3	B	11	137,9	C7	C	13	137,9
T2	C	18	141,2	C3	B	12	100,8	C7	C	14	137,9
T2	C	19	141,2	C3	B	13	137,9	C7	C	15	137,9
T2	C	20	135,9	C3	B	14	50,2	C7	C	16	137,9
T2	C	21	141,2	C3	B	15	137,9	C7	C	17	137,9
T2	C	22	141,2	C3	B	16	137,9	C7	C	18	137,9
T2	C	23	141,2	C3	B	18	102,8	C7	C	19	137,9
T3	B	6	141,2	C3	B	20	8,1	C7	C	20	137,9
T3	B	7	141,2	C3	B	21	137,9	C7	C	21	137,9
T3	B	10	5,0	C3	B	23	137,9	C7	C	22	137,9
T3	B	11	14,8	C3	B	24	107,4	C7	C	23	137,9
T3	B	12	141,2	C3	C	9	137,9	C7	C	24	137,9
T3	B	14	21,3	C3	C	10	137,9	C8	B	9	137,9
T3	B	16	52,7	C3	C	12	37,2	C8	B	10	137,9
T3	B	17	6,7	C3	C	14	87,8	C8	B	11	137,9
T3	B	21	3,2	C3	C	17	137,9	C8	B	12	137,9
T3	B	23	6,5	C3	C	18	35,2	C8	B	13	36,2
T3	C	3	141,2	C3	C	19	137,9	C8	B	15	137,9
T3	C	4	82,6	C3	C	20	129,8	C8	B	16	137,9
T3	C	5	141,2	C3	C	22	137,9	C8	B	18	137,9
T3	C	8	141,2	C3	C	24	30,5	C8	B	19	137,9
T3	C	9	141,2	C4	C	9	137,9	C8	B	20	137,9

POSTE	MOD	PÉR	QTÉ
C8	B	21	137,9
C8	B	22	25,8
C8	B	24	119,6
C8	C	14	86,5
C8	C	17	9,5
C8	C	22	2,9
C8	C	24	15,1
C8	E	13	101,7
C8	E	14	51,4
C8	E	17	128,4
C8	E	22	109,2
C8	E	23	137,9
C8	E	24	3,2
C9	B	11	53,9
C9	B	12	21,3
C9	B	14	0,1
C9	B	17	122,8
C9	B	23	3,2
C9	C	12	116,6
C9	C	18	9,8
C9	C	21	14,5
C9	F	9	137,9
C9	F	10	137,9
C9	F	11	84,0
C9	F	13	137,9
C9	F	14	137,9
C9	F	15	137,9
C9	F	16	137,9
C9	F	17	15,1
C9	F	18	128,1
C9	F	19	137,9
C9	F	20	137,9
C9	F	21	123,4
C9	F	22	137,9
C9	F	23	134,7
C9	F	24	137,9

DE	À	MOD	PÉR	FLUX
T2	C3	B	15	137,931
T2	C3	B	16	137,931
T2	C3	B	23	5,22798
T2	C3	C	17	82,0145
T2	C3	C	19	58,4002
T2	C3	C	20	3,24544
T2	C3	C	22	3,24544
T2	C3	C	24	6,49087
T2	C4	C	9	137,931
T2	C4	C	10	137,931
T2	C4	C	11	137,931
T2	C4	C	12	137,931
T2	C4	C	13	137,931
T2	C4	C	14	137,931
T2	C4	C	15	137,931
T2	C4	C	16	137,931
T2	C4	C	17	137,931
T2	C4	C	18	86,0217
T2	C4	C	19	137,931
T2	C4	C	20	137,931
T2	C4	C	21	135,948
T2	C4	C	22	137,931
T2	C4	C	23	137,931
T2	C4	C	24	137,931
T3	C6	B	10	49,6726
T3	C6	B	11	137,931
T3	C6	B	13	85,6225
T3	C6	B	14	2,85288
T3	C6	B	18	4,55779
T3	C6	B	19	45,3512
T3	C6	B	24	6,49087
T3	C7	C	9	137,931
T3	C7	C	10	137,931
T3	C7	C	11	137,931
T3	C7	C	12	137,931
T3	C7	C	13	137,931
T3	C7	C	14	137,931
T3	C7	C	15	137,931
T3	C7	C	16	137,931
T3	C7	C	17	137,931
T3	C7	C	18	137,931
T3	C7	C	19	137,931
T3	C7	C	20	137,931
T3	C7	C	21	137,931
T3	C7	C	22	137,931
T3	C7	C	23	137,931
T3	C7	C	24	137,931
T3	C9	B	11	53,8873
T3	C9	B	12	21,3435
T3	C9	B	14	0,06927
T3	C9	B	17	122,801
T3	C9	B	23	3,24544
T3	C9	C	12	116,588
T3	C9	C	18	9,84855
T3	C9	C	21	14,5337
T4	C8	B	9	137,931
T4	C8	B	10	137,931
T4	C8	B	11	137,931
T4	C8	B	12	137,931
T4	C8	B	13	36,1831
T4	C8	B	15	137,931
T4	C8	B	16	137,931
T4	C8	B	18	137,931
T4	C8	B	19	137,931
T4	C8	B	20	137,931
T4	C8	B	21	137,931
T4	C8	B	22	25,8434
T4	C8	B	24	119,555
T4	C8	C	14	86,4874
T4	C8	C	17	9,50035
T4	C8	C	22	2,88624
T4	C8	C	24	15,1302
T4	C8	E	13	101,748
T4	C8	E	14	51,4436
T4	C8	E	17	128,431
T4	C8	E	22	109,201
T4	C8	E	23	137,931
T4	C8	E	24	3,24544

DE À MOD PÉR FLUX

DE À MOD PÉR FLUX

POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON
B2	A	9	14,7	B5	F	3	295,4	AS1	F	20	305,2
B2	A	11	193,9	B5	F	10	262,3	AS1	F	21	152,0
B2	A	13	275,9	B5	F	11	782,3	AS2	C	4	84,3
B2	A	15	51,4	B5	F	12	471,2	AS2	C	5	306,4
B2	A	16	245,2	B5	F	14	500,0	AS2	C	6	153,2
B2	A	17	74,4	B5	F	15	500,0	AS2	C	8	168,2
B2	A	22	49,4	B5	F	19	305,8	AS2	C	9	144,3
B2	B	7	387,8	B6	B	7	442,5	AS2	C	10	159,4
B2	B	8	229,8	B6	B	8	136,4	AS2	C	11	153,2
B2	B	9	102,9	B6	B	9	136,4	AS2	C	13	51,3
B2	B	10	77,9	B6	B	10	337,6	AS2	C	14	219,6
B2	B	11	77,9	B6	B	11	142,1	AS2	C	15	66,4
B2	B	12	137,9	B6	B	12	142,1	AS2	C	16	234,6
B2	B	19	21,2	B6	B	13	142,1	AS2	C	17	249,7
B2	C	4	112,2	B6	B	14	260,7	AS2	C	18	111,5
B2	C	6	193,9	B6	B	17	413,0	AS2	C	22	98,2
B2	C	10	208,6	B6	B	18	106,9	AS2	D	4	84,0
B2	C	11	151,1	B6	B	19	29,1	AS2	D	5	60,2
B2	C	12	90,7	B6	B	21	122,8	AS2	D	6	99,7
B2	C	14	163,6	B6	C	4	184,8	AS2	D	7	66,1
B2	C	17	314,8	B6	C	5	378,7	AS2	D	8	9,1
B2	C	18	8,7	B6	C	6	353,6	AS2	D	15	131,4
B2	C	20	235,7	B6	C	7	47,5	AS2	D	18	153,2
B2	F	2	127,6	B6	C	8	547,5	AS2	D	20	141,6
B2	F	12	82,0	B6	C	9	241,4	AS2	F	2	321,4
B2	F	18	268,3	B6	C	10	192,5	AS2	F	3	336,5
B2	F	19	268,3	B6	C	11	407,7	AS2	F	4	183,3
B2	F	20	226,5	B6	C	12	101,6	AS2	F	7	201,8
B2	F	21	226,5	B6	C	14	75,2	AS2	F	8	44,5
B2	F	22	179,6	B6	C	15	407,0	AS2	F	11	21,2
B3	A	13	36,0	B6	C	16	219,1	AS2	F	12	189,5
B3	A	16	9,7	B6	C	18	269,5	AS2	F	13	153,2
B3	A	17	9,7	B6	C	19	235,0	AS2	F	15	36,8
B3	B	10	91,0	B6	C	20	235,0	AS2	F	19	279,8
B3	C	3	273,8	B6	C	22	82,0	AS2	F	21	83,1
B3	C	5	342,1	B6	E	9	281,6	AT1	B	5	285,7
B3	C	10	195,7	B6	E	10	132,0	AT1	B	6	3,4
B3	C	20	97,2	B6	F	2	87,1	AT1	B	7	147,9
B3	D	5	90,6	B6	F	3	87,1	AT1	B	8	433,6
B3	D	6	57,1	B6	F	4	87,1	AT1	B	9	292,4
B3	D	12	111,0	B6	F	5	87,1	AT1	B	10	156,0
B3	E	10	213,4	B6	F	7	57,5	AT1	B	14	132,9
B3	E	14	128,4	B6	F	8	57,5	AT1	B	15	65,4
B3	E	19	124,8	B6	F	12	193,9	AT1	B	17	137,8
B3	F	7	402,1	B6	F	13	183,3	AT1	B	19	159,7
B3	F	8	717,3	B6	F	14	183,3	AT1	B	20	29,1
B3	F	13	157,9	B6	F	16	75,6	AT1	C	2	272,9
B3	F	14	157,9	B6	F	17	75,6	AT1	C	3	417,4
B3	F	15	238,2	AS1	C	2	248,4	AT1	C	4	617,5
B3	F	16	238,2	AS1	C	3	109,3	AT1	C	5	476,3
B4	A	5	43,3	AS1	C	4	29,1	AT1	C	6	476,3
B4	A	6	43,3	AS1	C	5	29,1	AT1	C	7	476,3
B4	A	10	134,5	AS1	C	7	101,5	AT1	C	8	335,1
B4	A	13	64,9	AS1	C	8	153,2	AT1	C	9	193,9
B4	A	14	64,9	AS1	C	10	117,9	AT1	C	10	343,5
B4	A	21	24,7	AS1	C	11	270,9	AT1	C	11	502,8
B4	B	7	141,2	AS1	C	12	592,3	AT1	C	12	502,8
B4	B	14	65,4	AS1	C	13	622,7	AT1	C	13	271,9
B4	B	20	2,4	AS1	C	14	460,4	AT1	C	14	152,1
B4	C	3	8,5	AS1	C	15	291,9	AT1	C	15	222,9
B4	C	5	64,7	AS1	C	16	267,2	AT1	C	16	134,5
B4	C	7	358,8	AS1	C	17	347,3	AT1	C	18	141,2
B4	C	11	157,2	AS1	C	18	194,2	AT1	C	21	146,5
B4	C	12	157,2	AS1	C	19	41,0	AT1	C	22	149,8
B4	C	13	157,2	AS1	C	21	291,0	AT1	E	12	3,4
B4	C	15	275,6	AS1	C	22	153,1	AT1	E	13	237,6
B4	E	18	7,7	AS1	E	11	153,2	AT1	E	14	237,6
B4	F	4	306,1	AS1	E	17	88,1	AT1	E	15	237,6
B4	F	16	95,9	AS1	E	18	250,2	AT1	E	16	109,2
B4	F	17	28,0	AS1	E	19	250,2	AT1	E	17	109,2
B4	F	18	28,0	AS1	E	20	138,0	AT1	E	18	109,2
B5	B	15	49,9	AS1	E	21	15,3	AT1	E	19	109,2
B5	B	17	4,1	AS1	F	2	73,0	AT1	E	20	101,5
B5	B	18	4,1	AS1	F	3	73,0	AT2	A	2	285,7
B5	B	19	0,3	AS1	F	6	44,1	AT2	A	3	158,0
B5	C	2	310,8	AS1	F	7	36,6	AT2	A	4	16,8
B5	C	3	99,3	AS1	F	9	240,8	AT2	A	5	161,3
B5	C	5	193,6	AS1	F	10	137,9	AT2	A	6	161,3
B5	C	12	178,6	AS1	F	14	183,5	AT2	A	7	161,3
B5	C	13	678,6	AS1	F	15	367,0	AT2	A	8	124,4
B5	C	20	174,8	AS1	F	16	213,8	AT2	A	9	127,7
B5	C	21	174,8	AS1	F	17	60,6	AT2	A	10	131,1
B5	D	15	76,2	AS1	F	18	66,7	AT2	A	11	134,5
B5	D	16	76,2	AS1	F	19	388,1	AT2	A	15	141,2

POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON
AT2	A	19	11,5	G1	C	11	1058,4	G3	F	12	1160,1
AT2	A	20	24,7	G1	C	12	1058,4	G3	F	13	1101,9
AT2	A	21	24,7	G1	C	13	1058,4	G3	F	14	862,0
AT2	A	22	24,7	G1	C	14	882,8	G3	F	15	616,4
AT2	B	12	137,8	G1	C	15	913,1	G3	F	16	128,4
AT2	B	13	141,2	G1	C	16	913,1	G3	F	18	81,3
AT2	B	18	151,3	G1	C	17	637,2	G3	F	19	111,5
AT2	B	19	143,2	G1	C	18	636,7	G3	F	22	92,6
AT2	B	21	138,6	G1	C	19	360,8	G3	F	23	30,8
AT2	B	22	107,4	G1	C	20	101,2	G4	B	9	168,2
AT2	C	3	131,1	G1	C	21	101,2	G4	B	10	30,3
AT2	C	4	275,6	G1	C	22	61,0	G4	B	12	36,2
AT2	C	5	134,5	G1	C	23	61,0	G4	B	17	137,9
AT2	C	6	137,8	G1	F	4	127,6	G4	B	19	168,2
AT2	C	7	141,2	G1	F	5	127,6	G4	B	20	108,0
AT2	C	14	137,8	G1	F	6	127,6	G4	B	21	25,8
AT2	C	16	144,5	G1	F	7	127,6	G4	B	23	119,6
AT2	C	17	147,9	G1	F	8	127,6	G4	C	3	306,1
AT2	C	20	133,3	G1	F	11	17,0	G4	C	4	612,2
AT2	C	22	32,6	G1	F	13	25,8	G4	C	5	918,4
BS	C	7	729,4	G1	F	14	107,8	G4	C	6	1224,5
BS	C	8	306,4	G1	F	15	107,8	G4	C	7	1530,6
BS	C	10	321,6	G1	F	16	107,8	G4	C	8	1836,7
BS	C	11	153,2	G1	F	17	107,8	G4	C	9	1560,9
BS	C	13	315,5	G1	F	18	195,7	G4	C	10	1591,1
BS	C	15	357,0	G1	F	19	147,3	G4	C	11	1364,1
BS	C	16	179,0	G1	F	20	147,3	G4	C	12	1088,2
BS	C	18	112,5	G1	F	21	275,9	G4	C	13	1118,5
BS	D	9	52,3	G1	F	23	46,9	G4	C	14	975,8
BS	D	14	111,0	G2	B	14	137,9	G4	C	15	868,1
BS	D	18	153,2	G2	B	17	90,8	G4	C	16	760,5
BS	E	15	128,4	G2	B	20	116,7	G4	C	17	633,8
BS	E	20	138,1	G2	C	3	66,2	G4	C	18	664,0
BS	E	21	15,4	G2	C	4	372,4	G4	C	19	388,2
BS	E	22	0,1	G2	C	5	454,0	G4	C	20	340,7
BS	F	5	435,1	G2	C	6	760,1	G4	C	21	64,8
BS	F	10	291,1	G2	C	7	760,1	G4	C	22	89,3
BS	F	14	180,1	G2	C	8	760,1	G4	E	11	149,6
BS	F	17	693,6	G2	C	9	743,3	G4	E	12	281,6
BS	F	18	387,2	G2	C	10	773,6	G4	E	13	179,9
BS	F	19	627,6	G2	C	11	497,7	G4	E	14	128,4
BS	F	20	238,3	G2	C	12	400,6	G4	E	15	128,4
BT	A	16	84,4	G2	C	13	185,2	G4	E	16	128,4
BT	A	19	3,2	G2	C	15	30,3	G4	E	21	250,4
BT	B	5	246,6	G2	C	16	60,5	G4	E	22	141,2
BT	B	6	141,2	G2	C	18	64,3	G4	E	23	3,2
BT	B	19	358,2	G2	C	19	94,5	G5	B	3	53,9
BT	B	20	84,4	G2	C	21	13,0	G5	B	4	53,9
BT	B	21	132,7	G2	C	22	43,3	G5	B	5	53,9
BT	C	7	282,4	G2	F	13	107,8	G5	B	6	53,9
BT	C	9	435,3	G2	F	14	107,8	G5	B	7	53,9
BT	C	10	618,3	G2	F	15	107,8	G5	B	8	53,9
BT	C	11	350,8	G2	F	16	107,8	G5	B	9	53,9
BT	C	12	350,8	G2	F	17	107,8	G5	B	10	53,9
BT	C	13	119,8	G2	F	18	4,0	G5	B	13	0,1
BT	C	18	179,1	G2	F	19	4,0	G5	B	16	122,8
BT	C	19	29,8	G2	F	20	4,0	G5	C	4	193,9
BT	C	22	75,5	G3	B	10	69,5	G5	C	5	202,9
BT	E	12	51,4	G3	B	13	2,9	G5	C	6	202,9
BT	E	21	141,2	G3	B	17	49,9	G5	C	7	233,2
G1	A	12	47,2	G3	B	18	45,4	G5	C	8	233,2
G1	A	13	51,7	G3	B	20	3,9	G5	C	9	233,2
G1	A	16	30,3	G3	B	21	4,1	G5	C	10	233,2
G1	A	17	60,5	G3	B	22	6,5	G5	C	11	233,2
G1	A	19	78,7	G3	B	23	6,5	G5	C	17	19,7
G1	A	20	109,0	G3	D	4	123,5	G5	C	19	29,1
G1	A	21	10,7	G3	D	5	123,5	G5	C	20	29,1
G1	A	22	81,0	G3	D	6	123,5	G5	F	7	275,9
G1	B	8	112,2	G3	D	7	123,5	G5	F	8	275,9
G1	B	9	270,2	G3	D	8	123,5	G5	F	11	23,0
G1	B	10	348,8	G3	D	9	9,1	G5	F	12	307,8
G1	B	11	235,9	G3	D	12	52,3	G5	F	13	338,0
G1	B	12	188,1	G3	D	16	242,4	G5	F	14	366,4
G1	B	13	188,1	G3	D	17	158,9	G5	F	15	92,5
G1	B	14	137,9	G3	D	23	92,1	G5	F	17	256,2
G1	B	15	137,9	G3	F	3	306,1	G5	F	19	1,2
G1	C	3	306,1	G3	F	4	488,8	G5	F	20	31,5
G1	C	4	484,6	G3	F	5	794,9	G5	F	21	7,7
G1	C	5	790,7	G3	F	6	1101,0	G5	F	22	37,9
G1	C	6	1096,8	G3	F	7	1407,2	S1	F	7	128,8
G1	C	7	1403,0	G3	F	8	1713,3	S1	F	8	128,8
G1	C	8	1596,8	G3	F	9	1743,5	S1	F	9	52,0
G1	C	9	1321,0	G3	F	10	1496,2	S1	F	10	144,5
G1	C	10	1045,1	G3	F	11	1458,1	S1	F	11	144,5

POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON	POSTE	MOD	PÉR	TAMPON
S1	F	12	136,0	S4	C	16	284,2	T2	C	6	423,5
S1	F	13	136,0	S4	C	17	161,6	T2	C	7	584,7
S1	F	14	136,0	S4	C	18	176,8	T2	C	8	705,9
S1	F	15	136,0	S4	C	19	192,1	T2	C	9	709,1
S1	F	16	136,0	S4	C	20	207,4	T2	C	10	712,4
S1	F	17	151,0	S4	C	21	110,4	T2	C	11	627,2
S1	F	18	137,9	S4	E	13	51,4	T2	C	12	489,3
S1	F	21	64,4	S4	E	21	112,2	T2	C	13	351,4
S2	C	4	153,2	S4	E	22	125,8	T2	C	14	213,5
S2	C	5	306,4	S4	E	23	3,1	T2	C	15	75,5
S2	C	6	405,7	S4	F	5	73,0	T2	C	16	78,8
S2	C	7	558,9	S4	F	6	226,2	T2	C	18	55,2
S2	C	8	712,1	S4	F	7	226,2	T2	C	23	3,2
S2	C	9	589,4	S4	F	8	226,2	T3	B	7	141,2
S2	C	10	466,7	S4	F	9	88,3	T3	B	8	282,4
S2	C	11	482,0	S5	C	9	116,6	T3	B	9	282,4
S2	C	12	460,1	S5	C	10	116,6	T3	B	10	232,7
S2	C	13	475,3	S5	C	11	116,6	T3	B	11	45,9
S2	C	14	402,8	S5	C	15	9,1	T3	B	12	39,3
S2	C	15	418,1	S5	C	16	24,4	T3	B	13	94,9
S2	C	16	433,3	S5	C	17	24,4	T3	B	14	92,0
S2	C	17	310,7	S5	C	18	14,5	T3	B	15	113,3
S2	C	18	342,7	S5	C	19	14,5	T3	B	16	113,3
S2	C	19	220,0	S5	C	20	14,5	T3	B	17	43,2
S2	C	20	105,4	S5	F	7	153,2	T3	B	18	45,4
S2	C	21	122,7	S5	F	8	227,4	T3	B	22	3,2
S2	C	23	15,3	S5	F	9	126,1	T3	C	4	141,2
S2	F	6	53,9	S5	F	10	88,8	T3	C	5	223,8
S2	F	7	53,9	S5	F	11	137,9	T3	C	6	365,0
S2	F	8	53,9	S5	F	12	137,9	T3	C	7	365,0
S2	F	9	53,9	S5	F	17	138,1	T3	C	8	365,0
S2	F	10	53,9	S5	F	18	163,2	T3	C	9	368,2
S2	F	11	53,9	S5	F	19	178,4	T3	C	10	371,5
S2	F	12	53,9	S5	F	20	40,5	T3	C	11	369,7
S2	F	13	53,9	S5	F	22	15,3	T3	C	12	241,6
S2	F	14	53,9	S5	F	23	32,6	T3	C	13	103,6
S2	F	15	53,9	T1	A	4	141,2	T3	C	14	106,9
S2	F	16	53,9	T1	A	5	282,4	T3	C	15	88,8
S2	F	17	53,9	T1	A	6	423,5	T3	C	16	92,0
S2	F	18	2,0	T1	A	7	423,5	T3	C	17	42,6
S2	F	19	2,0	T1	A	8	423,5	T3	C	18	29,3
S2	F	20	2,0	T1	A	9	466,8	T3	C	19	32,5
S3	D	6	23,8	T1	A	10	377,2	T3	C	20	35,8
S3	D	7	23,8	T1	A	11	380,5	T3	C	23	3,2
S3	D	8	57,3	T1	A	12	251,0	T4	B	7	141,2
S3	D	11	52,3	T1	A	13	247,5	T4	B	8	141,2
S3	D	12	52,3	T1	A	14	250,8	T4	B	9	3,2
S3	D	16	111,0	T1	A	15	254,0	T4	B	10	6,5
S3	D	17	158,9	T1	A	16	152,1	T4	B	12	3,2
S3	D	20	15,3	T1	A	17	155,3	T4	B	13	6,5
S3	D	21	15,3	T1	A	18	180,8	T4	B	14	6,5
S3	D	22	92,1	T1	A	19	315,3	T4	B	17	12,7
S3	D	23	92,1	T1	A	20	183,8	T4	B	18	16,0
S3	F	4	153,2	T1	A	21	137,9	T4	B	19	19,2
S3	F	5	306,4	T1	A	22	137,9	T4	B	20	7,3
S3	F	6	435,8	T1	B	9	97,9	T4	C	5	3,0
S3	F	7	589,0	T1	B	10	49,6	T4	C	6	3,0
S3	F	8	708,6	T1	B	13	6,7	T4	C	7	3,0
S3	F	9	781,2	T1	B	14	6,7	T4	C	8	3,0
S3	F	10	796,5	T1	B	15	6,7	T4	C	9	3,0
S3	F	11	759,4	T1	B	15	111,9	T4	C	10	3,0
S3	F	12	774,7	T1	B	17	111,9	T4	C	11	3,0
S3	F	13	790,0	T1	C	7	141,2	T4	C	12	3,0
S3	F	14	670,1	T1	C	8	282,4	T4	C	13	3,0
S3	F	15	547,5	T1	C	9	144,4	T4	C	14	6,3
S3	F	16	313,8	T1	C	10	147,7	T4	C	15	6,3
S3	F	17	143,2	T1	C	11	147,7	T4	C	16	9,5
S3	F	18	184,0	T1	C	12	251,7	T4	C	21	2,9
S3	F	19	199,3	T1	C	13	251,7	T4	E	21	7,7
S3	F	20	61,3	T1	C	14	163,9	T4	E	23	3,2
S3	F	21	61,6	T1	C	15	163,9				
S3	F	23	15,3	T1	C	16	163,9				
S4	C	4	153,2	T1	C	17	108,0				
S4	C	5	233,4	T1	C	18	72,8				
S4	C	6	233,4	T1	C	22	6,5				
S4	C	7	386,6	T1	C	23	15,0				
S4	C	8	539,8	T2	B	12	40,4				
S4	C	9	555,0	T2	B	13	43,7				
S4	C	10	570,3	T2	B	14	134,7				
S4	C	11	585,5	T2	B	15	137,9				
S4	C	12	462,9	T2	B	21	5,2				
S4	C	13	324,9	T2	B	22	5,2				
S4	C	14	253,7	T2	C	4	141,2				
S4	C	15	269,0	T2	C	5	282,4				

ANNEXE F

MODÈLE DE SIMULATION

Réseau

Énoncé de contrôle

MODÈLE DE SIMULATION PAR ÉVÉNEMENTS DISCRETS

Cet annexe présente comment le modèle de simulation par événements discrets a été construit.

Introduction

Le modèle de simulation a été développé à l'aide du langage *Visual Slam*. L'entrée de données se fait à partir de l'interface graphique *AweSim!* version 3.0. Il s'agit d'un outil de simulation par événements discrets fonctionnant sur plate-forme Windows et qui permet de simuler et d'analyser des systèmes de production (Pritsker *et al* 1997,1999).

Le modèle de simulation est bâti en deux parties, c'est-à-dire avec deux fichiers distincts. Le premier fichier représente le réseau de simulation. Le second fichier est un énoncé de contrôle qui définit les constantes et les variables utilisées par le modèle, et qui établit l'état initial du modèle. Le réseau est formé de symboles, appelés *noeuds* et *branches*. Ces symboles modélisent les éléments d'un procédé, comme les files d'attente, les serveurs et les points de décision. Les symboles sont combinés pour former un réseau qui représente le système à étudier. Les entités du système – comme des gens ou des items – passent à travers le modèle réseau. Lorsque la simulation est exécutée, le temps est avancé en accord avec le déplacement des entités à travers les noeuds et les branches du réseau.

Le réseau est divisé en quatre sections principales, soit l'initialisation, l'assignation de la gamme de fabrication, la production et l'assemblage des composantes, et enfin l'assemblage des produits finaux. Le fonctionnement de ces sections de réseau ainsi que les hypothèses posées lors de la conception de chacune sont exposés dans ce qui suit.

Initialisation

On cherche à reproduire les patrons de flux et de charge générés par le modèle agrégé. Ce plan de production est présenté sous forme de réseaux manufacturiers virtuels (VMN) à la fin du chapitre 3. Pour ce faire, un tableau est utilisé dans *AweSim* pour contenir les données relatives aux patrons de flux et de charge. Les quantités y sont détaillées pour chaque produit, chaque processeur et chaque tronçon entre deux processeurs. Cela donne un tableau composé de 84 lignes et de 25 colonnes. Pour pouvoir s'adapter facilement à différents patrons de charge et de flux, les données sont lues à partir d'un fichier externe et transcrites dans le tableau dans *AweSim*. La portion du réseau de simulation où s'effectue la lecture et l'écriture des données est présentée à la figure 1.

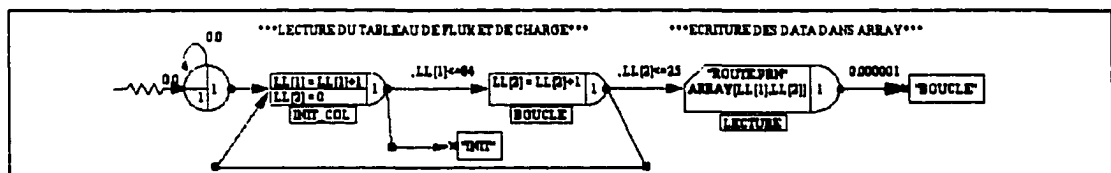


Figure 1 Lecture du tableau de flux et de charge

Une seule entité est créée au tout début de la simulation, soit au moment zéro (0.0 s). Elle passe dans le nœud *INIT_COL* où la valeur des compteurs de lignes et de colonnes du tableau sont modifiés ; leur valeur est initialement nulle.

Le compteur de lignes $LL[1]$ est augmenté de un tandis que celui des colonnes, $LL[2]$, est remis à zéro. Si $LL[1]$ n'a pas dépassé 84, correspondant à la dernière ligne du tableau, l'entité passe dans le nœud *BOUCLE* où le compteur $LL[2]$ est augmenté de un. Ensuite, si $LL[2]$ n'a pas dépassé 25, correspondant à la dernière colonne du tableau, l'entité passe dans le nœud *LECTURE* où la première donnée du fichier est lue et transcrite dans le tableau, à la case $[i,j]$, où $i = LL[1]$ et $j = LL[2]$. Après un infime délai de 0.000001 s, l'entité revient au nœud *BOUCLE* pour passer à la deuxième colonne du tableau. Le petit délai est nécessaire car sans lui, le programme considère qu'il exécute une boucle infinie. Quand les 25 données de la première ligne ont été lues, $LL[2]$ vaut alors 26 et la condition pour envoyer l'entité au nœud *LECTURE* n'est plus rencontrée. L'entité revient donc au nœud *INIT_COL* où le compteur $LL[1]$ est augmenté à deux et $LL[2]$ est remis à zéro. Le processus recommence alors au début de la seconde ligne du tableau, et ainsi de suite jusqu'à ce que les 84 lignes aient toutes été lues. Après quoi l'entité est envoyée au nœud *INIT* où elle est clonée jusqu'à un maximum de sept entités afin d'initialiser la demande pour les sept produits, comme l'indique la figure 2.

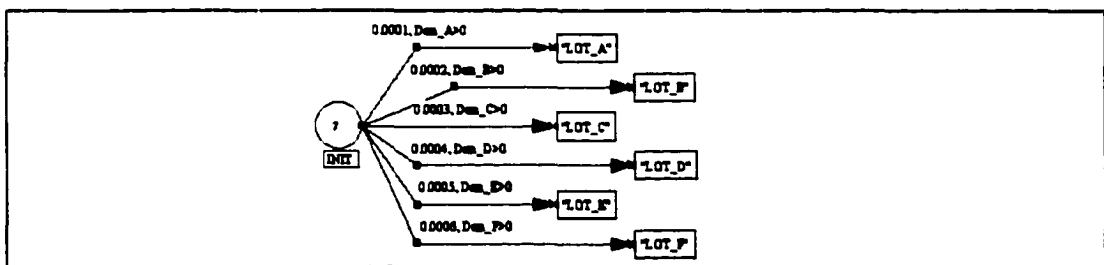


Figure 2 Initialisation de la demande pour les six produits

La demande pour chaque produit est ensuite divisée en lots. La figure 3 présente cette division en lots pour le produit A. La taille des lots est représenté par la variable *LOT*, ce qui permet d'en modifier la valeur et de tester plusieurs

scénarios avec différentes tailles de lots. La valeur de cette variable est initialisée dans l'énoncé de contrôle. La quantité de lots à fabriquer est calculée en divisant la demande par la taille des lots et en arrondissant cette valeur à l'entier supérieur. Autant d'entités qu'il y a de lots à fabriquer sont envoyées dans le système. Comme on le verra plus loin, l'option de produire par lots permet de diminuer le temps d'exécution sans nuire à la précision.

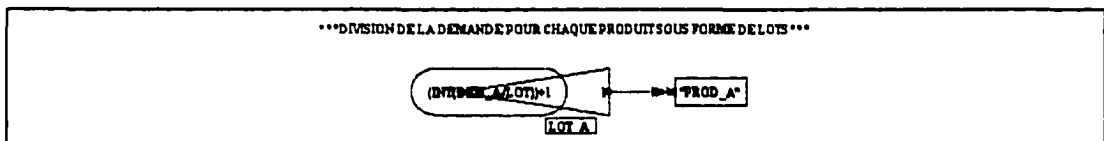


Figure 3 Division de la demande en lots

Les lots à produire se retrouvent ensuite dans une file d'attente – *PROD_A* pour le produit A – qu'ils quittent un à un pour se faire assigner des attributs de fabrication selon le type de produit dont il s'agit. La figure 4 présente l'assignation des attributs pour le produit A.

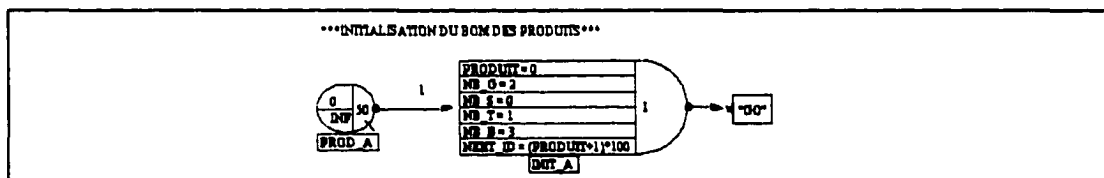


Figure 4 Assignation des attributs de fabrication

Un léger délai de 1 s est provoqué entre l'assignation des attributs de chaque entité. Ce délai a pour but de s'assurer que les produits ne soient pas traités de façon séquentielle, c'est-à-dire tous les produits A d'abord, suivis des produits B et les produits F en dernier, mais plutôt de façon cyclique, c'est-à-dire un lot de produits A, puis un lot de B, et ainsi de suite jusqu'à F, après quoi on recommence avec un lot de A. Le type de produit est représenté par l'attribut

PRODUIT. Pour le produit A, par exemple, il vaut zéro et il vaut cinq pour le produit F. Le nombre de composantes requises pour la fabrication de chaque produit est représenté par les attributs *NB_G*, *NB_S*, *NB_T*, et *NB_B* respectivement pour les composantes G, S, T et B. La figure 4 montre la définition de la nomenclature de produits pour le modèle A, qui comporte deux composantes de type G, une de type T et trois de type B. L'attribut *NEXT_ID* sera utilisé plus loin pour permettre d'assembler deux composantes du même produit étant toutes deux assignées au même poste d'assemblage. Suite à la définition de la nomenclature de produits, tous les lots sont envoyés dans une même file d'attente, au nœud *GO*, afin que soit explosée la nomenclature de produits en composantes de base. La figure 5 présente l'explosion de la nomenclature.

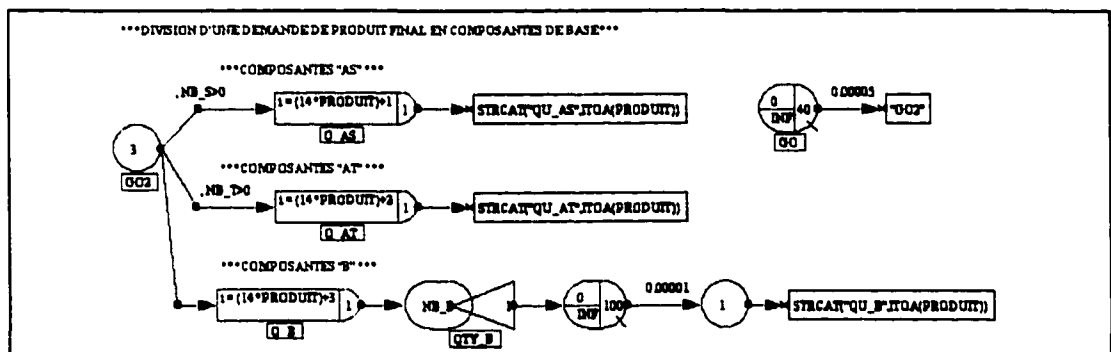


Figure 5 Explosion de la nomenclature de produits en composantes

Les entités quittent la file d'attente *GO* à tour de rôle, pour se retrouver au nœud *GO2*, où elles sont clonées afin que la demande de produits finaux soit divisée en composantes de base *AS*, *AT* et *B*. Si un produit requiert une composante *S*, donc si la valeur de l'attribut *NB_S* est supérieure à zéro, un clone est créé. Cette nouvelle entité emprunte la branche du haut pour aller au nœud *QU_AS*, où son attribut *i* prend une certaine valeur selon le type de

produit dont il s'agit. L'attribut *i* représente la ligne du tableau de données où est mémorisée la quantité de pièces à fabriquer aux postes AS1 et AS2 pour le produit en question. Le processus est le même pour les composantes AT et B. Comme un produit peut demander entre deux et quatre bobines dans sa fabrication, l'entité représentant la demande de composantes B est clonée d'après la quantité indiquée par l'attribut *NB_B* qui a été défini plus haut.

Chaque entité est par la suite acheminée vers la section d'assignation du réseau, d'après le type de composante et le type de produit que l'entité représente. Les composantes AS sont envoyées vers les nœuds *QU_AS0* à *QU_AS5* respectivement pour les produits A à F. Les composantes AS sont envoyées vers les nœuds *QU_AT0* à *QU_AT5* et les composantes B sont envoyées vers les nœuds *QU_B0* à *QU_B5*. Le nœud où est envoyé une entité est spécifié à l'aide d'une fonction de concaténation qui permet d'assembler des expressions. Par exemple, pour une composante B de produit A, la concaténation assemble *QU_B* à la valeur zéro (0) – mémorisée par l'attribut *PRODUIT* – ce qui donne l'expression *QU_B0*.

Assignation de la gamme de fabrication

Comme il l'a été mentionné au début du chapitre, on désire reproduire le plan de production généré par le modèle de planification agrégée. Pour ce faire, chaque demande pour une composante se voit assigner un plan de production bien précis concernant les postes où elle sera traitée, d'après les patrons de flux et de charge spécifiés précédemment. Ainsi, dès son arrivée à la section production et assemblage, chaque composante connaîtra le chemin qu'elle doit suivre.

Pour chaque type de poste, on a bâti quatre ou six petits réseaux d'assignation. En effet, chaque type de poste traite soit quatre ou six produits différents. Par exemple, seuls les quatre produits C, D, E et F requièrent une composante AS tandis que tous les produits requièrent des bobines. Alors quatre réseaux sont bâtis pour l'assignation aux postes AS et six réseaux pour l'assignation aux postes B.

Chaque demande de lot est envoyée au réseau correspondant à son type de produit. Afin de reproduire les résultats du modèle agrégé, représentés par les VMN, on a recours à une assignation cyclique, basée sur l'importance de la charge de chaque produit sur un poste.

Si on regarde le VMN pour le produit F, représenté à la figure 6, on remarque que 1352 composantes AS sont assignées au poste AS1 et 4072 sont assignées à AS2. C'est donc dire que près des trois quarts vont à AS2. Pour reproduire cette répartition de charge aux postes AS pour le produit F, le réseau d'assignation assigne trois entités sur quatre à AS2 et une sur quatre à AS1. L'assignation des composantes AS du produit F aux postes de fabrication AS1 et AS2 est présentée à la figure 7. Cette assignation est faite de façon cyclique, dans l'ordre AS2, AS1, AS2, AS2. Puis le cycle recommence.

Après qu'une entité ait été assignée à un poste, la valeur du tableau de données correspondant à la production assignée à ce poste est diminuée de la taille d'un lot, comme le démontre la figure 8. Des entités sont assignées à un poste tant que la valeur dans le tableau est supérieure à zéro. Après son assignation à un poste AS, une entité est acheminée vers la section d'assignation des flux entre les postes AS et S. La figure 9 montre l'assignation du flux AS vers S pour le produit F. Une entité arrive au nœud QU_ASS5 d'où elle emprunte la branche du haut si elle a été assignée au poste AS2 et la

branche du bas si elle a été assignée à AS1. La logique d'assignation a été expliquée pour les postes AS et la même logique est utilisée pour tous les types de postes.

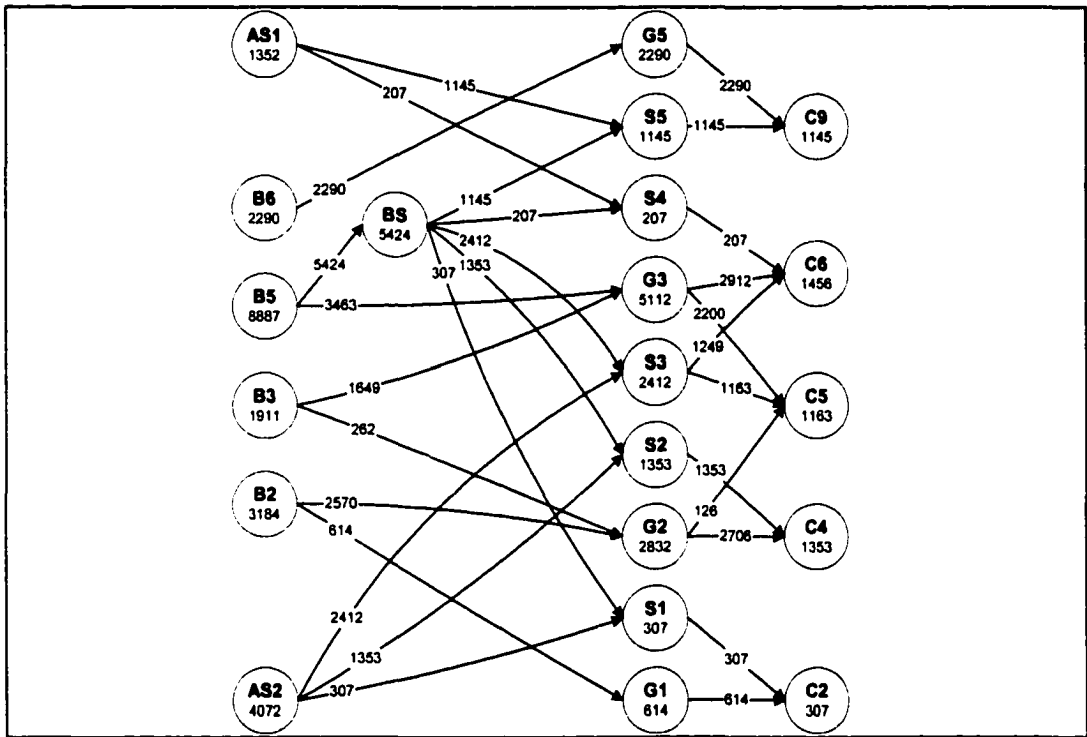


Figure 6 VMN pour le produit F

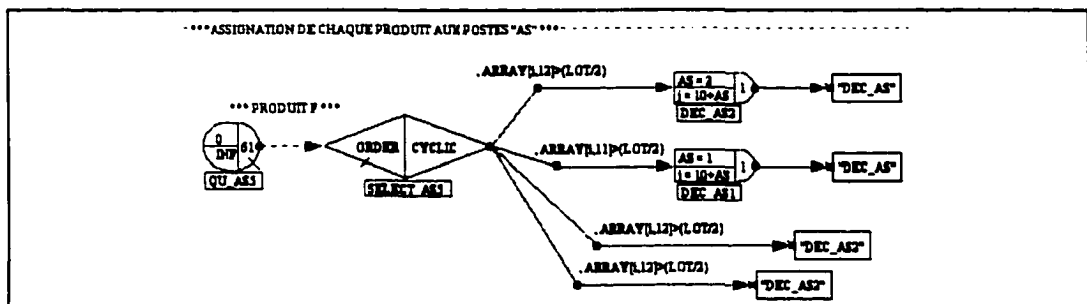


Figure 7 Assignation de la charge aux postes AS pour le produit F

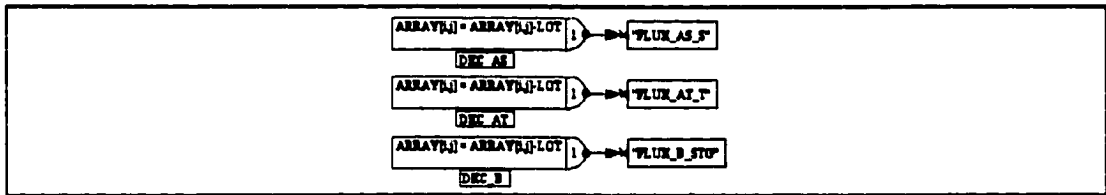


Figure 8 Diminution des valeurs dans le tableau de données

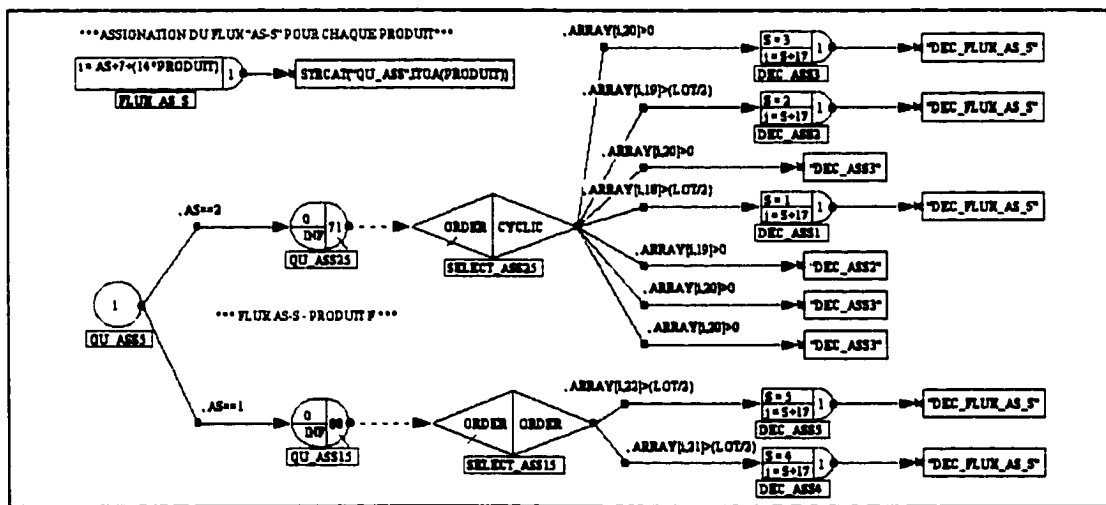


Figure 9 Assignment du flux entre les postes AS et S pour le produit F

Lorsqu'une entité a passé à travers tous les réseaux d'assignation requis, elle est acheminée vers la section de fabrication et d'assemblage, à la file d'attente correspondant au type de composante que l'entité représente.

Fabrication et assemblage des composantes

Chaque ressource – ici un processeur de fabrication ou d'assemblage – doit être déclarée dans le logiciel de simulation. La figure 10 montre la définition des blocs-ressources. Un bloc-ressource est défini par son numéro, son nom, la

quantité de cette ressource disponible et le numéro de la file où demeurent les entités en attente d'être traitées par la ressource.

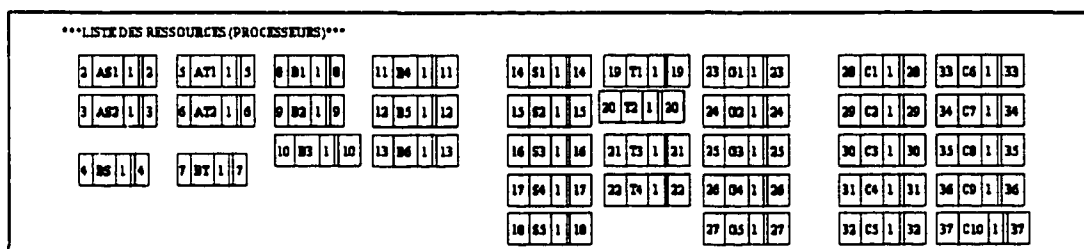


Figure 10 Définition des blocs-ressources

La production débute aux postes du premier niveau, par la fabrication des composants de base AS, AT et B. Les entités – symbolisant des lots – en attente de fabrication demeurent dans la file devant la ressource représentant le poste où elles sont assignées. Une ressource traite les entités une à la fois et l'ordre de traitement est celui du premier arrivé, premier servi. La figure 11 présente le réseau de simulation désignant le procédé de fabrication aux postes du premier niveau.

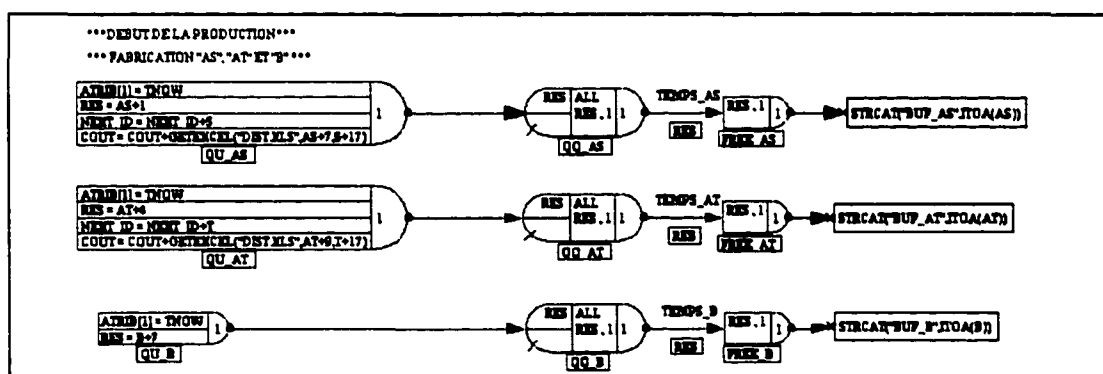


Figure 11 Procédé de fabrication aux postes du premier niveau

Prenons le cas de la fabrication des lots de composantes AS. Les entités arrivent d'abord au nœud *QU_AS* où l'on modifie la valeur de certains de leurs attributs. Le moment d'arrivée d'une entité dans le système est mémorisé dans le premier attribut, *ATRIB[1]*. Cela servira à la fin pour calculer le temps que les produits ont passé dans le système. Le numéro de la ressource où sera fabriqué le lot de composantes AS est mémorisé dans l'attribut *RES*. L'attribut *NEXT_ID* sera utilisé plus loin pour permettre d'assembler deux composantes du même produit étant toutes deux assignées au même poste d'assemblage. Puis un attribut *COUT* est utilisé pour calculer le coût de circulation d'un produit à travers tout le procédé. La valeur de l'attribut est augmentée du coût afférent au transfert d'une pièce d'un poste AS à un poste S.

Les entités se retrouvent ensuite au nœud *QQ_AS*. Ce nœud est une file d'attente pour une ressource. Les entités dans cette file attendent que la ressource dont le numéro est mémorisé dans leur attribut *RES* se libère. Les processeurs AS1 et AS2 correspondent respectivement aux ressources de numéros 2 et 3, comme l'indique la figure 10. L'entité en tête de la file accapare la ressource. Le temps requis pour sa fabrication est mémorisé dans une variable globale *TEMPS_AS*. Quand le temps de traitement est écoulé, l'entité qui accapare la ressource passe au nœud *FREE_AS*, ce qui libère la ressource et permet à l'entité suivante de l'accaparer à son tour.

Quand une entité a été traitée à un poste de fabrication, elle est acheminée vers un tampon, tout juste en aval du poste où elle a été fabriquée. Il existe donc autant de tampons qu'il y a de processeurs et les tampons sont tous en aval de leur processeur respectif. Les entités demeurent dans le tampon jusqu'à ce que leur tour arrive et que le poste suivant soit libéré. La figure 12 montre les tampons pour les six processeurs de type B.

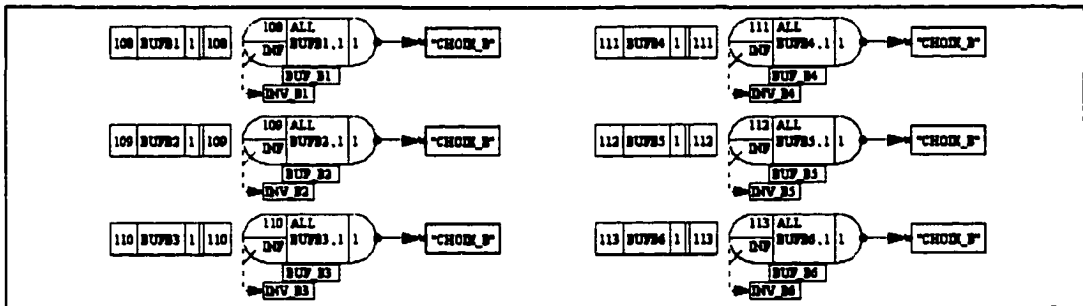


Figure 12 Tampons pour les processeurs de type B

Les tampons en aval des postes de type B portent les noms *BUF_B1* à *BUF_B6* et ils sont numérotés de 108 à 113. Dans le cas présent, la capacité des tampons est illimitée, d'où l'inscription *INF* dans les nœuds. Mais il a été prévu qu'on puisse limiter la taille des tampons en inscrivant une capacité maximale au lieu de la valeur *INF*. Advenant le cas, si un tampon se retrouvait rempli à capacité, les pièces supplémentaires seraient acheminées vers un espace dédié dans l'entrepôt centralisé, soit vers *INV_B1* à *INV_B6*. Tous les processeurs de fabrication et d'assemblage possèdent leur espace tampon ainsi qu'un espace dédié dans l'entrepôt centralisé au cas où le tampon était rempli.

Les composantes de type B peuvent servir à fabriquer soit des composantes BS, BT ou G. Le type de composante dont elle entre dans la fabrication a déjà été attribué à chaque entité B lors de l'étape d'assignation. Alors les entités B sont envoyées au nœud *CHOIX_B*, comme le présente la figure 13, d'où elles empruntent une des trois branches, selon qu'elles sont assignées à la fabrication de composantes BS, BT ou G. Dans ce réseau, la modification des attributs, l'attente en file et le traitement par les processeurs sont effectués comme il l'a été expliqué plus haut pour les composantes AS, à la figure 11.

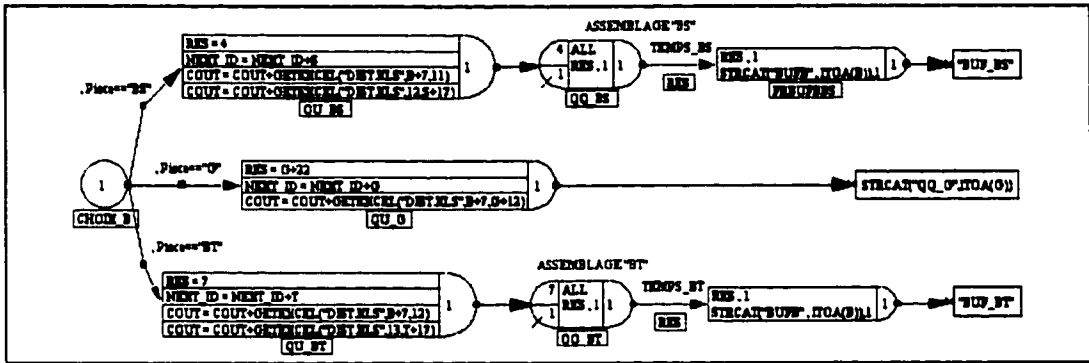


Figure 13 Expédition de pièces B pour la fabrication de BS, BT ou G

Les composantes AS et BS doivent ensuite être assemblées afin de former des composantes S. Pour ce faire, les composantes sont jumelées par couple, en sélectionnant deux entités qui, d'une part, sont de même produit et qui, d'autre part, ont été assignées à un même poste S. La figure 14 expose le réseau utilisé pour le jumelage de composantes AS et BS ainsi que la fabrication d'une composante S.

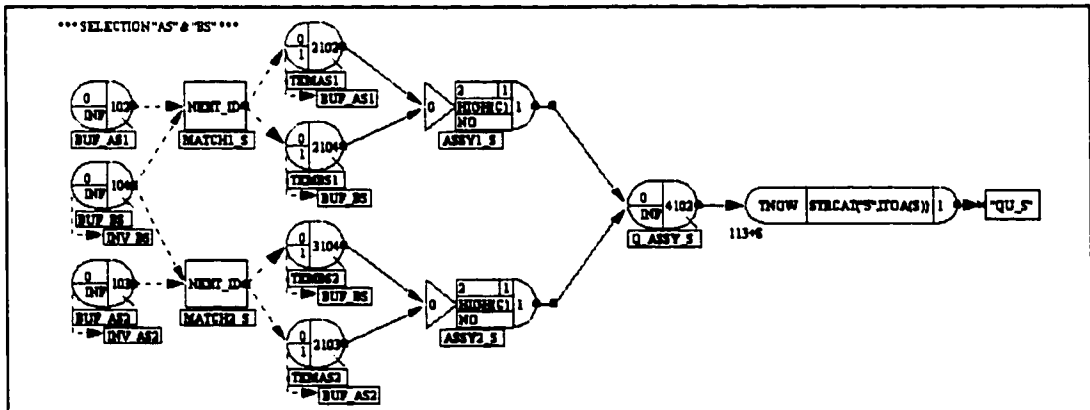


Figure 14 Jumelage AS-BS et fabrication d'une composante S

Pour effectuer le jumelage, l'attribut d'identification *NEXT_ID* est utilisé pour représenter les deux conditions citées plus haut. Les composantes AS

attendent dans les tampons *BUF_AS1* et *BUF_AS2* tandis que les composantes BS attendent dans le tampon *BUF_BS*. Par exemple, lorsqu'une entité fabriquée au poste AS1 possède un attribut d'identification identique à celui d'une entité BS, les deux entités sont jumelées en passant du nœud *MATCH1_S* au nœud *ASSY1_S*. Elles sont ensuite envoyées au nœud *QU_S*. Le procédé est identique pour l'assemblage des composantes AT et BT. La figure 15 présente un réseau qui est requis dans le modèle de simulation pour transférer un seul couple à la fois du tampon *QU_S* à un poste d'assemblage de type S.

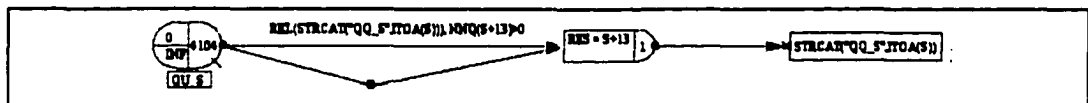


Figure 15 Transfert d'un couple de composantes vers un poste S

Dans le réseau de la figure 15, les couples de composantes AS et BS attendent dans la file, au nœud *QU_S*. Si la file d'attente pour la ressource de type S où le couple a été assigné est vide, le couple est envoyé directement dans cette file. Si par contre la file n'est pas vide, le couple n'y est envoyé que lorsque le couple qui le précède quitte la file. Ainsi, il ne peut y avoir qu'un seul couple à la fois dans la file d'attente pour la ressource. Les autres couples demeurent dans le tampon. Cette précaution est requise pour ne pas fausser les mesures de performance concernant les tampons. On veut effectivement que les pièces attendent dans le tampon en aval du processeur qui vient de les traiter et non dans la file d'attente devant la ressource qui va les traiter. La figure 16 démontre le réseau employé pour la fabrication des composantes de type S.

Dans la figure 16, un couple de composantes attend d'être traité par une ressource, soit un des processeurs S1 à S5. Le réseau pour le traitement par

ces processeurs fonctionnent de la même façon que celui décrit plus haut pour la fabrication des composants AS. Lorsqu'une composante de type S a été traitée à un poste S, elle se retrouve dans le tampon en aval du poste de fabrication, soit dans un des tampons *BUF_S1* à *BUF_S5*.

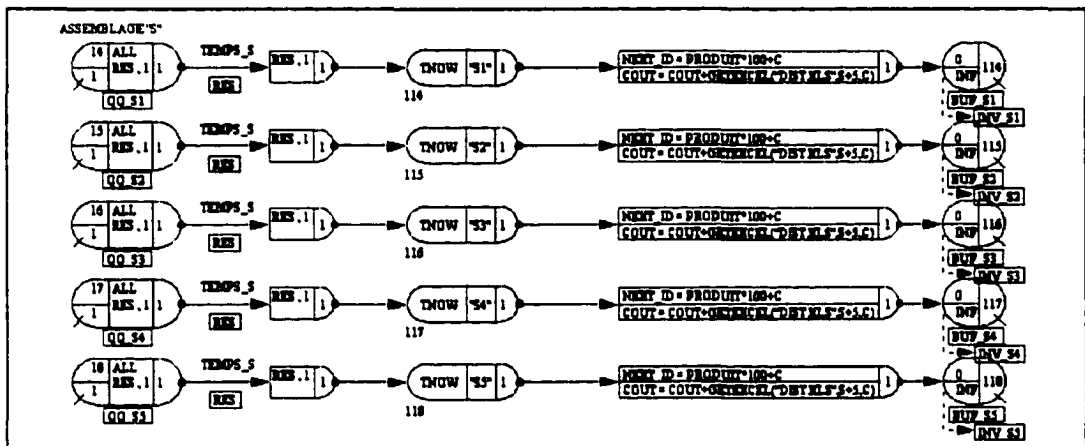


Figure 16 Procédé de fabrication aux postes de type S

Le procédé de fabrication est le même pour les composants G et T. Après ces opérations, les composants de type G, S et T demeurent dans leur tampon respectif, en attente pour l'assemblage final.

Assemblage des produits finaux

Les postes d'assemblage final, les postes C1 à C10, ont un horaire de travail sur seize heures seulement. Ils débutent donc leur production huit heures après tous les autres. La figure 17 présente le réseau qui permet de faire débuter l'assemblage aux postes C. Le nœud *APRES_8H* crée une entité 28800 secondes après le début de la simulation, ce qui correspond à 8h.

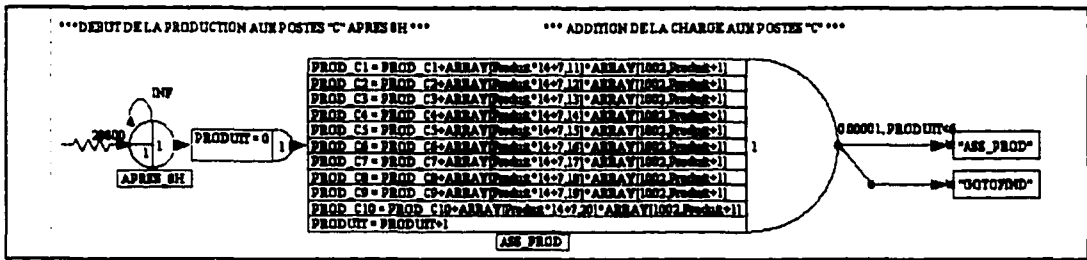


Figure 17 Début de la production aux postes C après 8 heures

L'entité va ensuite au nœud *ASS_PROD* où la charge, soit la production, assignée à chaque poste C est calculée et mémorisée dans des variables globales. Lorsque la charge a été additionnée pour les six produits, l'entité est acheminée vers le nœud *GOTOFIND*. De ce nœud, l'entité est divisée en dix clones, lesquels sont employés pour activer les dix postes de type C, comme l'indique la figure 18.

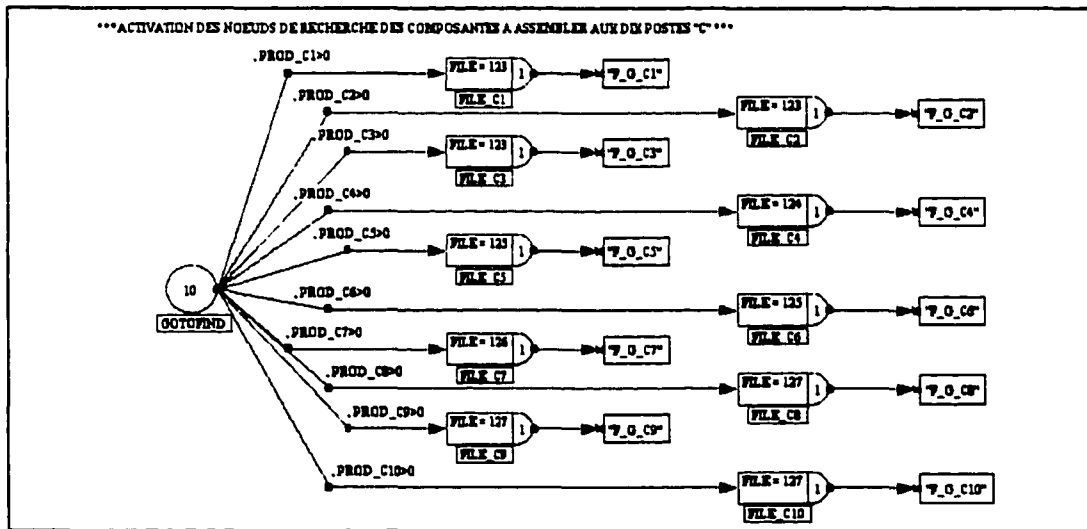


Figure 18 Activation des dix postes de type C

La figure 18 montre que si la charge calculée pour un des postes de type C est supérieure à zéro, un clone est créé. Chaque clone emprunte une branche correspondant à un des processeurs C. On sait que le plan de production que l'on cherche ici à reproduire a été conçu de façon à minimiser les coûts de circulation. On sait alors que la majorité des pièces assemblées à un poste de type C proviennent des postes G, S et T les plus proches du poste C en question. À la figure 18, on assigne à chaque entité clonée un attribut *FILE* où est mémorisé le numéro du tampon contenant les composantes G le plus près du processeur de type C que l'entité représente. Après quoi chaque entité est envoyée vers un réseau pour l'assemblage final au poste C correspondant, soit *F_G_C1* pour l'assemblage au poste C1, *F_G_C2* pour l'assemblage au poste C2, et ainsi de suite jusqu'à C10.

Voyons l'exemple de l'assemblage final au poste C1 à l'aide des figures 19 à 24. On sait que tous les modèles de tableaux de bords comprennent au moins un indicateur général. Sachant cela, l'entité envoyée au nœud *F_G_C1* – appelons-la l'entité chercheuse – commence par rechercher parmi les cinq tampons en aval des processeurs G, une composante de type G qui a été assignée au poste C1. La figure 19 présente le réseau pour la recherche d'une première composante G.

L'entité chercheuse débute sa recherche dans le tampon dont le numéro est mémorisé par l'attribut *FILE*. Dans le présent exemple, le tampon G le plus près de C1 est celui du poste G1, correspondant au numéro 123. L'entité chercheuse vérifie alors dans le tampon numéro 123 s'il se trouve une entité assignée à C1. Si aucune composante respectant cette exigence n'est trouvée dans le tampon G1, la recherche continue dans le tampon G2, puis G3, et ainsi de suite jusqu'à G5. Si aucune composante G assignée à C1 n'a été trouvée dans les cinq tampons, l'entité chercheuse attend un petit moment –

correspondant à une fraction du temps requis pour fabriquer une composante G
 – puis reprend sa recherche à partir du tampon de G1.

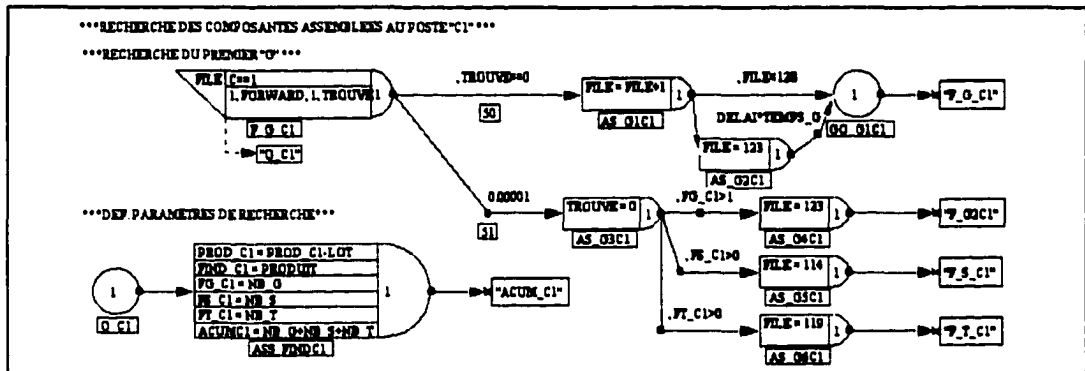


Figure 19 Recherche d'une première composante de type G

Lorsqu'une composante G assignée au poste C1 est trouvée, cette composante est acheminée vers le nœud *ASS_FINDC1*. Là, on mémorise le type de produit dont il s'agit et on vérifie quelles composantes sont requises à la fabrication de ce produit. La composante G trouvée est envoyée dans un accumulateur, au nœud *ACUM_C1*, pour y attendre que toutes les autres composantes requises soient trouvées à leur tour.

Après avoir trouvé une première composante de type G, l'entité chercheuse vérifie si une deuxième composante G est requise. C'est le cas s'il s'agit d'un modèle de tableau de bord de type A, C ou F. L'entité chercheuse est alors transférée au nœud *F_G2C1* pour effectuer la recherche de la seconde composante G dans le tampon de G1. S'il ne s'agit pas d'un modèle de tableau de bord de type A, C ou F, une seule composante G est requise. L'entité chercheuse vérifie alors si une composante S est requise. C'est le cas s'il s'agit d'un modèle de tableau de bord de type D ou E. L'entité chercheuse est donc transférée au nœud *F_S_C1* pour effectuer la recherche de la composante S

dans le tampon de S1. S'il s'agit par contre d'un modèle de tableau de bord de type B, aucune composante S n'est requise mais une composante T entre dans la fabrication de ce modèle. L'entité chercheuse est en conséquence transférée au nœud *F_T_C1* pour effectuer la recherche de la composante T dans le tampon de T1. Les figures 20 à 22 présentent respectivement la recherche d'une seconde composante de type G, d'une composante de type S et d'une de type T.

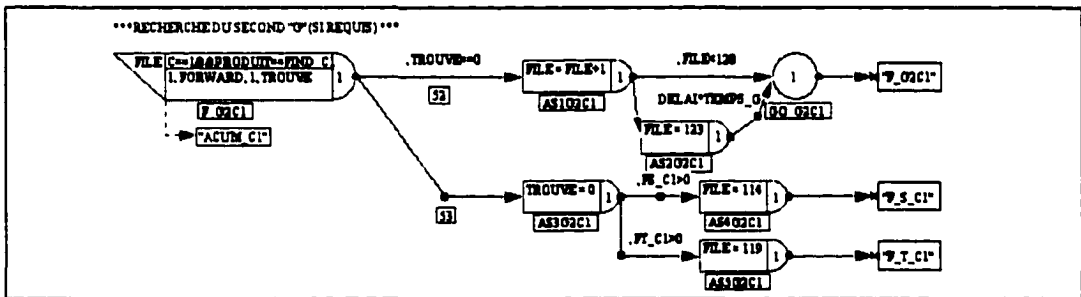


Figure 20 Recherche d'une seconde composante de type G

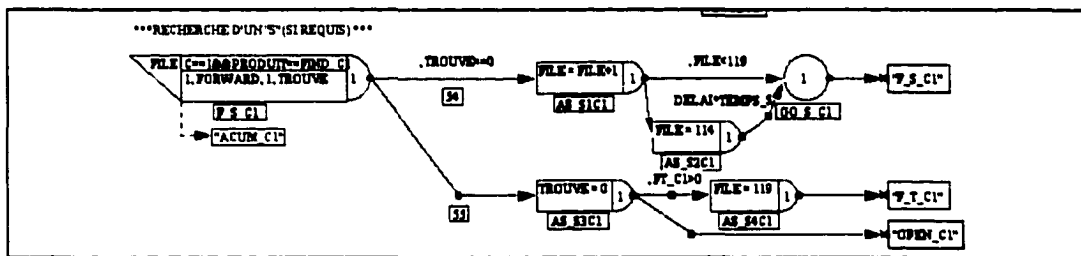


Figure 21 Recherche d'une composante de type S

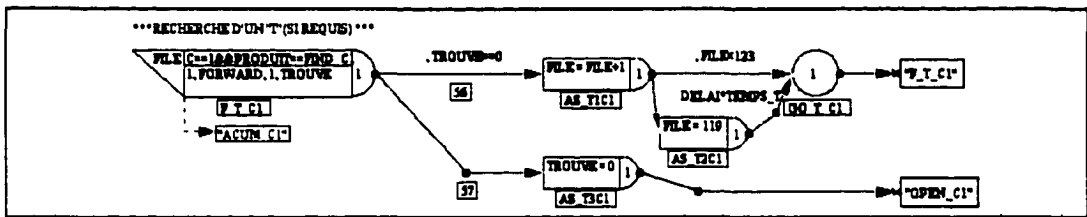


Figure 22 Recherche d'une composante de type T

Toutes les composantes trouvées vont rejoindre la première composante G, dans l'attente que toutes les composantes requises soient recueillies. Quand cela est fait, l'entité chercheuse est envoyée au nœud *OPEN_C1* pour procéder au regroupement des composantes. La figure 23 montre ce regroupement.

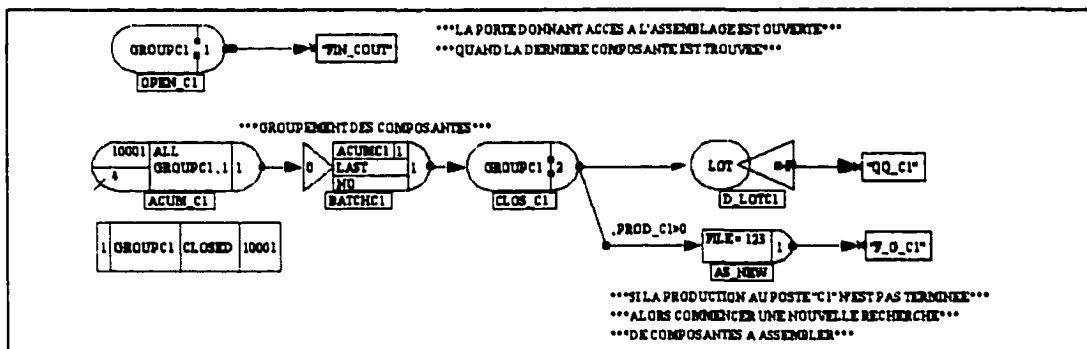


Figure 23 Regroupement des composantes G, S et T

L'arrivée de l'entité chercheuse au nœud *OPEN_C1* déverrouille l'accumulateur *ACUM_C1*. Cela permet aux composantes qui y étaient stockées de passer au nœud *BATCHC1* où elles deviennent un seul groupe de composantes à assembler. Ce lot passe alors au nœud *CLOS_C1*, lequel verrouille à nouveau l'accumulateur. L'entité représentant un lot est ensuite dédoublée. Une des deux entités emprunte alors la branche du haut, où le lot est explosé au nœud *D_LOTC1* afin de retrouver non plus un lot mais plusieurs

produits. On peut rappeler que la taille d'un lot était mémorisée par la variable *LOT*. La seconde entité – provenant du dédoublement après le nœud *CLOS_C1* – emprunte la branche du bas. Si la production assignée au poste C1 n'a pas toute été effectuée, cette entité devient la nouvelle entité chercheuse. Elle passe au nœud *AS_NEW*, où son attribut *FILE* prend la valeur 123 afin que la recherche débute dans le tampon le plus près de C1. Après quoi la nouvelle entité chercheuse retourne au nœud *F_G_C1* pour effectuer la recherche d'une composante G qui a été assignée au poste C1 pour y être assemblée. Pendant ce temps, les entités représentant des produits sont transférés au processeur C1, soit au nœud *QQ_C1*, pour y procéder à l'assemblage final, comme le montre la figure 24.

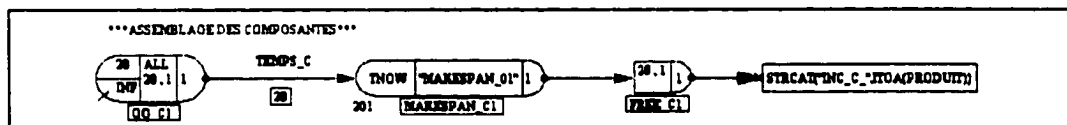


Figure 24 Assemblage final des composantes G, S et T

Les produits attendent devant le poste C1, dans la file *QQ_C1*. Quand le processeur a fini d'assembler un produit final, le temps que le produit a passé dans le système est compilé au nœud *MAKESPAN_C1*. Ensuite, le produit est transféré vers une autre partie du réseau, pour effectuer la compilation des coûts de circulation. La figure 25 présente le calcul de ces coûts. Dans ce réseau, les coûts sont calculés séparément pour chaque produit, puis tous les coûts sont additionnés afin de connaître également le coût global.

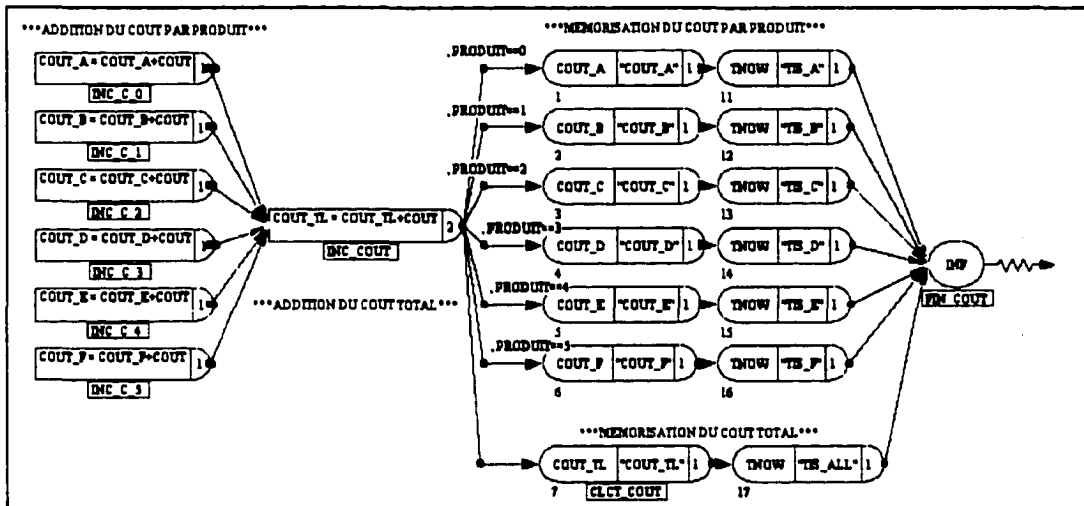


Figure 25 Calcul des coûts de circulation

L'assemblage final aux autres postes fonctionne sous le même principe. Neuf autres entités de recherche s'activent, chacune dans un réseau semblable à celui qui vient d'être présenté à l'aide des figures 19 à 24, pour trouver les composantes à assembler aux postes C2 à C10.

On sait que le modèle d'optimisation a cherché à minimiser les coûts, et que dans la plupart des cas, les composantes devant être assemblées à un poste C seront traitées par les postes G, S et T les plus près du poste C en question. Lors de la simulation, comme l'assignation des entités aux processeurs est basée sur l'importance de la charge attribuée aux postes pour chaque produit, les composantes sont également envoyées prioritairement aux postes G, S et T les plus près du poste C où elles devront être assemblées.

La logique du réseau modélisant les opérations d'assemblage final est alors fondée sur l'hypothèse que lorsque débutera une recherche pour les

composantes requises à l'assemblage final en privilégiant les tampons les plus près, il est fort probable que toutes les composantes assignées à ce même poste C seront disponibles au bon moment. Ainsi, il devrait y avoir très peu de temps libres aux postes d'assemblage final et le taux d'occupation des ces postes devrait être maximisé.

La construction du modèle de simulation est maintenant terminée. Le modèle est finalement exécuté pour reproduire les patrons de charge et de flux qui ont été obtenus à l'aide du modèle de planification agrégée avec une limite de 85% sur l'utilisation des processeurs. Les résultats de la simulation sont présentés et commentés à la section suivante.

Énoncé de contrôle du modèle de simulation

```
GEN, , , , YES, YES;
LIMITS, 500, 500, 500, 500, 500, 500, 100000;
INITIALIZE, 0.0, 144514, YES, , NO;
EQUIVALENCE, ((Produit, LTRIB[0]), (Piece, STRIB[0]), (AS, LTRIB[1]), (AT, LTRIB[2]), (B, LTRIB[3]), (G, LTRIB[4]),
(S, LTRIB[5]), (T, LTRIB[6]), (C, LTRIB[7]));
EQUIVALENCE, ((i, LTRIB[8]), (j, LTRIB[9]));
EQUIVALENCE, ((NB_B, LTRIB[10]), (NB_G, LTRIB[11]), (NB_S, LTRIB[12]), (NB_T, LTRIB[13]));
EQUIVALENCE, ((Dem_A, ARRAY[1000, 1]*ARRAY[1002, 1]), (Dem_B, ARRAY[1000, 2]*ARRAY[1002, 2]),
(Dem_C, ARRAY[1000, 3]*ARRAY[1002, 3]), (Dem_D, ARRAY[1000, 4]*ARRAY[1002, 4]),
(Dem_E, ARRAY[1000, 5]*ARRAY[1002, 5]), (Dem_F, ARRAY[1000, 6]*ARRAY[1002, 6]));
EQUIVALENCE, ((PA, ARRAY[1002, 1]), (PB, ARRAY[1002, 2]), (PC, ARRAY[1002, 3]), (PD, ARRAY[1002, 4]),
(PE, ARRAY[1002, 5]), (PF, ARRAY[1002, 6]));
EQUIVALENCE, ((RES, LTRIB[14]), (NEXT_ID, LTRIB[15]));
EQUIVALENCE, ((INC_G1, LL[1]), (INC_G2, LL[2]), (INC_G3, LL[3]), (INC_S1, LL[6]), (INC_S2, LL[7]),
(INC_T1, LL[11]), (INC_T2, LL[12]));
EQUIVALENCE, ((INC_C1, LL[15]), (INC_C2, LL[16]), (INC_C3, LL[17]), (INC_C4, LL[18]), (INC_C5, LL[19]),
(INC_C6, LL[20]), (INC_C7, LL[21]), (INC_C8, LL[22]), (INC_C9, LL[23]), (INC_C10, LL[24]));
EQUIVALENCE, ((PROD_C1, XX[1]), (PROD_C2, XX[2]), (PROD_C3, XX[3]), (PROD_C4, XX[4]), (PROD_C5, XX[5]),
(PROD_C6, XX[6]), (PROD_C7, XX[7]), (PROD_C8, XX[8]), (PROD_C9, XX[9]), (PROD_C10, XX[10]));
EQUIVALENCE, ((TROUVE, LTRIB[16]), (FILE, LTRIB[17]));
EQUIVALENCE, ((FIND_C1, LL[31]), (FIND_C2, LL[32]), (FIND_C3, LL[33]), (FIND_C4, LL[34]), (FIND_C5, LL[35]),
(FIND_C6, LL[36]), (FIND_C7, LL[37]), (FIND_C8, LL[38]), (FIND_C9, LL[39]), (FIND_C10, LL[40]));
EQUIVALENCE, ((FG_C1, LL[41]), (FG_C2, LL[42]), (FG_C3, LL[43]), (FG_C4, LL[44]), (FG_C5, LL[45]), (FG_C6, LL[46]),
(FG_C7, LL[47]), (FG_C8, LL[48]), (FG_C9, LL[49]), (FG_C10, LL[50]));
EQUIVALENCE, ((FS_C1, LL[51]), (FS_C2, LL[52]), (FS_C3, LL[53]), (FS_C4, LL[54]), (FS_C5, LL[55]), (FS_C6, LL[56]),
(FS_C7, LL[57]), (FS_C8, LL[58]), (FS_C9, LL[59]), (FS_C10, LL[60]));
EQUIVALENCE, ((FT_C1, LL[61]), (FT_C2, LL[62]), (FT_C3, LL[63]), (FT_C4, LL[64]), (FT_C5, LL[65]), (FT_C6, LL[66]),
(FT_C7, LL[67]), (FT_C8, LL[68]), (FT_C9, LL[69]), (FT_C10, LL[70]));
EQUIVALENCE, ((ACUMC1, LL[71]), (ACUMC2, LL[72]), (ACUMC3, LL[73]), (ACUMC4, LL[74]), (ACUMC5, LL[75]),
(ACUMC6, LL[76]), (ACUMC7, LL[77]), (ACUMC8, LL[78]), (ACUMC9, LL[79]), (ACUMC10, LL[80]));
EQUIVALENCE, ((DELAI, XX[11]));
EQUIVALENCE, ((COUT, ATRIB[10]), (COUT_TL, XX[20]), (COUT_A, XX[21]), (COUT_B, XX[22]), (COUT_C, XX[23]),
(COUT_D, XX[24]), (COUT_E, XX[25]), (COUT_F, XX[26]));
EQUIVALENCE, ((LOT1_A, XX[27]), (LOT1_B, XX[28]), (LOT1_C, XX[29]), (LOT1_D, XX[30]), (LOT1_E, XX[31]),
(LOT1_F, XX[32]));
EQUIVALENCE, ((LOT2_A, XX[33]), (LOT2_B, XX[34]), (LOT2_C, XX[35]), (LOT2_D, XX[36]), (LOT2_E, XX[37]),
(LOT2_F, XX[38]));
EQUIVALENCE, ((CTR_A, XX[39]), (CTR_B, XX[40]), (CTR_C, XX[41]), (CTR_D, XX[42]), (CTR_E, XX[43]),
(CTR_F, XX[44]));
EQUIVALENCE, ((TOUR_AS, LL[81]), (TOUR_AT, LL[82]), (TOUR_B, LL[83]), (TOUR_S, LL[84]), (TOUR_T, LL[85]),
(TOUR_GC, LL[86]), (TOUR_SC, LL[87]), (TOUR_TC, LL[88]), (TOUR_BS, LL[89]), (TOUR_BT, LL[90]), (TOUR_BG, LL[91]));
EQUIVALENCE, ((LOT, LL[92]));
INTLC, ((LOT, 25));
INTLC, ((TOUR_AS, 1), (TOUR_AT, 1), (TOUR_B, 1), (TOUR_S, 1), (TOUR_T, 1), (TOUR_GC, 1), (TOUR_SC, 1), (TOUR_TC, 1), (TOUR_BS, 1), (TOUR_BT, 1), (TOUR_BG, 1));
INTLC, ((COUT_TL, 0), (DELAI, 0.5));
INTLC, ((LOT1_A, 162), (LOT1_B, 334), (LOT1_C, 305), (LOT1_D, 83), (LOT1_E, 82), (LOT1_F, 294));
INTLC, ((LOT2_A, 150), (LOT2_B, 335), (LOT2_C, 280), (LOT2_D, 70), (LOT2_E, 50), (LOT2_F, 270));
ARRAY, 1, 25;
ARRAY, 2, 25;
ARRAY, 3, 25;
ARRAY, 4, 25;
ARRAY, 5, 25;
ARRAY, 6, 25;
ARRAY, 7, 25;
ARRAY, 8, 25;
ARRAY, 9, 25;
ARRAY, 10, 25;
ARRAY, 11, 25;
ARRAY, 12, 25;
ARRAY, 13, 25;
ARRAY, 14, 25;
ARRAY, 15, 25;
ARRAY, 16, 25;
ARRAY, 17, 25;
ARRAY, 18, 25;
ARRAY, 19, 25;
ARRAY, 20, 25;
ARRAY, 21, 25;
```

```

ARRAY,22,25;
ARRAY,23,25;
ARRAY,24,25;
ARRAY,25,25;
ARRAY,26,25;
ARRAY,27,25;
ARRAY,28,25;
ARRAY,29,25;
ARRAY,30,25;
ARRAY,31,25;
ARRAY,32,25;
ARRAY,33,25;
ARRAY,34,25;
ARRAY,35,25;
ARRAY,36,25;
ARRAY,37,25;
ARRAY,38,25;
ARRAY,39,25;
ARRAY,40,25;
ARRAY,41,25;
ARRAY,42,25;
ARRAY,43,25;
ARRAY,44,25;
ARRAY,45,25;
ARRAY,46,25;
ARRAY,47,25;
ARRAY,48,25;
ARRAY,49,25;
ARRAY,50,25;
ARRAY,51,25;
ARRAY,52,25;
ARRAY,53,25;
ARRAY,54,25;
ARRAY,55,25;
ARRAY,56,25;
...
ARRAY,79,25;
ARRAY,80,25;
ARRAY,81,25;
ARRAY,82,25;
ARRAY,83,25;
ARRAY,84,25;
ARRAY,1000,6,{1512,3349,5625,713,532,5424};
ARRAY,1001,9,{7.2*LOT,2.14*LOT,2.85*LOT,12.6*LOT,11.2*LOT,11.76*LOT,23.5*LOT,25.5*LOT,26.1};
ARRAY,1002,6,{1,1,1,1,1,1};
EQUIVALENCE,({TEMPS_B,ARRAY[1001,1]},{TEMPS_BT,ARRAY[1001,2]},{TEMPS_BS,ARRAY[1001,3]},{
{TEMPS_AT,ARRAY[1001,4]},{TEMPS_AS,ARRAY[1001,5]},{TEMPS_G,ARRAY[1001,6]},{TEMPS_S,ARRAY[1001,7]},{
{TEMPS_T,ARRAY[1001,8]},{TEMPS_C,ARRAY[1001,9]}}};
RECORD,1,ACTIVITY,TNOW,"TEMPS",{AWESIM,EXCEL},,TTBEG,TTFIN,60,({TNOW,"TEMPS",},{
{NNACT(2),"ACT_AS1",},{NNACT(3),"ACT_AS2",},{NNACT(4),"ACT_BS",},{
{NNACT(5),"ACT_AT1",},{NNACT(6),"ACT_AT2",},{NNACT(7),"ACT_BT",},{
{NNACT(8),"ACT_B1",},{NNACT(9),"ACT_B2",},{NNACT(10),"ACT_B3",},{
{NNACT(11),"ACT_B4",},{NNACT(12),"ACT_B5",},{NNACT(13),"ACT_B6",},{
{NNACT(14),"ACT_S1",},{NNACT(15),"ACT_S2",},{NNACT(16),"ACT_S3",},{
{NNACT(17),"ACT_S4",},{NNACT(18),"ACT_S5",},{NNACT(19),"ACT_T1",},{
{NNACT(20),"ACT_T2",},{NNACT(21),"ACT_T3",},{NNACT(22),"ACT_T4",},{
{NNACT(23),"ACT_G1",},{NNACT(24),"ACT_G2",},{NNACT(25),"ACT_G3",},{
{NNACT(26),"ACT_G4",},{NNACT(27),"ACT_G5",},{NNACT(28),"ACT_C1",},{
{NNACT(29),"ACT_C2",},{NNACT(30),"ACT_C3",},{NNACT(31),"ACT_C4",},{
{NNACT(32),"ACT_C5",},{NNACT(33),"ACT_C6",},{NNACT(34),"ACT_C7",},{
{NNACT(35),"ACT_C8",},{NNACT(36),"ACT_C9",},{NNACT(37),"ACT_C10",}}};
RECORD,2,BUFFER,TNOW,"TEMPS",{AWESIM,EXCEL},,TTBEG,TTFIN,60,({TNOW,"TEMPS",},{NNACT(102),"BUF_AS1",},{
{NNACT(103),"BUF_AS2",},{NNACT(104),"BUF_BS",},{NNACT(105),"BUF_AT1",},{NNACT(106),"BUF_AT2",},{
{NNACT(107),"BUF_BT",},{NNACT(108),"BUF_B1",},{NNACT(109),"BUF_B2",},{NNACT(110),"BUF_B3",},{
{NNACT(111),"BUF_B4",},{NNACT(112),"BUF_B5",},{NNACT(113),"BUF_B6",},{NNACT(114),"BUF_S1",},{
{NNACT(115),"BUF_S2",},{NNACT(116),"BUF_S3",},{NNACT(117),"BUF_S4",},{NNACT(118),"BUF_S5",},{
{NNACT(119),"BUF_T1",},{NNACT(120),"BUF_T2",},{NNACT(121),"BUF_T3",},{NNACT(122),"BUF_T4",},{
{NNACT(123),"BUF_G1",},{NNACT(124),"BUF_G2",},{NNACT(125),"BUF_G3",},{NNACT(126),"BUF_G4",},{
{NNACT(127),"BUF_G5",}}};
NET;
FIN;

```

ANNEXE G

RÉSULTATS DU MODÈLE DE SIMULATION

**** AweSim SUMMARY REPORT ****

Wed Feb 07 16:57:11 2001

Simulation Project : Mémoire de maîtrise

Modéler : Stéphanie Hurtubise

Date :

Scenario : MEM0207B

Run number 1 of 1

Current simulation time : **136227 sec (37h50)**

**** OBSERVED STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

Label	Mean Value	Standard Deviation	Number of Observations	Minimum Value	Maximum Value
COUT_A	181.966	104.341	1525	0.241	361.492
COUT_B	425.531	240.355	3350	0.247	836.111
COUT_C	1251.876	730.003	5625	0.419	2526.775
COUT_D	73.736	42.542	725	0.203	147.269
COUT_E	111.925	64.561	550	0.406	223.443
COUT_F	731.139	434.181	5425	0.291	1536.043
COUT_TL	2705.863	1595.606	17200	0.247	5631.133
TIS_A	49848.153	12126.470	1525	28826.100	71212.500
TIS_B	67746.541	24186.215	3350	28826.100	110700.001
TIS_C	76981.840	27738.200	5625	28826.100	128512.501
TIS_D	41649.300	7484.712	725	28826.100	54900.000
TIS_E	36079.527	4284.709	550	28826.100	43807.500
TIS_F	80925.507	31649.697	5425	28826.100	136226.250
TIS_ALL	71223.986	29277.068	17200	28826.100	136226.250
AS1	16222.487	20821.979	460	1.002	64401.002
AS2	18529.653	23806.366	526	1.003	73641.003
BS	38121.958	22283.787	986	181.002	75901.502
AT1	16744.142	21500.653	422	1.002	66466.002
AT2	18305.325	23544.669	462	1.002	72766.002
BT	39443.548	20854.423	884	181.002	74708.002
B1	3715.539	4736.872	162	2.002	14582.002
B2	18491.018	23779.158	818	1.002	73621.002
B3	18505.688	23767.804	818	1.002	73621.002
B4	18534.644	23838.332	820	1.002	73801.002
B5	18450.962	23717.234	816	1.003	73441.003
B6	18507.495	23766.404	818	1.002	73621.002
S1	27115.325	12559.421	24	3081.003	47561.003
S2	47060.866	22682.282	250	841.003	91036.003
S3	39737.432	25341.156	252	561.003	88686.003
S4	37102.919	22168.567	250	281.002	82223.503
S5	48013.174	22822.402	210	1494.252	89273.503
T1	39165.424	25081.158	230	316.002	105353.502
T2	48356.912	25150.083	232	631.002	109816.002
T3	55346.894	27148.533	230	468.002	109816.002
T4	45874.681	31850.019	192	888.502	111091.002
G1	46915.532	33898.656	500	181.002	129674.502
G2	77087.020	37949.404	500	769.002	132614.502
G3	41742.780	24655.144	502	541.002	84721.502
G4	67325.960	29785.008	500	181.002	120775.502
G5	49349.453	38752.795	380	475.002	122245.502

PRODUCTION_C01	75679.702	26335.479	3600	28800.000	110700.001
PRODUCTION_C02	53101.515	25145.069	3750	28800.000	130466.251
PRODUCTION_C03	73522.705	25957.434	3750	28800.000	124244.251
PRODUCTION_C04	88588.520	32825.240	3750	28800.000	133732.501
PRODUCTION_C05	49076.361	18054.095	3800	28800.000	85265.001
PRODUCTION_C06	55537.424	18586.637	3750	28800.000	89695.251
PRODUCTION_C07	72642.450	26802.497	3750	28800.000	121538.251
PRODUCTION_C08	61164.881	28004.859	3800	28800.000	120311.251
PRODUCTION_C09	96931.230	29593.910	3750	28800.000	136226.250
PRODUCTION_C10	50077.972	15353.384	700	28800.000	68848.500

**** FILE STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
2	RES. AS1	53.955	72.907	229	0	31957.030
3	RES. AS2	70.627	85.651	262	0	36582.700
4	RES. BS	0.036	0.186	1	0	9.948
5	RES. AT1	51.080	67.350	210	0	32978.720
6	RES. AT2	61.310	75.116	230	0	36156.355
7	RES. BT	0.009	0.096	1	0	2.884
8	RES. B1	4.253	14.443	80	0	7152.926
9	RES. B2	110.006	133.360	407	0	36639.968
10	RES. B3	109.918	133.266	407	0	36610.628
11	RES. B4	110.554	133.725	408	0	36732.717
12	RES. B5	109.438	132.954	406	0	36540.081
13	RES. B6	109.907	133.259	407	0	36607.015
14	RES. S1	0.000	0.000	1	0	0.000
15	RES. S2	0.535	0.706	2	0	582.800
16	RES. S3	0.327	0.640	2	0	353.958
17	RES. S4	0.653	0.806	2	0	711.240
18	RES. S5	0.224	0.502	2	0	290.952
19	RES. T1	0.460	0.740	2	0	545.011
20	RES. T2	0.482	0.819	2	0	566.593
21	RES. T3	0.448	0.752	2	0	530.250
22	RES. T4	0.292	0.581	2	0	413.661
23	RES. G1	0.142	0.349	1	0	77.612
24	RES. G2	0.035	0.184	1	0	19.084
25	RES. G3	0.246	0.494	2	0	133.654
26	RES. G4	0.000	0.000	1	0	0.000
27	RES. G5	0.022	0.146	1	0	15.586
28	RES. C1	11.443	28.997	202	0	866.054
29	RES. C2	122.718	209.971	762	0	8916.030
30	RES. C3	31.526	60.414	280	0	2290.510
31	RES. C4	9.533	19.727	149	0	692.620
32	RES. C5	143.675	261.851	927	0	10301.292
33	RES. C6	51.446	94.018	399	0	3737.800
34	RES. C7	9.742	27.014	199	0	707.780
35	RES. C8	68.602	165.337	699	0	4918.674
36	RES. C9	78.762	172.571	652	0	5722.440
37	RES. C10	1.253	6.243	74	0	487.843

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
102	QUEUE BUF_AS1	11.056	13.011	36	0	6548.139
103	QUEUE BUF_AS2	4.543	6.098	17	0	2353.027
104	QUEUE BUF_BS	3.450	3.925	13	0	953.249
105	QUEUE BUF_AT1	16.163	19.203	55	0	10435.220
106	QUEUE BUF_AT2	2.877	4.592	19	0	1696.641
107	QUEUE BUF_BT	4.652	7.289	28	0	1433.755
108	RES. BUFB1	5.970	12.398	48	0	10039.753
109	RES. BUFB2	100.598	58.595	200	0	33506.659
110	RES. BUFB3	2.698	4.286	18	0	898.568
111	RES. BUFB4	0.237	0.820	7	0	78.812
112	RES. BUFB5	18.661	19.516	52	0	6230.862
113	RES. BUFB6	74.553	51.674	165	0	24831.557
114	QUEUE BUF_S1	4.984	3.025	10	0	56581.519
115	QUEUE BUF_S2	29.686	18.265	64	0	32351.784
116	QUEUE BUF_S3	5.421	11.286	48	0	5861.105
117	QUEUE BUF_S4	25.216	17.033	52	0	27480.390
118	QUEUE BUF_S5	23.854	17.731	53	0	30947.867
119	QUEUE BUF_T1	9.126	10.063	40	0	10810.359
120	QUEUE BUF_T2	19.715	11.861	42	0	23153.282
121	QUEUE BUF_T3	2.934	4.888	21	0	3358.242
122	QUEUE BUF_T4	5.821	9.231	37	0	8260.636
123	QUEUE BUF_G1	12.340	22.903	96	0	6724.134
124	QUEUE BUF_G2	17.203	15.099	44	0	9373.999
125	QUEUE BUF_G3	15.042	20.815	89	0	8163.894
126	QUEUE BUF_G4	7.442	8.211	27	0	4054.966
127	QUEUE BUF_G5	44.416	25.399	80	0	31845.728
10001	GAT. GROUPEC1	0.000	0.000	1	0	0.000
10002	GAT. GROUPEC2	0.442	0.501	2	0	269.832
10003	GAT. GROUPEC3	1.235	1.244	3	0	673.233
10004	GAT. GROUPEC4	0.549	0.498	1	0	304.159
10005	GAT. GROUPEC5	0.819	0.984	2	0	560.930
10006	GAT. GROUPEC6	0.652	0.863	2	0	426.984
10007	GAT. GROUPEC7	1.273	1.363	3	0	577.858
10008	GAT. GROUPEC8	1.191	1.366	3	0	591.895
10009	GAT. GROUPEC9	1.860	1.427	3	0	997.645
10010	GAT. GROUPEC10	0.000	0.000	1	0	0.000

**** ACTIVITY STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization
2	AS1	0.473	0.499	230	1
3	AS2	0.541	0.498	263	1
4	BS	0.258	0.437	493	1
5	AT1	0.488	0.500	211	1
6	AT2	0.534	0.499	231	1
7	BT	0.174	0.379	442	1
8	B1	0.107	0.309	81	1
9	B2	0.540	0.498	409	1
10	B3	0.540	0.498	409	1
11	B4	0.542	0.498	410	1
12	B5	0.539	0.498	408	1
13	B6	0.540	0.498	409	1
14	S1	0.052	0.222	12	1
15	S2	0.539	0.498	125	1
16	S3	0.543	0.498	126	1
17	S4	0.539	0.498	125	1
18	S5	0.453	0.498	105	1
19	T1	0.538	0.499	115	1
20	T2	0.543	0.498	116	1
21	T3	0.538	0.499	115	1
22	T4	0.449	0.497	96	1
23	G1	0.540	0.498	250	1
24	G2	0.540	0.498	250	1
25	G3	0.542	0.498	251	1
26	G4	0.540	0.498	250	1
27	G5	0.410	0.492	190	1
28	C1	0.345	0.475	1800	1
29	C2	0.359	0.480	1875	1
30	C3	0.359	0.480	1875	1
31	C4	0.359	0.480	1875	1
32	C5	0.364	0.481	1900	1
33	C6	0.359	0.480	1875	1
34	C7	0.359	0.480	1875	1
35	C8	0.364	0.481	1900	1
36	C9	0.359	0.480	1875	1
37	C10	0.067	0.250	350	1

**** RESOURCE STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.
2	AS1	0.473	0.499	0	1
3	AS2	0.541	0.498	0	1
4	BS	0.258	0.437	0	1
5	AT1	0.488	0.500	0	1
6	AT2	0.534	0.499	0	1
7	BT	0.174	0.379	0	1
8	B1	0.107	0.309	0	1
9	B2	0.540	0.498	0	1
10	B3	0.540	0.498	0	1
11	B4	0.542	0.498	0	1
12	B5	0.539	0.498	0	1
13	B6	0.540	0.498	0	1
14	S1	0.052	0.222	0	1
15	S2	0.539	0.498	0	1
16	S3	0.543	0.498	0	1
17	S4	0.539	0.498	0	1
18	S5	0.453	0.498	0	1
19	T1	0.538	0.499	0	1
20	T2	0.543	0.498	0	1
21	T3	0.538	0.499	0	1
22	T4	0.449	0.497	0	1
23	G1	0.540	0.498	0	1
24	G2	0.540	0.498	0	1
25	G3	0.542	0.498	0	1
26	G4	0.540	0.498	0	1
27	G5	0.410	0.492	0	1
28	C1	0.345	0.475	0	1
29	C2	0.359	0.480	0	1
30	C3	0.359	0.480	0	1
31	C4	0.359	0.480	0	1
32	C5	0.364	0.481	0	1
33	C6	0.359	0.480	0	1
34	C7	0.359	0.480	0	1
35	C8	0.364	0.481	0	1
36	C9	0.359	0.480	0	1
37	C10	0.067	0.250	0	1

**** GATE STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

Gate Number	Gate Label	Current Status	Percent of Time Open
1	GROUPC1	CLOSED	0.000
2	GROUPC2	CLOSED	0.000
3	GROUPC3	CLOSED	0.000
4	GROUPC4	CLOSED	0.000
5	GROUPC5	CLOSED	0.000
6	GROUPC6	CLOSED	0.000
7	GROUPC7	CLOSED	0.000
8	GROUPC8	CLOSED	0.000
9	GROUPC9	CLOSED	0.000
10	GROUPC10	CLOSED	0.000

**** BATCH STATISTICS REPORT for scenario MEM0207B ****

Batch Node	Average Number Waiting	Maximum Number Waiting	Current Number Waiting	Average Waiting Time
BATCHC1	0.000	2	0	0.000
BATCHC2	0.000	3	0	0.000
BATCHC3	0.000	4	0	0.000
BATCHC4	0.000	4	0	0.000
BATCHC5	0.000	3	0	0.000
BATCHC6	0.000	3	0	0.000
BATCHC7	0.000	4	0	0.000
BATCHC8	0.000	4	0	0.000
BATCHC9	0.000	4	0	0.000
BATCHC10	0.000	2	0	0.000