

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 GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
CALIZAYA HINOJOSA, Jorge

APPROCHE POUR LA MODÉLISATION DE SYSTÈMES MANUFACTURIERS
CELLULAIRES DANS L'INDUSTRIE DE CONFECTION DE VÊTEMENTS

MONTREAL, LE 4 SEPTEMBRE 2008

© droits réservés de Jorge Calizaya 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ali Gharbi, directeur de mémoire
Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Claude Olivier, codirecteur de mémoire
Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

Thien-My Dao, président du jury
Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, membre du jury
Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Le développement d'une approche pour la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires SMC dans l'industrie de la confection de vêtements a un intérêt spécial pour l'auteur de ce mémoire vu son expérience de travail dans cette industrie. Cet intérêt sur le sujet, l'importance de cette industrie dans la province de Québec et les travaux de recherche développés par le directeur de mémoire M. Ali Gharbi sur la conception de systèmes manufacturiers cellulaires, ont coïncidé pour prendre la décision de développer une approche pour la conception de SMC approprié pour cette industrie

Je tiens à remercier, la permanente collaboration de mon directeur de mémoire M. Ali Gharbi, dans la démarche de ce travail de recherche. Je tiens aussi à remercier l'École de Technologie Supérieure pour toutes les facilités auxquelles j'ai eu accès comme étudiant.

APPROCHE POUR LA MODÉLISATION DE SYSTÈMES MANUFACTURIERS CELLULAIRES DANS L'INDUSTRIE DE CONFECTION DE VÊTEMENTS

Calizaya Hinojosa, Jorge

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une approche pour la problématique particulière de la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires (SMC) dans l'industrie de la confection de vêtements. L'approche propose une méthodologie qui est composée de quatre phases. La première consiste en la présélection des meilleures machines candidates à la formation de cellules en utilisant l'Analyse Hiérarchique de Procédés (AHP) laquelle est un type d'analyse multicritère des facteurs quantitatifs et qualitatifs. La deuxième phase consiste en la formation de cellules, en utilisant une heuristique développée à cet effet, laquelle considère l'existence de saisons multiples, l'assemblage de pièces et l'assignation de deux types de processeurs (travailleur et machine). La troisième phase consiste en la simulation dynamique par événements discrets afin d'obtenir des informations additionnelles sur la performance de différents scénarios de SMC. La quatrième phase utilise l'approche AHP pour réaliser la sélection du meilleur scénario du SMC, de façon similaire à la première phase, celle-ci considère une structure hiérarchique des facteurs qualitatifs et quantitatifs qui ont été générés dans les phases antérieures.

**APPROCHE POUR LA MODÉLISATION DE SYSTÈMES
MANUFACTURIERS CELLULAIRES DANS L'INDUSTRIE
DE CONFECTION DE VÊTEMENTS**

Calizaya Hinojosa, Jorge

ABSTRACT

This thesis presents an approach for solving the particular problem of Cellular Manufacturing Systems (CMS) modeling in the apparel industry. The approach proposes a methodology composed by four phases. The first phase consists in the pre selection of the best machines candidates for the cell formation by using the Analytical Hierarchy Process (AHP), which is a kind of multicriteria analysis method of quantitative and qualitative factors. The second phase consists in the cell formation by using a heuristic developed for this purpose. This heuristic considers the existence of multiple seasons, the assembly of parts and the assignment of two types of processors (worker and machine). The third phase consists in the discrete event simulation of various CMS scenarios in order to obtain additional information about the performance of every CMS scenario. The fourth phase uses the AHP to carry out the selection of the best CMS scenario, in a similar way to the first phase, this one considers a hierarchical structure of qualitative and quantitative factors, whose values were generated in the previous phases.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	XVI
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 L'industrie de la confection	7
1.2.1 Chaînes d'approvisionnement	7
1.2.2 Systèmes de Production	9
1.2.2.1 Systèmes manufacturiers dans l'industrie de la confection	11
1.3 Systèmes manufacturiers cellulaires (SMC).....	14
1.3.1 Formation de cellules.....	16
1.3.2 Techniques de formation de cellules	18
1.3.2.1 Programmation linéaire en nombres mixtes	19
1.3.2.2 Méthodes heuristiques	20
1.3.3 Évaluation des différentes techniques	23
1.3.4 Application des techniques modernes de formation de cellules.....	24
1.4 Systèmes manufacturiers cellulaires focalisés (SMCF)	25
1.5 Cellules virtuelles	26
1.6 Simulation.....	27
1.7 Analyse multicritère.....	30
1.8 Conclusion	31
CHAPITRE 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Phase I : Présélection de machines candidates	33
2.2.1 Analyse Multicritère	34
2.3 Phase II : Formation de cellules.....	36
2.3.1 Caractéristiques de l'heuristique.....	37
2.3.2 Génération de scénarios	40

2.4	Phase III : Modélisation et simulation	43
2.4.1	Temps d'inter-arrivée et taille de la commande	43
2.4.2	Durée des opérations.....	45
2.4.3	Temps entre les pannes et durée des pannes.....	45
2.5	Phase IV: Sélection du scénario de SMC	46
2.6	Conclusion	47
CHAPITRE 3 PHASE I : PRÉSÉLECTION DE MACHINES		48
3.1	Introduction.....	48
3.2	Formation de groupes de types de machines	48
3.3	Critères d'évaluation.....	49
3.3.1	Critère : Économique.....	50
3.3.1.1	Sous-critère : Coût d'investissement	50
3.3.1.2	Sous-critère : Coût d'opération.....	50
3.3.2	Critère : Fonctionnalité	51
3.3.2.1	Sous-critère : Taux de production.....	51
3.3.2.2	Sous-critère : Temps de mise en course	51
3.3.2.3	Sous-critère : Flexibilité	51
3.3.2.4	Sous-critère : Taux de rejet.....	51
3.3.2.5	Sous-critère : Taux de panne	52
3.3.3	Critère : Ressources humaines.....	52
3.3.3.1	Sous-critère : Sécurité.....	52
3.3.3.2	Sous-critère : Qualification.....	52
3.3.3.3	Sous-critère : Ergonomie	53
3.3.4	Critère : Stratégique.....	53
3.3.4.1	Sous-critère : Durée de vie	53
3.3.4.2	Sous-critère : Fabricant.....	53
3.4	Pondération et valorisation relative des critères	54
3.5	Analyse de la cohérence en la pondération de critères et sous-critères	57
3.6	Pondération et valorisation relative des alternatives	61
3.7	Synthèse des pondérations.....	64
3.8	Analyse de sensibilité	65
3.9	Conclusion	68
CHAPITRE 4 PHASE II : FORMATION DE CELLULES		69
4.1	Introduction.....	69
4.2	Le système manufacturier cellulaire SMC	70
4.3	Le problème de formation de cellules	71
4.3.1	Objectifs et contraintes de conception du SMC.	71
4.4	Hypothèses de conception	75
4.5	Approche analytique.....	78
4.5.1	Hypothèses pour la formulation analytique	79
4.5.2	Modèle d'optimisation AMSMT (assemblage, multi-saison, machine-travailleur).....	80

4.5.3	Notation	81
4.5.4	Formulation du modèle AMSMT (assemblage, multi-saison, machine-travailleur).....	84
4.5.5	Description de la formulation	87
4.5.6	Résolution du modèle analytique.....	89
4.6	Approche empirique	90
4.6.1	Heuristique de formation de cellules (HFC).....	91
4.6.2	Notation	95
4.6.3	Description de l'heuristique.....	100
4.7	Exemples numériques	104
4.8	Analyse de sensibilité	110
4.9	Conclusion	114
CHAPITRE 5 PHASE III : MODÉLISATION ET SIMULATION		115
5.1	Introduction.....	115
5.2	Modélisation	115
5.2.1	Formulation du problème	115
5.2.2	Système manufacturier cellulaire modélisé	116
5.2.3	Hypothèses et contraintes	117
5.2.4	Données d'entrée du modèle	118
5.3	Description du modèle	119
5.3.1	Initialisation	120
5.3.2	Réseau principal : Lecture de fichiers des données	121
5.3.3	Sous-réseau : Génération de la demande	123
5.3.4	Sous-réseau : Génération des pannes.....	124
5.3.5	Sous-réseau : Activités de production	125
5.3.6	Collecte de données	127
5.4	Conclusion	128
CHAPITRE 6 PHASE IV : SÉLECTION DU MEILLEUR SCÉNARIO		129
6.1	Introduction.....	129
6.2	Critères d'évaluation.....	129
6.2.1	Critère : Économique.....	131
6.2.1.1	Sous-critère : Coût d'investissement	131
6.2.1.2	Sous-critère : Coût d'opération.....	131
6.2.2	Critère : Performance.....	132
6.2.2.1	Sous-critère : Temps moyen dans le système	133
6.2.2.2	Sous-critère : Temps de cycle de production.....	133
6.2.2.3	Sous-critère : Taux moyen d'utilisation des machines.....	133
6.2.2.4	Sous-critère : Taux moyen d'utilisation des travailleurs	134
6.2.3	Critère : Aspect des opérations	134
6.2.3.1	Sous-critère : Transport intracellulaire	134
6.2.3.2	Sous-critère : Reconfiguration de cellules	134
6.2.3.3	Sous-critère : Maintenance	135

6.2.3.4	Sous-critère : Rejets	135
6.2.4	Critère : Ressources humaines	135
6.2.4.1	Sous-critère : Fatigue pour transport	135
6.2.4.2	Sous-critère : Responsabilité	136
6.2.4.3	Sous-critère : Compétence	136
6.3	Pondération des critères et sous-critères	136
6.4	Pondération des alternatives	139
6.5	Synthèse des pondérations	140
6.6	Analyse de sensibilité	141
6.7	Conclusion	144
CHAPITRE 7 APPLICATION ET ANALYSE		145
7.1	Introduction	145
7.2	Description de l'exemple d'application	145
7.3	Phase I : Présélection de machines	149
7.3.1	Données d'entrée	149
7.3.2	Pondération des critères et sous-critères	150
7.3.3	Pondération des alternatives	152
7.3.4	Analyse de sensibilité	153
7.4	Phase II : Formation de cellules	155
7.4.1	Données d'entrée	155
7.4.2	Résolution de l'heuristique et génération de scénarios	157
7.4.2.1	Scénario 1	159
7.4.2.2	Scénario 2	162
7.4.2.3	Scénario 3	164
7.4.2.4	Scénario 4	166
7.4.2.5	Scénario 5	168
7.5	Phase III : Simulation	170
7.5.1	Données d'entrée	170
7.5.2	Expérimentation	173
7.5.3	Validation du modèle de simulation	176
7.6	Phase IV : Sélection du meilleur scénario	178
7.6.1	Données d'entrée, pondération de critères, sous-critères et alternatives	178
7.6.2	Pondération des alternatives	178
7.6.3	Analyse de sensibilité	180
7.7	Conclusion	182
CONCLUSION		183
RECOMMANDATIONS		187
ANNEXE I DONNÉES D'ENTRÉE DES PROBLÈMES		188
ANNEXE II RÉSULTATS DE LA HFC POUR LES PROBLÈMES EXEMPLES		193

ANNEXE III DESCRIPTION DU MODÈLE DE SIMULATION	202
ANNEXE IV RÉSULTATS DE LA HFC.....	209
ANNEXE V RÉSULTATS DE LA SIMULATION.....	214
BIBLIOGRAPHIE.....	222

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques distinctives de <i>Lean</i> et <i>Agile Supply</i>9
Tableau 1.2	Contraste opérationnel et technologique dans l'implantation de FWG dans les industries de vêtement et de l'usinage 16
Tableau 2.1	Exemple d'assignation des produits, des machines, des travailleurs et des opérations37
Tableau 2.2	Paramètres de conception42
Tableau 2.3	Effet des modifications des paramètres de conception.....42
Tableau 3.1	Exemple d'une échelle de comparaison 2 à 2.....54
Tableau 3.2	Pondération binaire des critères, à partir de la méthode graphique55
Tableau 3.3	Valorisation relative de chaque critère56
Tableau 3.4	Valorisation relative des critères et des sous-critères57
Tableau 3.5	Ratios d'incohérence moyenne par nombre des facteurs60
Tableau 3.6	Ratios d'incohérence en la pondération des sous-critères60
Tableau 3.7	Pondération des alternatives par introduction directe de données.....61
Tableau 3.8	Valeur de l'investissement des alternatives.....62
Tableau 3.9	Vecteur propre normalisé de l'investissement pour chaque alternative ..62
Tableau 3.10	Vecteur propre normalisé du critère Économique pour chaque alternative63
Tableau 3.11	Vecteurs propres de chaque critère et vecteur propre final pour la sélection des meilleures machines type « A »64
Tableau 4.1	Formules pour le calcul du nombre de variables et contraintes.....89
Tableau 4.2	Taille des problèmes utilisés pour l'exemple numérique 105
Tableau 4.3	Nombre de variables et contraintes dans la formulation du modèle analytique..... 105
Tableau 4.4	Résumé de solution des exemples numériques..... 107
Tableau 4.5	Assignation des produits à chaque cellule et assignation de machines et travailleurs à chaque opération <i>scij</i> – Problème A1 108
Tableau 4.6	Nombre et type de machines par cellule et son niveau d'utilisation – Problème A1 109

Tableau 4.7	Nombre et type de travailleurs par cellule et son niveau d'utilisation – Problème A1	109
Tableau 4.8	Résultats de l'analyse de sensibilité	112
Tableau 4.8	Résultats de l'analyse de sensibilité (continuation).....	113
Tableau 5.1	Liste de variables du modèle de simulation.....	121
Tableau 6.1	Pondération binaire des critères à partir de la méthode graphique.....	137
Tableau 6.2	Valorisation relative de chaque critère	137
Tableau 6.3	Valorisation relative des critères et des sous-critères.....	139
Tableau 6.4	Données utilisées pour la pondération des alternatives par rapport à chaque critère	140
Tableau 7.1	Demande du cas exemplaire	146
Tableau 7.2	Base de données des machines candidates par type de machine	150
Tableau 7.3	Analyse de sensibilité : Résultat des variations de la pondération des critères	154
Tableau 7.4	Résultat du processus de présélection pour les 3 types de machines	155
Tableau 7.5	Machines candidates pour la formation de cellules.....	155
Tableau 7.6	Temps d'opération et taux de rejet par machine et type de travailleur	156
Tableau 7.7	Coûts des travailleurs candidats pour la formation de cellules.....	157
Tableau 7.8	Composition du SMC avec relaxation maximale de paramètres de conception - Scénario 0	158
Tableau 7.9	Stratégie de génération de scénarios.....	159
Tableau 7.10	Composition du SMC – Scénario 1	160
Tableau 7.11	Matrice de regroupement de Machines – Scénario 1.....	161
Tableau 7.12	Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 1	161
Tableau 7.13	Composition du SMC – Scénario 2	162
Tableau 7.14	Matrice de regroupement de Machines – Scénario 2.....	163
Tableau 7.15	Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 2.....	163
Tableau 7.16	Composition du SMC – Scénario 3	164
Tableau 7.17	Matrice de regroupement de Machines – Scénario 3.....	165
Tableau 7.18	Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 3.....	165

Tableau 7.19	Composition du SMC – Scénario 4	166
Tableau 7.20	Matrice de regroupement de Machines – Scénario 4.....	167
Tableau 7.21	Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 4.....	167
Tableau 7.22	Composition du SMC – Scénario 5	168
Tableau 7.23	Matrice de regroupement de Machines – Scénario 5.....	169
Tableau 7.24	Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 5.....	169
Tableau 7.25	Temps moyen d’inter-arrivée des commandes	170
Tableau 7.26	Réassignation des opérations aux Trav. dans la cellule Scénario 1.....	173
Tableau 7.27	Résultats de la simulation	175
Tableau 7.28	Comparaison des coûts d’utilisation de machines de l’heuristique et la simulation.....	176
Tableau 7.29	Comparaison de l’utilisation de machines estimée par l’heuristique et la simulation.....	177
Tableau 7.30	Analyse de sensibilité - Résultat des variations de la pondération des critères	181

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 <i>Bundle System</i> (BS)	11
Figure 1.2 <i>Progressive Bundle System</i> (PBS)	12
Figure 1.3 Cellule du système manufacturier cellulaire (SMC)	14
Figure 1.4 Classification des techniques de formation de cellules	18
Figure 2.1 Modèle général de l'approche pour la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires	33
Figure 2.2 Structure hiérarchique d'un problème de sélection	36
Figure 2.3 Diagramme d'opérations d'une ligne d'assemblage.....	38
Figure 3.1 Hiérarchie du modèle de présélection de machines.....	49
Figure 3.2 Résultat de la pondération binaire des critères	56
Figure 3.3 Synthèse des pondérations pour la sélection des machines type « A » ...	65
Figure 3.4 Graphiques de pondération des critères et alternatives.....	66
Figure 3.5 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère économique.....	67
Figure 3.6 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère Stratégique.....	67
Figure 4.1 Cellule de production avec utilisation maximale de machines (9 opérations - 4 machines).....	72
Figure 4.2 Séquence de traitement des produits dans la cellule.....	75
Figure 4.3 Système manufacturier cellulaire avec utilisation maximale de travailleurs (9 opérations - 9 machines – 4 travailleurs).....	77
Figure 4.4 Diagramme d'opérations d'une ligne d'assemblage.....	83
Figure 4.5 Diagramme logique général de l'heuristique de formation de cellules (HFC)	93
Figure 4.6 Diagramme schématique des opérations des produits du problème-exemple D	111
Figure 5.1 Diagramme de composantes du modèle de simulation.....	120
Figure 5.2 Diagramme de lecture de données	122
Figure 5.3 Diagramme de génération de la demande.....	123
Figure 5.4 Diagramme de génération de pannes	124

Figure 5.5	Diagramme d'activités de production.....	126
Figure 6.1	Hiérarchie du modèle de sélection de scénarios de SMC.....	131
Figure 6.2	Résultat de la pondération binaire des critères	138
Figure 6.3	Synthèse des pondérations pour la sélection du meilleur SMC.....	141
Figure 6.4	Graphiques de pondération des critères et des alternatives	142
Figure 6.5	Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère économique.....	142
Figure 6.6	Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère Stratégique	143
Figure 7.1	Diagramme d'opérations des produits de la saison 1	147
Figure 7.2	Diagramme d'opérations des produits de la saison 2	148
Figure 7.3	Hiérarchie du modèle de présélection de machines et synthèse de pondération des critères	151
Figure 7.4	Synthèse des pondérations de critères et alternatives pour la sélection des machines type « A ».....	152
Figure 7.5	Analyse de sensibilité par une augmentation dans la pondération du critère Économique	153
Figure 7.6	Diagramme d'opérations du produit 1 et temps d'opération	172
Figure 7.7	Hiérarchie du modèle de sélection de scénarios	179
Figure 7.8	Synthèse des pondérations de critères et alternatives pour la sélection du meilleur scénario du SMC	180
Figure A.1	Lecture de données de la durée des saisons.....	203
Figure A.2	Lecture de données de chaque saison	203
Figure A.3	Introduction des entités au sous-réseau	204
Figure A.4	Génération de commandes.....	205
Figure A.5	Introduction de la commande dans la cellule	205
Figure A.6	Assemblage des pièces	206
Figure A.7	Assignation des ressources et opération	207
Figure A.8	Déplacement du travailleur.....	207
Figure A.9	Génération de pannes.....	208

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AHP	<i>Analytic hierarchy process.</i> Analyse hiérarchique de procédés.
BS	<i>Bundle System.</i> Système de production par ballots.
FWG	<i>Flexible Work Group.</i> Groupe de travail flexible.
FMS	<i>Flexible Manufacturing System.</i> Système manufacturier flexible.
JIT	<i>Just in time.</i> Juste-à-temps.
MRP	<i>Material Requirements Planning.</i> Planification de besoins matières.
MTBF	<i>Mean time before failure.</i> Temps moyen entre pannes.
MTTR	<i>Mean time to repair.</i> Temps moyen de réparation.
PBS	<i>Progressive Bundle System.</i> Système de production progressive par ballots.
PL	<i>Linear Programming.</i> Programmation linéaire.
PLM	<i>Mixed Programming.</i> Programmation linéaire en nombres mixtes.
SLAM	<i>Simulation Language for Advanced Modeling.</i> Langage de simulation pour la modélisation avancée.
SMC	<i>Cellular Manufacturing System.</i> Système manufacturier cellulaire.

SMCF	<i>Focused cellular manufacturing.</i> Système manufacturier cellulaire focalisé.
TG	<i>Group Technology.</i> Technologie de groupe.
TSS	<i>Toyota Sewing System.</i> Système de couture Toyota.
WIP	<i>Work in process.</i> Travaux en cours.

INTRODUCTION

Produits et Marché

Dans une économie globalisée, la concurrence sur le marché de l'industrie de confection de vêtements est grande. Ainsi on peut observer dans le marché canadien la participation de fournisseurs de plusieurs pays, chacun d'entre eux possédant des produits et avantages particuliers. Un de ces avantages réside dans les bas coûts de la main d'œuvre que possèdent les industries des pays en voie de développement. Cet avantage est très important pour les produits bas de gamme où le prix est le principal facteur de décision pour l'achat. Par contre, pour la demande des produits haut de gamme qui sont normalement commandés en petites quantités avec une grande variété de styles, la haute qualité et les temps de livraison courts sont des facteurs décisifs pour l'achat.

Caractéristiques de l'industrie de la confection

- Le processus de production dans l'industrie de la confection possède 4 étapes :
 - La conception, c'est l'étape de création de nouveaux produits en créant des patrons pour chaque sous-ensemble et la production de prototypes.
 - La coupe, consiste en la coupe des tissus selon les patrons des sous-ensembles. Pour cela on utilise des équipements qui réalisent l'étendu des tissus, l'emplacement des patrons (physique ou électronique) et la coupe des tissus avec un rayon laser ou un couteau mécanique.
 - La couture, est l'étape d'assemblage des différents sous ensembles en utilisant différents types de machines à coudre, chacune spécialisé dans un type de couture. Par exemple il existe des machines bouttonnières qui cousent des boutons au vêtement.
 - L'emballage et lavage, quelques produits ont besoin d'être lavés après avoir été cousus (jeans), mais généralement tous les produits terminés ont besoin d'être étiquetés et emballés avant d'être envoyés au marché.

- La demande est très variable dans les différentes saisons, ainsi on peut voir qu'il existe des producteurs spécialisés qui se dédient exclusivement à produire pour une seule saison et il y en a des autres qui produisent pour les quatre saisons.

Pour les produits bas de gamme, généralement la demande est satisfaite par moyen de la production hors saison où on réalise l'stockage des produits terminés.

Les produits haut de gamme sont des produits très liés à la mode. La production est réalisée en petite échelle et généralement dans la même saison. Les commandes sont petits en quantité mais ils ont une grande variété de styles et doivent être satisfaits dans des temps très courts (moins d'une semaine).

- Le processus de production, dans l'étape de couture, est principalement un processus d'assemblage. On assemble des sous-ensembles entre eux et à la pièce principale.
- Les temps de mise en course et de transport sont assez importants en comparaison avec les temps d'opération. La mise en course d'une machine peut signifier le changement des fils, aiguille, reprogrammation de nombre des points de couture, installation d'accessoires qui facilitent les opérations de couture, etc. Les temps transport des produits en procès entre stations de travail varient selon les distances. Les temps d'opération ou de couture sont petits généralement beaucoup moins d'un minute.

À cause de l'importance des temps de mise en course et de transport, presque tous les systèmes de production essayent réduire le nombre des mises en course et de transport en travaillant par lots de production.

- Il existe une utilisation intensive de la main d'œuvre. Le niveau d'automatisation n'est pas assez important comme dans des autres industries, pour cette raison les travailleurs son employés pour réaliser toutes les opérations. Une particularité additionnelle est que presque toutes les opérations de couture demandent la participation du travailleur pendant toute la durée de l'opération, de cette façon le travailleur ne peut travailler ou réaliser des autres opérations simultanément.

Cette utilisation intensive implique que le coût de la main d'œuvre est important dans le coût total.

- Les coûts de main d'œuvre sont plus importants que les coûts d'investissement et d'opération des machines. Cela est vrai dans les cas des pays développés comme le Canada. Pour cette raison les systèmes de productions, qui s'utilisent dans ces pays, privilégient l'utilisation efficiente des travailleurs. Dans le cas des pays en voie de développement où les coûts de la main d'œuvre ne sont pas importants, ils privilégient l'utilisation efficiente des machines.

Système manufacturier cellulaire

Le système manufacturier cellulaire (SMC) est un des systèmes manufacturiers que l'industrie de l'habillement utilise principalement pour satisfaire la demande de produits haut de gamme. En effet, les bénéfices potentiels d'implanter le SMC incluent la réduction : du transport de matériels, des temps de mise en course, des tailles de lots, des encours et du temps dans le système, de même que l'augmentation de la production, de la productivité et de la qualité (Wemmerlöv et Hyer 1989). Donc, l'industrie du vêtement des pays industrialisés a un intérêt particulier à utiliser le SMC qui permettrait de satisfaire la demande interne du pays de ce type de produit.

L'implantation du SMC dans l'industrie du vêtement présente des éléments très particuliers et différents aux SMC implantés dans d'autres industries. Il existe deux (2) visions sur la façon de concevoir le SMC. Un de ces courants d'opinions considère qu'afin de profiter des avantages du système manufacturier cellulaire, le système devra être autonome, c'est à dire qu'il devra exister une totale indépendance entre les cellules. Selon d'autres auteurs, la création de cellules autonomes ne convient pas du point de vue économique parce qu'elle implique la sous utilisation de processeurs (machines), donc ils proposent que le SMC permette l'existence de flux intercellulaire.

Dans le cas de l'industrie du vêtement des produits haut de gamme et à cause de ses propres caractéristiques, l'objectif économique n'est qu'un des facteurs à considérer. De plus, les coûts d'investissement et d'utilisation des machines sont relativement moins importants que le coût de la main d'œuvre. Donc, les cellules conçues par cette approche devraient donner la priorité à une utilisation efficiente de la ressource « travailleur » plutôt qu'une utilisation efficiente de la ressource « machine ». Les cellules conçues par cette approche ne tiendront pas en compte l'existence de flux intercellulaire.

L'Approche

Le SMC modélisé par l'approche de ce mémoire devra concevoir des cellules d'assemblage autonomes et reconfigurables, pour chaque produit et pour chaque saison, devra considérer aussi l'existence de deux (2) types de processeurs et devra privilégier l'emploi efficient du processeur « travailleur », tout ça avec un nombre réduit de mises en course. À ce point-ci, on doit mentionner que, à notre connaissance, dans les travaux de recherche une problématique semblable qui considère toutes ces caractéristiques simultanément, n'a pas été encore abordée. Cette approche pourrait être appliquée à des autres industries qui possèdent des caractéristiques semblables à celle de l'industrie de la confection décrites antérieurement.

L'approche est composée de quatre (4) phases, chacune génère de l'information pour la phase suivante. La première de ces phases vise à réduire le nombre de machines candidates à la formation de cellules et ainsi simplifier la problématique de formation de cellules. Il est bien connu que la formation de cellules est très complexe à cause du nombre et du type de variables qui doivent être prises en compte dans sa résolution. Donc, cette première phase consiste en une présélection de machines candidates à la formation de cellules en utilisant l'analyse hiérarchique de procédés AHP, laquelle est une méthode d'analyse multicritère, qui considère des facteurs quantitatifs et qualitatifs et qui déterminent la convenance de la sélection des machines. Cette sélection est faite en assignant des poids aux facteurs mentionnés et en effectuant des calculs pour

déterminer le groupe des machines (alternatives) qui s'avèrent les plus adéquates du point de vue des pondérations faites à chaque facteur.

La deuxième phase emploie l'information sur les machines choisies dans la première étape et de l'information additionnelle sur le processus de production, la demande, les processeurs, etc., afin de réaliser la formation de cellules. La méthode à utiliser est une heuristique de formation de cellules propre à ce mémoire qui sera développée en se basant sur l'heuristique présentée par Beaulieu et al. (1997), laquelle aborde une problématique de formation de cellules dans l'usinage de pièces qui ne considère pas l'assemblage des pièces. De plus, cette heuristique considère seulement l'existence d'une seule saison par période d'analyse et un seul type de processeur. Dans cette phase, on génère des scénarios de SMC différents chacun dans sa composition.

La troisième phase consiste en la simulation des scénarios du SMC en utilisant un modèle de simulation par événements discrets qui est conçu spécialement pour notre approche. La simulation donne de l'information additionnelle sur le comportement des scénarios de SMC dans l'occurrence des événements stochastiques comme la demande, les temps d'opération, l'arrivée des pannes, la durée des pannes et les rejets. La simulation génère l'information sur les mesures de performance des scénarios de SMC tel que le temps dans le système de chaque produit, le temps de cycle de production par produit, le taux d'utilisation des machines, le taux d'utilisation des travailleurs, le nombre de déplacements des travailleurs, le nombre de mises en course, le temps moyen de pannes et le nombre de pièces rejetées.

La quatrième étape consiste en l'évaluation des scénarios de SMC avec l'objectif de sélectionner le meilleur d'entre eux. Pour cela, on considère l'information générée par la simulation et l'information additionnelle des processeurs et le SMC modélisé. La méthode à employer est, comme dans la première phase, l'analyse hiérarchique de

procédés (AHP) qui réalise l'analyse des critères multiples qui font référence principalement aux mesures de performance obtenues par la simulation.

L'organisation de ce mémoire est comme suit. Dans le premier chapitre, on présente la révision de la littérature des travaux de recherche faits sur la conception de SMC, les chaînes d'approvisionnement, les méthodes de formation de cellules, la simulation de systèmes manufacturiers et l'évaluation de systèmes complexes qui demandent une analyse de plusieurs critères à la fois. Le deuxième chapitre présente la méthodologie qu'on emploiera, dans le développement de l'approche, dans chacune de ses phases. Les chapitres 3 à 6 présentent les 4 phases de l'approche. Dans le septième chapitre, on présente un exemple qui permet de voir l'application de l'approche. Finalement, on présente les conclusions et recommandations finales du mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 Introduction

Le présent chapitre fait une révision des articles de recherche réalisés autour de l'industrie de la confection quant à ses systèmes de chaînes d'approvisionnement et systèmes de production. On présente aussi des études réalisées sur la conception de systèmes manufacturiers cellulaires (SMC), des études sur les différentes approches pour réaliser la formation de cellules, la simulation et l'évaluation du SMC.

1.2 L'industrie de la confection

1.2.1 Chaînes d'approvisionnement

Comme plusieurs autres industries, l'industrie de l'habillement doit faire face à des conditions très compétitives du marché. La concurrence globale, la croissance du pouvoir de décision des consommateurs et l'évolution de la technologie exigent que cette industrie développe des nouvelles stratégies de production.

Les pressions du marché, qui exigent des prix plus bas et une grande qualité, ont amené cette industrie à chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Ainsi, l'industrie du vêtement, dans les pays développés, a déplacé ses centres de production vers les pays en voie de développement afin de réduire ses coûts de main-d'œuvre. Ces coûts sont particulièrement importants dans cette industrie, parce que « l'industrie du vêtement est décrite comme l'industrie utilisant la main d'œuvre de façon plus intensive que toute autre industrie » (Vought, 1990). Les coûts de main d'œuvre représentent entre 30 % et 50 % du coût final du vêtement (Lin et al., 2002).

Le déplacement des centres de production a obligé ce secteur à développer des stratégies de gestion des chaînes d'approvisionnement de plus en plus performantes qui cherchent à réduire les coûts d'approvisionnement des produits vers les centres de consommation.

Présentement, l'industrie de la confection des pays développés reçoit des pressions additionnelles à l'exigence de bas prix et de haute qualité. Ces pressions exigent la livraison en temps réduit (réactivité) d'une grande variété de styles (flexibilité). De plus, il existe une pression interne au pays pour revitaliser l'industrie manufacturière de ce secteur qui a souffert d'une perte considérable d'emplois dans les deux dernières décennies.

Pour toutes ces raisons, l'industrie de la confection complète ses systèmes de gestion de chaînes d'approvisionnement d'optimisation de coût avec d'autres qui permettent d'être plus réactive et flexible face à la demande, principalement pour des produits de prix élevés ou haut de gamme.

Les systèmes de gestion *Lean Supply* et *Agile Supply* font partie de cette évolution de systèmes de gestion de chaînes d'approvisionnement dans l'industrie de la confection. « Le système de gestion *Lean Supply* a comme principal objectif l'élimination de pertes, le temps inclus, afin de réduire le niveau de stock » (Naylor et al., 1999). L'élimination des pertes se réalise en agissant contre les causes de variation interne, ce qui permet de réduire le niveau de stock pour permettre un flux continu. Pour avoir un taux de production stable, il est aussi nécessaire de découpler l'effet des variations externes comme la variation de la demande en établissant un niveau de stock. Le système de gestion *Agile Supply* a comme objectif la réponse rapide à la demande d'une variété de produits avec une demande incertaine. Ces produits sont généralement des produits innovateurs avec demande instable qu'on trouve principalement dans l'industrie de la mode. Le tableau 1.1 élaboré par Masson-Jones et al. (2000), présente les caractéristiques distinctives des deux systèmes de gestion.

Tableau 1.1

Caractéristiques distinctives de *Lean* et *Agile Supply*
(Adaptation de Masson-Jones et al., 2000).

Caractéristiques distinctives	<i>Lean Supply</i>	<i>Agile Supply</i>
Type de produit	Standard	Mode
Demande	Stable	Instable
Variété de produit	Basse	Haute
Cycle de vie du produit	Long	Court
Objectif	Coût	Temps de livraison
Pénalités de livraison	Contractuelle longue date	Perte de la commande
Politique d'achat	Produit spécifique	Capacité assignée
Information	Désirable	Important

Il existe aussi un système hybride appelé *Leagile Supply Management* qui réalise une combinaison des approches *Lean* et *Agile* en un point de découplage afin de réaliser une gestion optimale de la chaîne d'approvisionnement. (Naylor et al., 1999; Masson-Jones et al., 2000).

Les systèmes de gestion *Lean* sont associés au système de production en amont et les systèmes de gestion *Agile* sont associés aux systèmes de production en aval, ces derniers possèdent des mécanismes qui servent à synchroniser la production avec la demande (Rollins et al., 2003).

1.2.2 Systèmes de Production

Le système de production est l'intégration de moyens de manutention, procédés de production, de personnel et d'équipement que dirige le flux de travail et génère des produits finis.

On peut identifier cinq types de systèmes de production par procédé, par produit, par projet, en continu et le système manufacturier cellulaire (Black, 1991).

Le système de production constitue une partie très importante de la stratégie compétitive des industries parce qu'il peut donner à l'entreprise des avantages quantitatifs et qualitatifs face à la concurrence. Avantages tels que la réduction du coût de production, la réduction de temps de livraison, la flexibilité de la production de différents modèles, etc.

Les systèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement demandent un système de production approprié pour accomplir ses objectifs de gestion. En général les objectifs considèrent le coût, la qualité, la livraison et la flexibilité (Lin et al. 2002).

Coût : Le prix de la production d'un produit.

Qualité : La concordance de la performance du produit aux préférences du consommateur dans l'acceptation du produit.

Livraison : La vitesse et le service au client.

Flexibilité : La variété et la quantité de produits disponibles pour satisfaire les exigences du consommateur.

Le nombre de styles dans l'industrie du vêtement est plus grand que dans n'importe quelle autre industrie (Kotabe, 1992; MacDuffie, Sethuraman et al., 1993), l'exigence de production de plusieurs styles a un impact négatif sur la performance du système de production en exigeant temps d'arrêt, recalibrage des équipements, et reconfiguration du processus d'assemblage, ce qui signifie une augmentation de coûts et des temps de livraison plus longs (Meredith, 1981).

1.2.2.1 Systèmes manufacturiers dans l'industrie de la confection

Il existe plusieurs systèmes de production, mais les plus importants utilisés dans l'industrie de la confection sont *Bundle System* (BS), *Progressive Bundle System* (PBS) et le système manufacturier cellulaire (SMC).

1.2.2.1.1 *Bundle System* (BS)

Dans ce système, des pièces coupées sont assemblées par lots, elles sont distribuées aux groupes de stations de travail qui réalisent les opérations spécifiques de couture (Cole, 1988). Ces lots se déplacent de façon séquentielle d'un entrepôt central à chaque station de travail et vice-versa, pour continuer avec la prochaine station (Solinger, 1988), comme on le représente dans la figure 1.1. Chaque station est hautement spécialisée de même que les travailleurs assignés à chaque station. L'objectif est d'obtenir une haute productivité et un grand volume de production. Le système de production BS est le plus ancien système employé dans l'industrie de la confection et il est encore utilisé dans plusieurs usines (Lin et al., 1995).

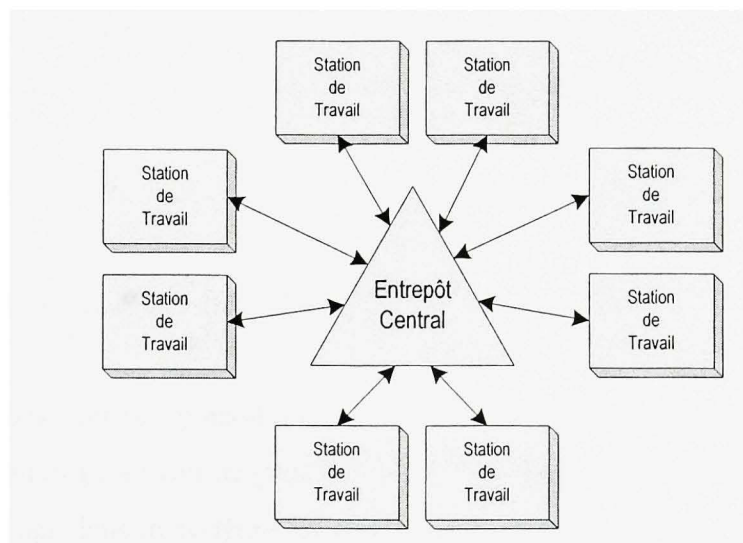


Figure 1.1 *Bundle System* (BS).

1.2.2.1.2 Progressive Bundle System (PBS)

Le *Progressive Bundle System* est une variation du système BS où les stations sont regroupées pour créer des centres experts (Cooklin, 1991). Les machines qui réalisent des opérations similaires sont placées ensemble, et les opérations subséquentes sont placées séquentiellement pour réaliser un flux direct entre les centres experts (voir figure 1.2); les machines et les opérations sont hautement spécialisées et interchangeables.

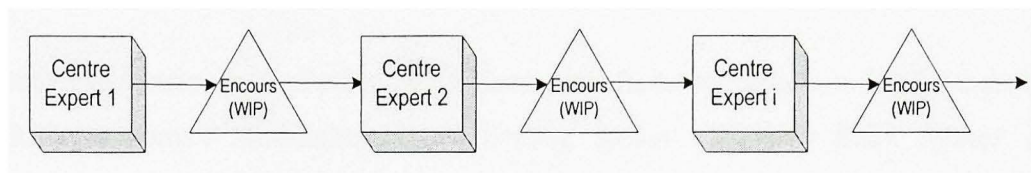


Figure 1.2 *Progressive Bundle System (PBS)*.

Avantage des Systèmes BS et PBS

Chaque travailleur est responsable de ses revenus et il est permis de travailler dans son propre espace (Cole, 1988). Ce système récompense la productivité individuelle, chaque travailleur produit autant de pièces que possible sur sa station.

Les systèmes BS et PBS sont généralement associés au coût, le BS peut être le système plus productif à cause de la haute spécialisation des stations du travail, les opérateurs sont hautement productifs à cause de la répétition constante du même type d'opérations.

Désavantage des Systèmes BS et PBS

- Le stock doit être poussé à travers la ligne de production pour permettre le flux, ce qui amène à avoir de grands niveaux d'encours (Suri, 1986; Cole, 1988).
- Le temps dans le système est généralement long à cause du temps d'attente des encours. Il peut se comptabiliser en termes de semaines ou de mois, mais il est vu comme un coût normal de l'industrie (Gilbert, 1991).

- Les coûts d'investissements en stocks peuvent s'avérer être une limitation pour la disponibilité du capital.
- La direction voit les travailleurs comme des ressources qui réalisent des tâches mais qui sont inhabiles à penser (Solinger, 1988).
- Les travailleurs sont séparés du produit final et la qualité est souvent sacrifiée à cause d'un manque d'identification avec le produit (Im et Schönberger, 1988).

1.2.2.1.3 Système manufacturier cellulaire (SMC) dans l'industrie de la confection

Dans l'industrie de confection, le système manufacturier cellulaire SMC est connu sous plusieurs noms : *Modulaire*, *Toyota Sewing System*, *Flexible Work Group (FWG)*, *Team Work*, *U-Shaped cells*, *Stand up system*, etc.

Le *American Apparel Manufacturers Association (AAMA)* a défini le système manufacturier cellulaire (modulaire) comme « une unité contenue et maniable de travail de 5-17 personnes qui réalisent des opérations mesurables. Les opérateurs sont interchangeables parmi les opérations du groupe, la compensation est établie par production de produits de première qualité » (Gilbert, 1990). La figure 1.3 montre un exemple de disposition des machines et travailleurs dans un SMC.

Le SMC dans cette industrie est défini comme un système de production en équipe qui possède les caractéristiques suivantes :

- L'unité de production est une pièce (vêtement).
- Les composants d'un vêtement sont introduits dans la ligne d'assemblage à l'unité, de telle façon qu'il n'existe pas de déplacement de lots.
- Les composants sont transférés à la main ou quelque fois on utilise des « *kanbans* » pour la prochaine opération.

- Les travailleurs sont versatiles et interchangeable entre les opérations. De plus, ils sont impliqués dans la prise de décisions.
- Le système de compensation est basé sur la production.

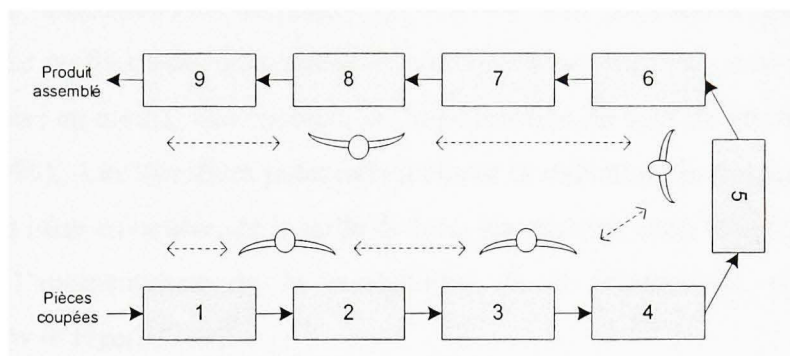


Figure 1.3 Cellule du système manufacturier cellulaire (SMC).

Avec le flux de produits main à main et la prise de décisions en ligne, les opérateurs sont encouragés à évaluer et améliorer la qualité durant la fabrication.

Les systèmes BS et PBS sont recommandables pour des produits standard avec peu de variations de style, par contre le SMC est associé avec la qualité et la flexibilité (*The [TC]2 Manufacturing*, 1995). Habituellement, les entreprises de confection combinent ou adaptent ces systèmes pour atteindre les besoins spécifiques de production de chaque produit.

1.3 Systèmes manufacturiers cellulaires (SMC)

Le système manufacturier cellulaire est un système qui produit des familles de pièces dans une ligne de production simple ou dans une cellule constituée de machines servies par des opérateurs ou des robots (Jeon et al., 1998).

Dans chaque cellule, il existe des machines dissemblables mais séquentiellement liées, placées à proximité l'une de l'autre pour produire une famille de pièces ou produits. Les

pièces ou produits sont similaires dans ses besoins de processus et d'opérations, de tolérances et de capacités d'outillage des machines (Wemmerlöv et Hyer, 1989).

Le système manufacturier cellulaire (SMC) est une alternative prometteuse pour surmonter les inefficiences du système de production par procédé quant à la réduction de temps de mise en course, des encours, et l'amélioration du taux de production (Sarker et Mondal, 1999). Les bénéfices potentiels incluent la réduction du transport de matériels, du temps de mise en course, de la taille de lots, des encours et du temps dans le système, ainsi que l'augmentation de la production, de la productivité et de la qualité (Wemmerlöv et Hyer, 1989).

Les bénéfices ne se limitent pas aux opérations existantes, puisque le SMC se constitue comme un système manufacturier flexible (FMS) et il est une étape dans l'implantation d'autres technologies comme les systèmes manufacturiers intégrés (IMPS) (Black, 1991).

L'implantation du SMC présente des différences importantes selon le type d'industrie. Par exemple dans l'industrie d'usinage, le SMC peut être implanté avec des processeurs totalement automatisés ou semi-automatisés avec un minimum d'opérateurs; par contre dans l'industrie de la confection, la participation des opérateurs est très importante à cause de son utilisation intensive.

Le tableau 1.2 résume les différences de base des caractéristiques opérationnelles et technologiques du système manufacturier cellulaire (ou *Flexible Work Group*) dans les industries d'usinage et de la confection.

Tableau 1.2

Contraste opérationnel et technologique dans l'implantation de FWG dans les industries de vêtement et de l'usinage (Adapté de Chen, 1998).

Caractéristiques	Confection	Usinage
Machine/équipement	Principalement manuelle ou semi-automatique.	Principalement des machines contrôlées numériquement et interconnectées à un centre de contrôle.
Transport de matériaux	Manuel	Systèmes de transport contrôlés par ordinateur.
Systèmes de contrôle	Peu. Basés sur la coordination manuelle.	Total. Réalisé par ordinateur.
Utilisation de la main d'œuvre	Intensive. Les opérateurs sont nécessaires pour presque toutes les stations de travail.	Minime. Les opérateurs sont nécessaires seulement pour la charge/décharge et l'outillage.
Management	Auto gestion de l'équipe de travail. Les travailleurs sont encouragés pour résoudre les problèmes.	Planifié et contrôlé par un superviseur. Limité par la planification des besoins matières (MRP) et les plans d'assemblage.

Un type spécial de SMC est la ligne de production en *U* qui est dans la production juste à temps (*JIT*). Additionnel au concept général de SMC, en *JIT* chaque cellule est améliorée par travailleurs et/ou stations mobiles en une configuration en forme de « U » laquelle augmente la possible interaction des employés (R.S. Russell, 1991). Dans ce système, on applique les principes de production en aval où le flux de pièces est à l'unité (en flux tiré), et on emploie des opérateurs qui peuvent réaliser toutes les opérations. Les caractéristiques de ces systèmes sont décrites en la section 1.2.2.1.3.

1.3.1 Formation de cellules

« La formation de cellules (FC) est un problème complexe qui a été amplement étudié, elle est sans doute la problématique la plus étudiée du système manufacturier cellulaire » (Wemmerlöv et Johnson, 2000).

La formation de cellules (FC) est l'étape initiale du processus de conception de cellules de manufacture. Dans cette étape on identifie les ressources nécessaires pour chaque cellule en équipement et travailleurs, ainsi que la famille de pièces ou de produits à traiter dans chaque cellule. Il existe plusieurs facteurs à considérer pour la formation de cellules comme le taux de production des machines, le temps de mise en course, l'utilisation, la charge du travail, les alternatives de routage, les capacités de machines, les séquences d'opération, et les coûts de mise en course et d'aménagement de la cellule (Sarker et Yi, 2000).

Le problème de formation de cellules peut se définir comme suit :

« Si on connaît le nombre, le type, la capacité de production de chaque machine, le nombre et le type de pièces à traiter, le routage et les temps de production de chaque pièce; quelles machines et quelles pièces associées, devront être regroupées ensemble pour former les cellules » (Selim et al. 1998).

Cette définition de la problématique de formation de cellules s'élargit quand on considère en plus l'existence de plusieurs saisons, la considération d'opérations d'assemblage et l'ajout de la ressource « travailleur », des aspects qui sont considérés dans ce mémoire.

« La Technologie de Groupe (TG) est une philosophie de manufacture qui s'occupe de la simplification et standardisation d'entités similaires, de pièces sous-ensembles, de plans de processus, d'outils, d'instructions, etc.; avec l'objectif de réduire la complexité et d'atteindre les bénéfices des économies d'échelle en la production par lots » (Tatikonda, 1992). La technologie de groupe a été conçue pour la première fois en 1917 en URSS (Bedworth et al. 1991).

Une application de la Technologie de Groupe est le système manufacturier cellulaire. La TG est appliquée pour la formation de cellules, dans laquelle les composants identiques ou semblables sont regroupés systématiquement de façon que tous les éléments d'un même groupe soient sujets à des traitements communs et ainsi obtenir une production économique.

1.3.2 Techniques de formation de cellules

Il existe plusieurs techniques pour appliquer la technologie de groupe, des méthodes qui utilisent des techniques empiriques telles que les méthodes visuelles en passant par des méthodes plus systématiques comme les méthodes de codage qui comprennent la formulation matricielle, la programmation mathématique et la formulation graphique (Kusiak, 1992).

Une classification des techniques utilisées dans la formation de cellules basée sur la méthodologie générale de résolution est présentée par Selim et al. (1998). Cette classification est présentée dans la figure suivante.

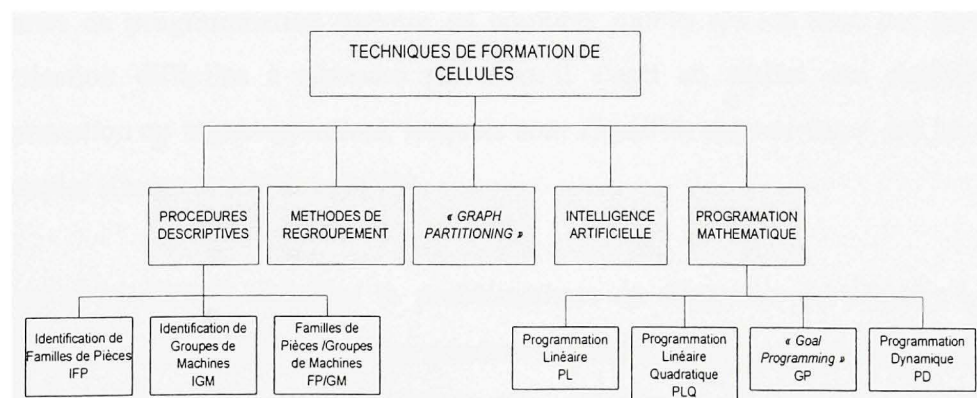


Figure 1.4 Classification des techniques de formation de cellules (Selim et al., 1998).

Pour l'application on a choisi les méthodes de programmation mathématique et les méthodes de regroupement.

1.3.2.1 Programmation linéaire en nombres mixtes

La Programmation Linéaire fait partie du groupe des techniques de Programmation Mathématique. Elle est très importante parce qu'elle trouve la solution optimale, c'est-à-dire la solution qui maximise (ou minimise) la fonction objective.

Un problème de programmation linéaire en nombres mixtes est un programme linéaire, c'est-à-dire une fonction objective linéaire à maximiser ou à minimiser, sous des contraintes linéaires, dans lequel les contraintes supplémentaires indiquent qu'un sous-ensemble de variables doit être entière et les autres réelles.

La formulation du problème en termes de PLM, est très courante parce que les problèmes de formation de cellules possèdent généralement des variables entières (machines, travailleurs, pièces, etc.) et des variables réelles (capacité utilisée, nombre de machines achetées, travailleurs embauchés et licenciés, production par cellule).

À la différence de la programmation linéaire (PL) où toutes les variables sont réelles, les problèmes de programmation linéaire en nombres mixtes (PLM) sont des problèmes d'optimisation difficiles à résoudre parce qu'il s'agit en réalité des problèmes de programmation en nombres entiers, lesquels sont classifiés comme étant des problèmes NP-complet (Garey et Johnson, 1979).

Beaulieu et al. (1997) abordent la problématique de formation de cellules avec un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes. Dans ce modèle, les cellules sont formées en considérant l'allocation de la seule ressource machine aux cellules formées pour une seule saison. Ce modèle considère deux types de flexibilité : flexibilité de machines et flexibilité de routage. La première est la capacité des machines à réaliser différentes opérations sur des pièces différentes. La deuxième est la possibilité de traiter des pièces similaires en suivant différentes routes en même temps. Cette étude indique

l'impossibilité de résoudre le problème du à la complexité de résolution d'un tel modèle, puisque le temps de résolution augmente de façon exponentielle en relation avec l'augmentation du nombre de cellules, de pièces, d'opérations et de machines. Donc, on propose l'alternative de résolution en utilisant une heuristique de formation de cellules.

Selim et al. (1998) présentent la formulation mathématique en forme de programmation en nombres entiers du problème général de formation de cellules. Cette formulation considère les coûts d'achat et d'utilisation de machines et son assignation, l'outillage, le transport des matériaux dus au flux intercellulaire et l'assignation des travailleurs aux cellules. En plus de cette formulation, on fait une révision des formulations présentées à cette date et on conclut qu'aucune formulation n'avait pas considéré la ressource « travailleur ».

1.3.2.2 Méthodes heuristiques

Les outils ou méthodes heuristiques sont des alternatives très fréquemment utilisées face à la difficulté de résolution par l'approche analytique. L'heuristique vise à trouver une solution réalisable à la différence de la Programmation Linéaire qui vise à trouver la solution optimale.

Une heuristique utilise des règles empiriques, pratiques, simples et rapides, facilitant la recherche des faits et l'analyse de situations, dans un objectif de résolution de problèmes et de prise de décision.

Les heuristiques, quand elles sont utilisées dans les méthodes de regroupement, elles utilisent différents types de coefficients de similarité de pièces, de machines, de pièces-machines, de séquence d'opérations, etc. Quelques-uns sont très connus comme le coefficient Jaccard de McAuley (1972), le *Commonality Score* proposé par Wei et Kern (1989) et le coefficient de dissimilitude *Average Voids Value Method* de Yasuda et Yin

(2001). La bonne performance de l'heuristique dépend beaucoup de la sélection adéquate du coefficient de similarité.

Entre les différentes heuristiques développées pour la formation de cellules, il se démarque celle de Vakharia et Wemmerlöv (1990). Ils présentent une heuristique qui considère les objectifs et contraintes suivantes : l'indépendance de chaque cellule, la flexibilité, l'aménagement interne et externe aux cellules, la taille de la cellule, le niveau d'utilisation de la cellule et l'investissement additionnel. L'approche possède quatre étapes : la première comprendre une méthodologie pour accumuler d'information sur les séquences d'opérations, la prévision de la demande, l'estimation du temps de processus, la capacité des machines et l'investissement pour le nouvel équipement. La deuxième comprendre l'analyse de l'information pour identifier les opérations simples et doubles, et séparer les opérations qui provoquent des reculs dans le flux. Dans la troisième étape les pièces sont regroupées pour réduire le nombre de séquences d'opérations. Finalement, dans la quatrième étape, les lignes de production sont formées en considérant la séquence d'opérations ainsi que le niveau de similarité. Les familles de pièces sont formées en utilisant un coefficient de similarité de séquence d'opérations, puis les machines sont assignées à chaque famille de pièces et un aménagement interne est déterminé en considérant la charge de machines.

Beaulieu et al. (1997) présentent une alternative de résolution du problème de formation de cellules en utilisant un algorithme qui utilise un coefficient de similarité entre les cellules pour réaliser l'agrégation respective. Cet algorithme utilise aussi une heuristique de sélection de machines. L'algorithme considère le taux d'utilisation, la flexibilité des machines et la flexibilité de routage tout en respectant la séquence d'opérations, ainsi que d'autres facteurs tels que le taux de disponibilité des machines (*up time ratio*) et le taux de rejet par machine et opération. L'algorithme proposé utilise une résolution itérative du problème, en deux étapes : l'agrégation de cellules et la sélection des machines. La première détermine la paire de cellules à agréger, elle est faite en utilisant

un coefficient de similarité calculé pour chaque paire de cellules par rapport à l'utilisation du même groupe de machines. Elle priorise les machines ayant une versatilité majeure dans l'hypothèse qu'une machine qui est capable de faire plusieurs tâches coûte moins cher que l'ensemble des machines moins versatiles qui seraient nécessaires pour faire les mêmes tâches. Dans le cas où plus d'une paire de cellules posséderait des machines également versatiles et conséquemment le même coefficient de similarité, on évalue l'utilisation moyenne des machines et on choisit la paire avec l'utilisation la plus basse de machines, cela est fait avec l'intention de réduire le coût variable (d'opération), et conséquemment le coût total. La deuxième étape, consiste en une heuristique qui sélectionne les machines de façon à réduire le coût total. Pour cela, on évalue les coûts de différents types de charges ou d'assignations d'opérations aux machines candidates, en utilisant une méthode qui réalise la charge et décharge des opérations. Tant la méthode d'agrégation comme l'heuristique de sélection de machines ne sont pas exactes, parce qu'elles sont des méthodes qui analysent l'ensemble du problème (complexe) de façon partielle, c'est-à-dire décomposent le problème principal en sous-problèmes qui sont résolus séparément. Cette approche de résoudre le problème séparément, ne considère pas les interactions des différents facteurs. En conséquence, l'algorithme n'est pas exact comme une approche analytique, mais il génère une solution faisable dans un temps acceptable.

Prabhakaran et al. (2002), proposent un algorithme basé sur un coefficient de dissimilitude, lequel est contraire aux coefficients normalement utilisés pour faire le regroupement, ce coefficient est utilisé pour la formation de familles de machines. Ces familles constituent les cellules auxquelles sont assignées les pièces en minimisant le flux intercellulaire et maximisant la charge de travail dans chaque cellule. De façon similaire Yasuda et Yin (2001) ont développé un algorithme qui utilise un coefficient de dissimilitude. Tout d'abord, on montre les limitations de deux coefficients de similarité et on présente ensuite une mesure de dissimilitude qu'on appelle AVV (*Average Voids Value*) laquelle est calculée pour chaque paire de machines. On sélectionne les machines

ayant les plus bas AVV pour former la famille de machines et on suit un processus itératif jusqu'à une condition d'arrêt définie par le nombre des machines à inclure dans la cellule.

1.3.3 Évaluation des différentes techniques

L'article de Selim et al. (1998), fait une révision de la recherche réalisée sur la formation de cellules, et on découvre qu'en général, les études ont fait emphase sur le développement des techniques plutôt que sur l'évaluation des contributions actuelles. La révision réalisée dans cet article présente une comparaison et une évaluation critique des différentes méthodes utilisées dans la résolution de la problématique de formation de cellules. Cette comparaison est plutôt descriptive parce que les objectifs considérés et les besoins d'information des méthodes comparées sont différents entre eux. En plus de la comparaison, l'article présente un modèle mathématique général pour la formation de cellules. Les auteurs recommandent entre autres, que plusieurs des techniques de regroupement les plus connues devraient considérer le niveau d'utilisation des machines et la existence de machines multiples du même type. Un autre facteur à considérer devrait être l'inclusion de la flexibilité opérationnelle des machines actuelles.

L'existence de plusieurs méthodes qui essaient de trouver la meilleure formation de cellules exige le développement des techniques de comparaison quantitatives. Sarker et Mondal (1999) réalisent une compilation et révision de plusieurs techniques de mesure de l'efficacité des méthodes de regroupement. On analyse 13 indicateurs d'efficacité, qui reflètent le degré ou la capacité de former une matrice diagonale. L'étude considère en plus les temps de traitement, le volume de production, etc.; mais aucune mesure d'efficacité ne considère pas le coût, lequel est un facteur très important pour la formation de la cellule. Une conclusion faite par cet article indique l'impossibilité de trouver une échelle universelle de mesure de l'efficacité pour le système manufacturier cellulaire, cela à cause de l'existence de plusieurs facteurs et objectifs à accomplir pour

le système. Une des faiblesses, qui est généralisée à la plupart des techniques, est la considération d'un seul objectif pour l'identification des cellules. Il est bien connu que la problématique de formation de cellules cherche à accomplir plusieurs objectifs, et traiter plusieurs facteurs. De nouvelles études tiennent compte de plus en plus de cette observation. Ainsi, Su et Hsu (1998) proposent un modèle avec trois objectifs : la minimisation du coût total de transport intercellulaire, l'investissement en machinerie et le transport intracellulaire, la minimisation du déséquilibre de la charge intracellulaire des machines et la minimisation du déséquilibre de la charge intercellulaire des machines. Le modèle regroupe ces objectifs en leur donnant des poids. Le modèle est résolu en utilisant la méthode du recuit simulé (*parallel simulated annealing*) qui est une méthode meta-heuristique bien connue.

Au cours des dernières années, plusieurs recherches se sont intéressées à l'amélioration des méthodes existantes, en incorporant des facteurs qui sont considérés comme importants et que les modèles antérieurs négligeaient. Ces améliorations des études avec des problématiques semblables sont surtout relatives à la diminution du temps de résolution et l'obtention de résultats plus proches des résultats optimaux entre autres.

1.3.4 Application des techniques modernes de formation de cellules

La problématique de formation de cellules a été l'objet de beaucoup d'attention, tant qu'il existe plusieurs méthodes pour la résoudre, malheureusement la plupart des techniques, très élaborées, sont hautement théoriques et dans la plupart des cas elles sont inapplicables dans un problème réel. Chaque étude aborde la problématique générale, mais à cause des simplifications du modèle elle finit par résoudre une problématique très particulière qui fort probablement ne représente aucun cas de la réalité. Selon une enquête, réalisée par Wemmerlöv et Johnson (2000), dans les industries du secteur métallurgique aux États Unis, on constate que dans l'application pratique de formation de cellules, les méthodes développées par des chercheurs sont très peu connues et même

ne sont pas utilisées. Donc, il est important d'analyser la raison pour laquelle ces méthodes abondamment étudiées ne font pas l'objet d'application pratique. La réponse peut se trouver dans l'excessive simplification de la problématique abordée. Un autre motif pourrait être le manque de vulgarisation de ces approches.

Il n'existe pas une méthode pour comparer les différentes approches à cause de la grande différence existant entre les problématiques abordées. De cette façon, il est difficile de dire quelle méthode est la plus adéquate pour résoudre un problème d'une industrie spécifique.

La recherche réalisée jusqu'à présent est vaste, et continue en quête des solutions à des problèmes partiels et idéaux. La recherche future devrait se diriger vers l'application et l'adaptation des méthodes existantes, et le développement de nouvelles méthodes pour la résolution des problématiques semblables à des secteurs industriels spécifiques.

Dans l'enquête réalisée par Wemmerlöv et Johnson (2000), on apprend que 24 % des entreprises étudiées n'avaient réalisé aucune étude préliminaire sur la performance de la cellule avant son implantation. De la même façon, des études sur la diffusion de la simulation de systèmes manufacturiers cellulaires devraient être développées afin d'être applicables avant leur implantation.

1.4 Systèmes manufacturiers cellulaires focalisés (SMCF)

Une des limitations que présente le système manufacturier cellulaire SMC réside dans sa flexibilité. Évidemment, en comparaison à l'aménagement par procédé, la création de cellules manufacturières amène à une réduction dans la flexibilité de routage, donc un déséquilibre de la charge des cellules pourrait amener à une augmentation du temps de production (Suresh et Meredith, 1994). Conséquemment le système augmente son temps de réponse à la demande, ce qui provoque une moindre réactivité du système.

Wemmerlov et Hyer (1989) suggèrent qu'une organisation cellulaire, basée sur affiliation de ligne de produit (à la place de la similarité de composants), pourrait donner au système la capacité de réagir rapidement aux demandes du marché. Dernièrement, un système manufacturier a fait irruption comme une alternative au SMC qui permettrait d'être plus réactive à la demande. Ce système est connu comme Système Manufacturier Cellulaire Focalisé (SMCF), il est défini comme un système d'aménagement qui regroupe les composants par produits finaux et forme des cellules de machines pour produire et assembler des produits finaux (Al-Mubarak et al. 2003). Selon cet article dans lequel on réalise la comparaison entre le SMC et le SMFC, l'avantage principal de ce dernier est sa capacité à réduire les temps de production des produits assemblés finaux et sa capacité à réduire les encours tout en conservant un degré de flexibilité. De plus, un autre avantage réside dans la facilité de son implantation dans les entreprises ayant peu de produits en grands volumes de production et dans celles ayant plusieurs produits en petits volumes. Par contre, le désavantage majeur serait le possible déséquilibre causé par une variation dans le taux de croissance de la demande.

1.5 Cellules virtuelles

Il est bien connu que face aux demandes très variables en quantité et en nombre de produits, le système cellulaire n'est plus performant du à sa flexibilité limitée. Avec l'objectif d'adapter le système manufacturier cellulaire à cette nouvelle problématique, le concept des cellules virtuelles a été développé où l'identité des cellules change avec les variations des besoins de production, mais l'emplacement reste fixe. Mak et Wang (2002) proposent une approche pour la formation de cellules virtuelles, un modèle mathématique est proposé pour la formation de cellules. Il détermine les stations de travail et les autres ressources de travail qui devront être regroupées pour former la cellule virtuelle; il détermine aussi le taux de production de chaque pièce et finalement le temps pour la naissance et la mort de la cellule virtuelle. Pour l'étape

d'ordonnancement, on propose un algorithme d'ordonnancement de la production basé sur un algorithme génétique avec quelques variations par rapport aux modèles classiques, cet algorithme minimise le coût de transport. D'autres études sur cette même problématique sont proposées par Baykasoglu (2003), et Ko et Egbelu (2003).

En plus de ces études, il en existe d'autres qui incorporent des facteurs comme l'aménagement du SMC (Bazargan-Lari et al., 2000), la planification de la production (Schaller et al., 1998), la fluctuation de la demande (Wicks et Reasor, 1999), ou encore la maximisation de la flexibilité du système (Kochikar et Narendran, 1998).

1.6 Simulation

« La simulation implique la modélisation d'un procédé ou d'un système de telle façon que le modèle imite la réponse du système actuel aux événements qui apparaissent dans le temps » (Schriber 1987).

L'utilisation de la simulation ajoute au modèle le caractère stochastique des variables et l'effet temporel des événements discrets ou continus. De cette façon, on peut analyser en mode dynamique le modèle simulé, ce qui permet la vérification de l'exactitude des performances prévues par les outils de formation.

La simulation débute avec la construction du modèle. « La construction d'un modèle de simulation d'un système pour un objectif donné est aussi un art comme une science » (Law et Kelton, 2000). Le modèle doit considérer les aspects les plus importants du système réel afin de pouvoir tirer des conclusions valables.

Il existe deux types de logiciels qui sont utilisés dans la simulation de systèmes : les langages de simulation d'usage générale comme ARENA et Visual Slam qui nécessitent une expertise en programmation; et les simulateurs comme ProModel, MAST,

STAR*CELL, qui sont des logiciels dédiés à la simulation de systèmes spécifiques, ils demandent peu ou pas d'expertise en programmation, mais ils possèdent une flexibilité mineure pour représenter un système complexe.

La simulation a été employée dans des travaux de recherche sur le système manufacturier cellulaire. Un des premiers travaux de recherche de ce type est celui de Shunk (1976), qui utilise la simulation pour évaluer la performance de ce système. Le système objet d'analyse est un système hybride qui est l'intégration entre un système cellulaire et un système par procédé. Il conclut que le système le plus performant est un système qui se trouve entre le système par procédé et le système cellulaire.

Dans l'industrie de la confection de vêtements, la simulation a été employée pour la compréhension et l'évaluation du système cellulaire. Le SMC est nommé différemment et présente de légères différences qui sont plutôt des variations qui cherchent à obtenir une amélioration de la performance. Wang et al. (1991) utilisent la simulation comme outil pour évaluer un système manufacturier modulaire (cellulaire). Ils utilisent le programme de simulation orientée objet WITNESS. Le modèle de simulation présenté s'avère être un outil adéquat pour démontrer les avantages du système manufacturier comme la réduction des encours, la pleine utilisation du travailleur, la réduction de l'impact sur la production à cause de l'absentéisme.

Schröer et al. (1996) développent un simulateur générique pour la modélisation de modules de manufacture. Ce simulateur utilise le logiciel de simulation WITNESS, et il a été développé afin de réduire les difficultés dans la modélisation de ce type de systèmes. Le simulateur est assez flexible et permet de changer la taille du lot. On peut fixer trois règles de déplacement des travailleurs. Le simulateur réalise la simulation d'un module ou cellule à la fois, il ne considère pas les temps de déplacement des travailleurs.

Black et Chen (1995) réalisent la simulation du système manufacturier *Toyota Sewing System* (TSS) ou *Stand-up System*. Ils utilisent le logiciel de simulation ProModel pour étudier la relation entre la variation de temps dans le système et la taille du stock tampon entre les stations qu'ils nomment *decoupler*. Ils concluent que la variation du temps d'opération des stations de travail a un impact négatif sur le taux de production du système et qu'une augmentation de la taille du *decoupler* améliore le taux de production. Cette amélioration est possible jusqu'à une grandeur de deux (2) unités, après cette valeur l'amélioration est marginale.

Khan (1999) utilise le logiciel Excel pour effectuer la simulation d'un système de réparation des machines d'une ligne de production. Le principal objectif est de déterminer la combinaison la plus économique de réparateurs et de machines de réserve. Son modèle montre l'efficacité d'Excel pour réaliser la simulation de ce type de problèmes.

Irizarry et al. (2001) présentent un modèle général de simulation de cellules de manufacture en SLAM II. Ils évaluent une fonction de coût annuel des différentes alternatives de configuration d'une cellule et obtiennent de l'information qui est évaluée dans une analyse de surface de réponse qui fait partie d'un modèle plus ample de conception et d'analyse de cellules manufacturières. Le modèle présenté est assez flexible pour analyser plusieurs types de cellules de production, mais ils suggèrent d'adapter leur modèle avec le soutien de simulation AweSim et le langage de programmation C++.

Gagné (2002) présente un modèle général de simulation du système manufacturier cellulaire. Il utilise le langage de simulation SLAM II avec le logiciel AweSim et le compilateur Microsoft Visual C++. Il simule différents scénarios de SMC pour obtenir et évaluer ces mesures de performance et ainsi choisir la meilleure configuration de SMC.

1.7 Analyse multicritère

La prise de décisions autour de l'implantation du système manufacturier cellulaire implique la considération de plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs. L'analyse hiérarchique de procédés AHP, développée par Saaty (1982), fournit un moyen prouvé et efficace de traiter la prise de décision complexe et il peut assister à identifier et pondérer les critères de sélection, analyser l'information obtenue pour ces critères et faciliter le processus décisionnel. L'AHP aide à traiter des mesures subjectives et objectives d'évaluation, fournissant un mécanisme utile pour vérifier la consistance de ces mesures ce qui réduit le biais dans la prise de décision.

Chan et K. Abhary (1996) combinent différentes techniques telles que l'AHP, la simulation, et la technologie de groupe pour la conception et évaluation d'un système manufacturier cellulaire automatisé. Ils considèrent deux (2) types de critères : financiers et non financiers. Les premiers sont l'investissement et les coûts d'opération. Les deuxièmes sont la flexibilité, le temps dans le système, le taux d'utilisation machine et travailleur, la qualité du produit, la fiabilité et l'entretien.

Tunali et Ozmehmet (2003) présentent un système de soutien pour la prise de décisions dans la formation de SMC. Ce système combine les techniques de formation avec l'AHP afin de faciliter la conception de SMC. Agarwal et al. (2003) indiquent le besoin existant de techniques appropriées pour l'évaluation de SMC. Ils proposent une structure d'AHP afin d'évaluer différentes techniques de formation de cellules.

Gagné (2002) réalise l'évaluation d'alternatives de configuration de cellules de manufacture en utilisant l'AHP. Il fait partie d'un outil général d'aide à la décision pour la conception de SMC dans lequel on utilise la simulation pour la génération de plusieurs alternatives de configuration ou scénarios. Les critères considérés par cette

étude sont l'investissement, les performances, l'aspect opérationnel et l'aspect réalisation. Le premier est un facteur économique qui considère les machines et les ressources nécessaires pour l'aménagement du SMC. Le deuxième considère des mesures de performances comme des encours, du temps moyen dans le système, du temps de cycle de production et du taux moyen d'utilisation de processeurs. Le troisième considère le transport, la maintenance corrective, le taux de rejet versus la qualité, la sécurité et la gestion des opérations de production. Le quatrième critère considère l'implantation physique du système et il comprend l'espace et la modularité.

1.8 Conclusion

On a présenté dans ce premier chapitre une revue de la littérature à propos de la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires. Elle nous a permis de connaître les recherches réalisées autour de ce sujet quant aux chaînes d'approvisionnement, les systèmes de production utilisés dans l'industrie de la confection, les techniques de formation de cellules et la simulation et la prise de décision autour de l'implantation du système manufacturier cellulaire.

CHAPITRE 2

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie employée dans le développement de l'approche pour la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires, lequel est l'objectif de ce mémoire. La méthodologie compte 4 étapes ou phases. Dans chacune d'elles on obtient de l'information qui est utilisée dans la phase suivante. La première phase consiste en la présélection de machines afin d'écarter les machines moins adéquates du groupe de machines candidates pour la conception du SMC. On utilise l'analyse hiérarchique de procédés AHP qui considère des facteurs quantitatifs et qualitatifs pour le processus de prise de décision. La deuxième phase consiste en la formation de cellules. Ici on propose l'utilisation d'une technique analytique et une autre empirique, chacune avec ses limites d'applicabilité. Cette étape sert à générer différents scénarios de configuration de cellules. La troisième phase consiste en la simulation de scénarios afin d'obtenir des mesures de performance qui seront utilisées pour les comparer entre eux. La quatrième phase utilise la technique de l'analyse hiérarchique de procédés AHP pour l'évaluation des scénarios ou alternatives afin de choisir la meilleure configuration de système manufacturier cellulaire SMC.

La figure 2.1 montre de façon générale la méthodologie proposée dans ce mémoire.

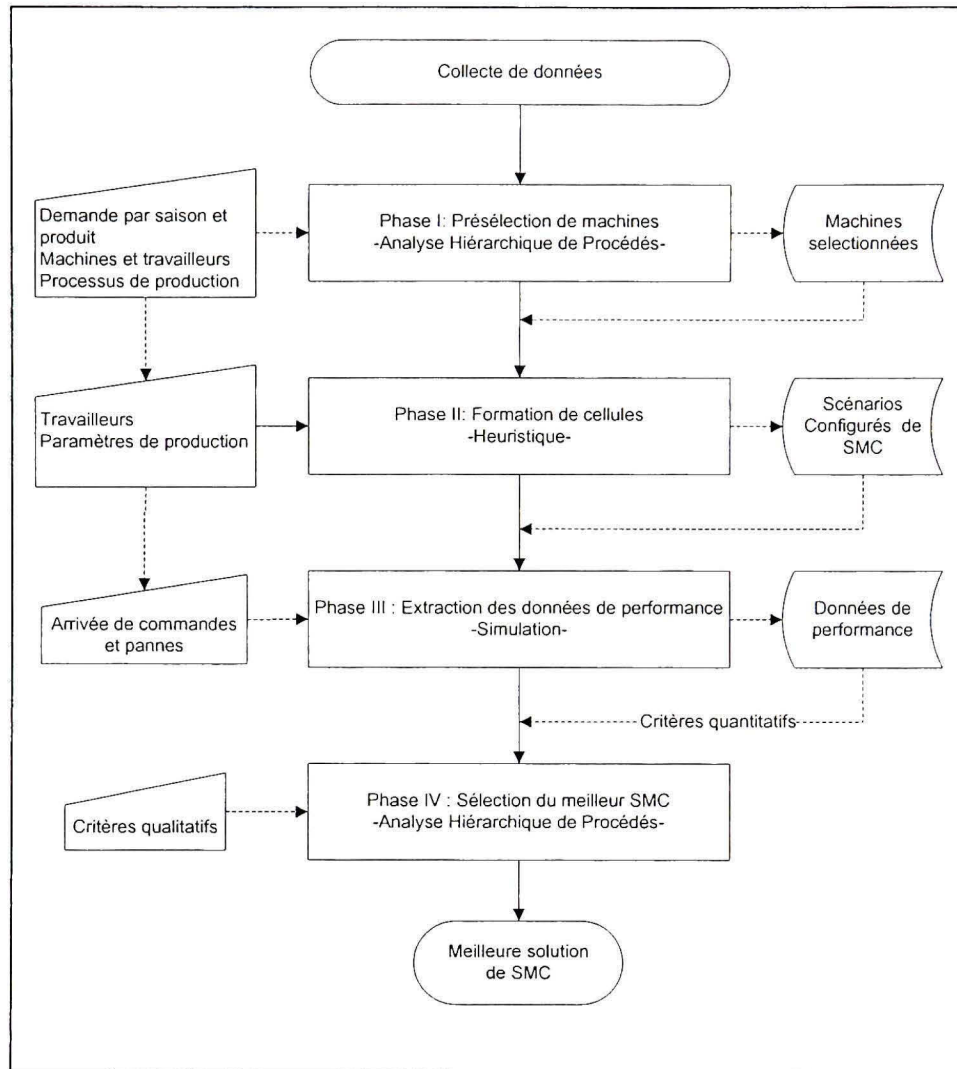


Figure 2.1 Modèle général de l'approche pour la modélisation de systèmes manufacturiers cellulaires.

2.2 Phase I : Présélection de machines candidates

La première phase de l'approche est la sélection des machines qui seront considérées pour la formation de cellules. Cette sélection de machines est très importante parce qu'on verra qu'une des grandes limitations de plusieurs modèles de formation de cellules est le traitement d'un grand nombre des variables. Donc, la réduction du nombre

de types de machines aura pour effet la diminution du nombre de variables et permettra de trouver les solutions pour la formation de cellules seulement avec les machines les plus adéquates.

Traditionnellement, cette étape est négligée par d'autres approches. Normalement, on présume que le groupe de machines qui seront considérées comme candidates pour la formation de cellules sont assez performantes et très semblables ou qu'elles ont déjà passé par une analyse intuitive de sélection de la part du concepteur. Dans le cas spécifique de l'industrie de la confection, les machines peuvent sembler très équivalentes à première vue mais elles présentent des différences significatives d'ordre divers. Donc, une sélection intuitive et empirique ne suffit pas, ce qui nous amène à proposer cette étape de pré-criblage, qui est en réalité une phase d'élimination des machines moins adéquates, où les machines seront sélectionnées pour faire partie du groupe de machines candidates.

2.2.1 Analyse Multicritère

Le processus de sélection de systèmes manufacturiers doit prendre en considération plusieurs facteurs quantitatifs et qualitatifs. L'analyse multicritère permet d'évaluer ces types de facteurs simultanément.

L'analyse multicritère utilisé est l'analyse hiérarchique de procédés AHP qui est une technique développée par Saaty (1982). Elle a les étapes principales suivantes :

1. Définition de l'objectif de sélection.
2. Définition des alternatives de sélection.
3. Identification des critères plus importants pour la sélection.
4. Identification des sous-critères plus importants pour chaque critère.

5. Détermination du poids de chaque critère et valorisation de l'importance relative de chaque critère en comparaison aux autres de son niveau.
6. Évaluation de chaque alternative par rapport à chaque critère.
7. Évaluation finale des poids par rapport à chaque alternative. En conclusion, après que les critères sont pesés et l'information rassemblée, l'information est mise dans le modèle afin d'obtenir la synthèse ou résultat.
8. Identification de l'alternative avec le pointage plus élevé. Pour que la prise de décision soit correcte, on doit évaluer le ratio d'incohérence, lequel est un ratio qui mesure l'incohérence en la pondération de critères. Ce ratio doit être inférieur à 10% (Saaty, 1982).
9. Réalisation d'une analyse de sensibilité, dans laquelle on analyse l'effet des variations dans la pondération des poids des critères sur le résultat final de sélection.

La figure 2.2 montre de façon schématique la structure hiérarchique qu'on fait d'un problème de sélection. On peut voir l'existence des niveaux où le premier niveau consiste en la définition du but ou objectif, le deuxième est formé par les critères principaux, le troisième et niveau suivant par les sous-critères, et dans le dernier niveau se trouvent les différentes alternatives de solution.

Pour la réalisation de ce modèle, on utilise le logiciel ExpertChoice qui est un logiciel conçu exclusivement pour la prise des décisions (ExpertChoice, 1993). Il permet de faciliter toutes les étapes de l'analyse hiérarchique de procédés AHP. Une autre caractéristique importante est la facilité de pouvoir réaliser l'analyse de sensibilité du modèle qui est très importante à l'heure d'évaluer les possibles changements dans la définition des poids des critères.

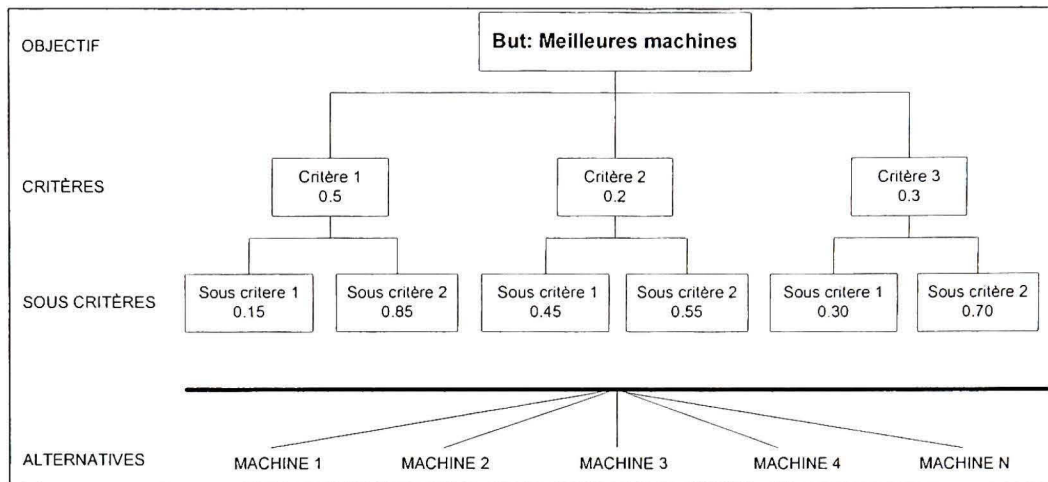


Figure 2.2 Structure hiérarchique d'un problème de sélection.

L'analyse AHP est aussi utilisée dans la phase IV de l'approche pour la sélection du scénario de SMC plus avantageux.

2.3 Phase II : Formation de cellules

Avec l'information des machines candidates présélectionnées dans la phase I et l'information additionnelle sur la demande, le processus de production et les paramètres de conception, on réalise la formation de cellules.

Entre la panoplie de techniques existantes, on a choisi une méthode de programmation mathématique et une méthode de regroupement. La première est une approche analytique pour résoudre le problème de formation de cellules avec la forme d'un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes (PLM). La deuxième est une approche empirique ayant la forme d'une heuristique.

L'approche analytique résout le problème de formation de cellules de façon optimale par rapport au résultat, mais elle présente des limitations par rapport au temps de résolution puisqu'on sait a priori que le problème de formation de cellules est un problème NP-

complet, ce qui empêche de l'utiliser pour des problèmes de taille réelle. La résolution demande trop de temps, le temps de sa résolution croît de façon exponentielle par rapport au nombre de variables. On va utiliser cette approche pour des problèmes très petits qui sont pratiquement inexistantes dans la réalité, mais elle servira pour évaluer et valider le modèle empirique qui donne des résultats non optimaux.

Donc, pour la formation de cellules de taille réelle, on utilisera l'approche empirique avec la forme de l'heuristique. Les résultats générés par ce modèle ne sont pas optimaux pour le même caractère de l'approche, mais on les obtient dans un temps et exactitude acceptables.

2.3.1 Caractéristiques de l'heuristique

L'heuristique présentée a été développée en considérant des critères préétablis sur l'opération pratique et efficiente de la cellule, en plus de considérer des contraintes et des caractéristiques qui devraient avoir les modèles de formation de cellules pour l'industrie de la confection. Ces restrictions et caractéristiques du modèle sont :

- **Sélection et assignation de machines et travailleurs.** On considère la sélection et assignation des machines et travailleurs pour chaque saison, cellule, produit et opération.

Tableau 2.1

Exemple d'assignation des produits, des machines, des travailleurs et des opérations

SAISON	CELLULE	PRODUIT	OPÉRATION	MACHINE	TRAVAILLEUR
hiver	C4	pantalon	O4	M2	T2

Par exemple, au tableau 2.1 en la cellule C4 de la saison « hiver » on assignera l'opération O4 du produit « pantalon » à la machine M2 et au travailleur T2. M2 et T2 sont les types de machines et travailleurs, ils ne font pas référence à une machine ou travailleur spécifique. La dernière assignation sera faite dans l'étape de simulation. Les types de travailleurs se différencient entre eux par rapport au temps d'opération, coût d'emploi, embauche et licenciement.

- **Multi saisonnalité.** L'heuristique proposée permet de former les cellules pour différentes saisons. Le modèle formera les cellules d'une saison en considérant les variables et paramètres de la saison et des autres saisons aussi. On a ajouté cette qualité au modèle parce que dans l'industrie de la confection le caractère saisonnier est très important, et les produits sont différents d'une saison à l'autre ainsi que le niveau de la demande de ces produits.
- **Cellules d'assemblage.** Les lignes de production de vêtements sont en réalité des lignes d'assemblage. Pour cette raison, l'heuristique considère l'existence des « branches » dans lesquelles on produit les sous-ensembles et on les termine dans la ligne ou branche principale. Les opérations dans les branches débutent dans sa première opération et finissent dans la branche de la pièce principale où se réalise l'assemblage des pièces (voir figure 2.3).

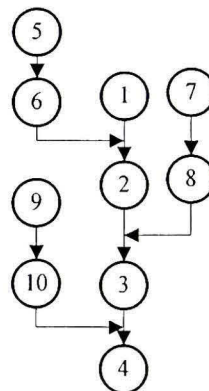


Figure 2.3 Diagramme d'opérations d'une ligne d'assemblage.

- **Cellules autonomes.** « Le flux intercellulaire des pièces réduit grandement les bénéfices de la technologie de groupe TG, le coût de transport et les encours s'incrémentent et il devient difficile d'assigner les responsabilités sur la qualité et les dates de livraison aux équipes de travail. Pour ces raisons, le but principal du concepteur doit être de réussir une totale indépendance entre les cellules, tout en évitant de considérer d'autres objectifs qui pourraient nuire à cette indépendance » (Burbidge 1971).

Le flux intercellulaire cherche l'utilisation efficiente des ressources de production afin d'éviter la duplication ou la multiplication de ces ressources sous utilisées. En établissant un flux intercellulaire, on complique le contrôle de la production et surtout on ajoute des tâches de contrôle et de transport aux travailleurs, ce qui réduit la performance de la cellule.

En plus, notre approche considère la production des vêtements haut de gamme pour lesquels les temps de livraison sont plus importants que les coûts de production. Donc, la performance des cellules est prioritaire. Conséquemment notre modèle ne considère pas l'existence de flux intercellulaire c'est à dire les cellules formées sont autonomes.

- **Cellules configurables dans et entre saisons.** Dans une saison, chaque cellule changera l'emplacement des machines pour s'adapter au produit à traiter; cela est possible pour la caractéristique mobile des machines de couture. Entre saisons, les cellules seront formées avec les machines et travailleurs des cellules de la saison antérieure. L'ensemble des machines dans tout le SMC sera le même, mais la quantité des travailleurs changera selon les besoins spécifiques de chaque saison. Donc, dans l'étape de conception, le concept de cellules virtuelles est appliqué; toutefois les cellules sont reconfigurées physiquement.

- **Assignation exclusive pendant le temps total de cycle de production du produit.** Les ressources de la cellule (machines et travailleurs) sont assignées pour la production d'un type de produit pendant tout le temps total de cycle de production de ce produit, c'est-à-dire pendant ce temps, la cellule n'est pas disponible pour la production des autres produits. On ordonne la production de façon à minimiser le temps de mise en course parce qu'il est très important en comparaison au temps d'opération.
- **Assignation unique des opérations aux machines.** Pendant le traitement d'un type de produit, chaque opération sera assignée à une seule machine, ce qui signifie que le nombre des machines utilisées en la cellule sera toujours égal au nombre d'opérations du produit en traitement. Cette assignation unique oblige dans la pratique à un flux uniforme des pièces, en évitant ainsi l'existence des contre flux nuisant à la productivité de la cellule.
- **Production à l'unité.** La production est réalisée par pièce. On introduit une pièce du produit en traitement à la cellule si les ressources (machine-travailleur) de la première opération de l'ensemble principal ou sous-ensembles sont libres.

Ces trois (3) dernières considérations impliquent l'inexistence de flexibilité de routage. L'heuristique a été programmée avec le langage de programmation MATLAB. Pour une description plus précise de l'heuristique voir la section 4.6.1.

2.3.2 Génération de scénarios

Le modèle de formation de cellules utilise comme données d'entrée l'information suivante :

- Nombre de saisons.
- Nombre de produits dans chaque saison.
- Nombre de types de machines.
- Nombre d'opérations de chaque produit dans chaque saison.
- Nombre de types de travailleurs.
- Durée des opérations dans chaque type de machine par chaque type de travailleur.
- Taux de disponibilité de chaque machine.
- Taux maximal d'utilisation de chaque machine.
- Taux maximal d'utilisation des travailleurs.
- Demande des produits par saison.
- Temps disponible dans chaque saison.
- Coût variable des machines pour chaque saison.
- Coût fixe annuel des machines.
- Coût de main d'œuvre de travailleurs par saison.
- Coût d'embauche des travailleurs.
- Coût de licenciement des travailleurs.
- Taux de rejet de chaque opération dans chaque machine.
- Paramètres de conception.

On peut concevoir le SMC différemment selon on utilise différents paramètres de conception, c'est de cette façon que le concepteur génère des scénarios différents pour le même problème de formation.

Les paramètres de conception utilisés dans le modèle, sur lesquels le concepteur agit, sont des valeurs qui expriment différentes approches de conception et ils sont décrits dans le tableau suivant.

Tableau 2.2

Paramètres de conception.

Paramètres	Description
NMINCell	Nombre minimal de cellules dans une saison.
NXMach	Nombre maximal de machines par cellule.
NXTrav	Nombre maximal de travailleurs par cellule.
NXProd	Nombre maximal de produits par cellule.
MINCSS	Coefficient de similarité minimale.

Le tableau 2.3 montre les paramètres de conception et l'effet des variations de chaque paramètre sur la configuration de cellules. Cette variation doit considérer les aspects stratégiques de l'entreprise.

Tableau 2.3

Effet des modifications des paramètres de conception.

Paramètres	Effet des variations des paramètres
MINCSS	Impose une limitation à l'agrégation entre cellules. Indirectement, on agit sur la taille de la cellule à former, le nombre de produits à traiter dans la cellule, le niveau d'utilisation des processeurs, etc. Une valeur élevée de ce paramètre empêchera l'agrégation de cellules, sauf si la similitude entre deux cellules est supérieure à ce paramètre.
NxTrav.	La limitation existe parce qu'il s'agit de créer une ambiance productive de travail en équipe et évidemment un nombre trop élevé de travailleurs dans une cellule a une influence négative sur la productivité. Une valeur basse de ce paramètre permettra de créer plus de cellules.
NxMach.	Cette limitation est due principalement à la disponibilité d'espace suffisant pour les machines de chaque cellule. Une grande valeur permettra de créer de cellules avec un grand nombre des machines et vice-versa.
NxProd.	La limitation est imposée par la possibilité qu'un grand nombre de produits puisse élever le temps dans le système des commandes, c'est-à-dire les temps de réponse au marché. De plus, il existe la possibilité d'augmenter de façon considérable le temps de mise en course et la complexité de la gestion des produits dans les cellules. La définition d'une valeur de ce paramètre aura des effets pareils aux deux paramètres antérieurs déjà expliqués.
NMINCell.	Afin d'améliorer la possibilité de réduire le temps dans le système et conséquemment le temps de réponse ou livraison, on fixe une valeur grande de NMINCell afin d'avoir un grand nombre de cellules, de cette façon à la limite on aura au moins une cellule par produit.

Un petit nombre de machines peut s'avérer approprié quand on a des limitations physiques pour l'emplacement. La limitation du nombre de travailleurs peut avoir comme raison d'être les aspects psychologiques qui influencent la performance des travailleurs, parce qu'elle a un effet sur l'esprit d'équipe et d'appartenance au groupe. La limitation des nombres de produits a comme raison d'être l'amélioration du temps de réponse aux commandes.

2.4 Phase III : Modélisation et simulation

Pour réaliser la simulation du modèle, on a suivi les étapes générales d'une expérience de simulation, qui sont : la formulation des objectifs, la collecte des données, la formulation du modèle, l'estimation de paramètres, l'évaluation du modèle, la formulation du programme, la validation du modèle, la réalisation de l'expérience, l'analyse de résultats, l'implantation et la documentation (Gharbi, 2002).

Le modèle développé dans ce mémoire est un modèle de simulation par événements discrets. Ces événements discrets, qui se produisent de façon temporelle et aléatoire, suivent une distribution de probabilité. Les événements discrets considérés dans notre modèle sont : le temps d'inter-arrivée des commandes, la taille de la commande, le temps des opérations, et la génération des pannes. Pour réaliser la simulation, on va utiliser le logiciel AweSim.

2.4.1 Temps d'inter-arrivée et taille de la commande

Pour la représentation du temps d'inter-arrivée et la taille de la commande comme variables aléatoires, on calcule la taille de commande moyenne avec les équations 2.1 et 2.2.

$$NCOM = \frac{DuréeSaison}{TIACS} \quad (2.1)$$

$$CM = \frac{Demande}{NCOM} \quad (2.2)$$

Où : $NCOM$ = Nombre des commandes
 $TIACS$ = Temps d'inter-arrivée des commandes dans la saison
 CM = Taille moyenne de la commande

Afin de représenter le caractère stochastique de l'occurrence des événements aléatoires temps d'inter-arrivée des commandes et taille de la commande, on utilisera la distribution normale, mais on a pu bien utiliser une autre distribution. Le choix de la distribution dépend de chaque produit et même à la limite on pourrait représenter chaque type d'événements pour chaque produit par différentes types de distributions.

Pour notre exemple, l'arrivée des commandes est représentée en utilisant une distribution normale avec un écart type égal à 0,3 fois le temps moyen d'inter-arrivée de commandes.

$$TIAC = RNORM(TIACS; 0, 3 \times TIACS) \quad (2.3)$$

De la même façon on représente la taille des commandes comme une distribution normale avec un écart type égal à 0,3 fois la commande moyenne de la saison.

$$Taille\ de\ la\ commande = RNORM(CM; 0, 3 \times CM) \quad (2.4)$$

C'est très important de présenter ces variables comme des variables aléatoires, afin de représenter de façon réaliste ce qui se passe dans l'industrie de la confection, où la demande est très aléatoire. L'entrée des entités dans le système pour représenter les pièces se fera en utilisant une seule entité qui sera clonée au besoin des stations, parce qu'il s'agit d'un système en flux tiré, donc le nombre de pièces sera minimal.

2.4.2 Durée des opérations

La durée des opérations sera représentée comme une variable qui suit une distribution normale avec une moyenne égale à la valeur utilisée par l'heuristique et un écart type égal à 0,25 de la durée moyenne.

$$\text{Temps des opérations} = \text{RNORM}(\text{Temps}; 0,25 \times \text{Temps}) \quad (2.5)$$

2.4.3 Temps entre les pannes et durée des pannes

Pour générer les pannes à partir des données utilisées dans l'heuristique, on aura recours à l'approche développée par Law (2000) qui propose une méthode dans le cas de données inexistantes. Il indique que le temps d'une machine en opération et en panne suit une distribution gamma généralisée avec des paramètres de forme (α) respectivement égale à 0,7 et 1,3, le paramètre de localisation (γ) est fixé à 0.

La fonction de densité de cette distribution est la suivante :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(\chi - \gamma)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left[-\frac{(\chi - \gamma)}{\beta}\right] & \text{si } \chi > \gamma \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.6)$$

Pour déterminer les paramètres d'échelle (β) on doit déterminer la moyenne de temps de pannes $\mu_D = E(D)$ et l'efficacité e qui est le pourcentage du temps que la machine est en train de traiter des pièces.

$$e = \frac{\mu_B}{\mu_B + \mu_D} \quad (2.7)$$

Où: $\mu_B = \text{MTBF moyen}$

$\mu_D = \text{MTTR moyen}$

$$\mu_B = \alpha_B \beta_B \quad (2.8)$$

$$\mu_D = \alpha_D \beta_D \quad (2.9)$$

$$\text{Où: } \alpha_B = 0,7 \quad \text{et} \quad \alpha_D = 1,3$$

Alors :

$$\beta_B = \frac{e\mu_D}{0,7(1-e)} \quad (2.10)$$

$$\beta_D = \frac{\mu_D}{1,3} \quad (2.11)$$

Avec les équations 2.8 et 2.9, on pourrait représenter le temps entre pannes (TBF) et le temps pour réparation (TTR) comme suit :

$$\text{TBF} \approx \text{Gamma}(0; \beta_B; 0,7) \quad (2.12)$$

$$\text{TTR} \approx \text{Gamma}(0; \beta_D; 1,3) \quad (2.13)$$

2.5 Phase IV: Sélection du scénario de SMC

Cette phase est la dernière de notre approche. Ici, on réalise la sélection du scénario du SMC plus avantageux parmi les différents scénarios proposés par les étapes antérieures. De la même façon que dans la Phase I, on utilise l'analyse hiérarchique de procédés AHP avec l'information générée par les trois premières phases : présélection des machines, formation de cellules et simulation. De plus, on considère des données additionnelles d'ordre qualitatif.

2.6 Conclusion

L'approche consiste en 4 phases qui utilisent différentes méthodologies. L'analyse multicritère est employée dans la première phase de présélection des machines. Pour la deuxième phase, laquelle consiste en la formation de cellules et production de scénarios, on utilise une heuristique. Dans la troisième phase, on réalise la simulation dynamique par événements discrets des scénarios. La quatrième et dernière phase utilise l'analyse hiérarchique de procédés pour réaliser la sélection du scénario ou la configuration plus adéquate du SMC.

CHAPITRE 3

PHASE I : PRÉSÉLECTION DE MACHINES

3.1 Introduction

La première phase de l'approche consiste en la présélection de machines ou plus précisément l'élimination des machines moins performantes. Le but de cette phase est la réduction du nombre des machines candidates afin de faciliter le processus de formation de cellules.

Dans ce chapitre, on réalise la présélection avec la méthode de l'analyse hiérarchique de procédés AHP. Elle consiste en l'évaluation de différents critères quantitatifs et qualitatifs qui sont importantes à considérer, afin de choisir les meilleures machines. On réalise la description de la hiérarchie proposée dans cette phase, la description des critères, sous-critères et alternatives. On présente la synthèse ou solution, et finalement on réalise l'analyse de sensibilité.

3.2 Formation de groupes de types de machines

Cette étape vise à simplifier le processus de présélection de machines. Les machines pour la confection des vêtements s'identifient par le type d'opérations qu'elles sont capables de réaliser. Ainsi les machines se classifient comme bouttonnières, bras déporté, rabatteuses, ourleuses, piqueuses plates, point d'arrêt, point de chaînette, pose boutons, pose manches, pose passantes, recouvreuses, surjeteuses, etc. Une autre classification prend en compte le type de produits à traiter. Donc, la classification de ces types de machines sera plus détaillée et il se peut qu'une machine puisse être considérée dans plus d'un groupe de type de machines.

3.3 Critères d'évaluation

Sachant que le but de ce processus est la sélection des meilleures machines candidates, on s'attache à définir les critères principaux qui serviront à les comparer. Le choix des critères prend en compte les particularités du système manufacturier cellulaire de l'industrie de la confection. La figure 3.1 montre la structure hiérarchique du modèle de présélection des machines.

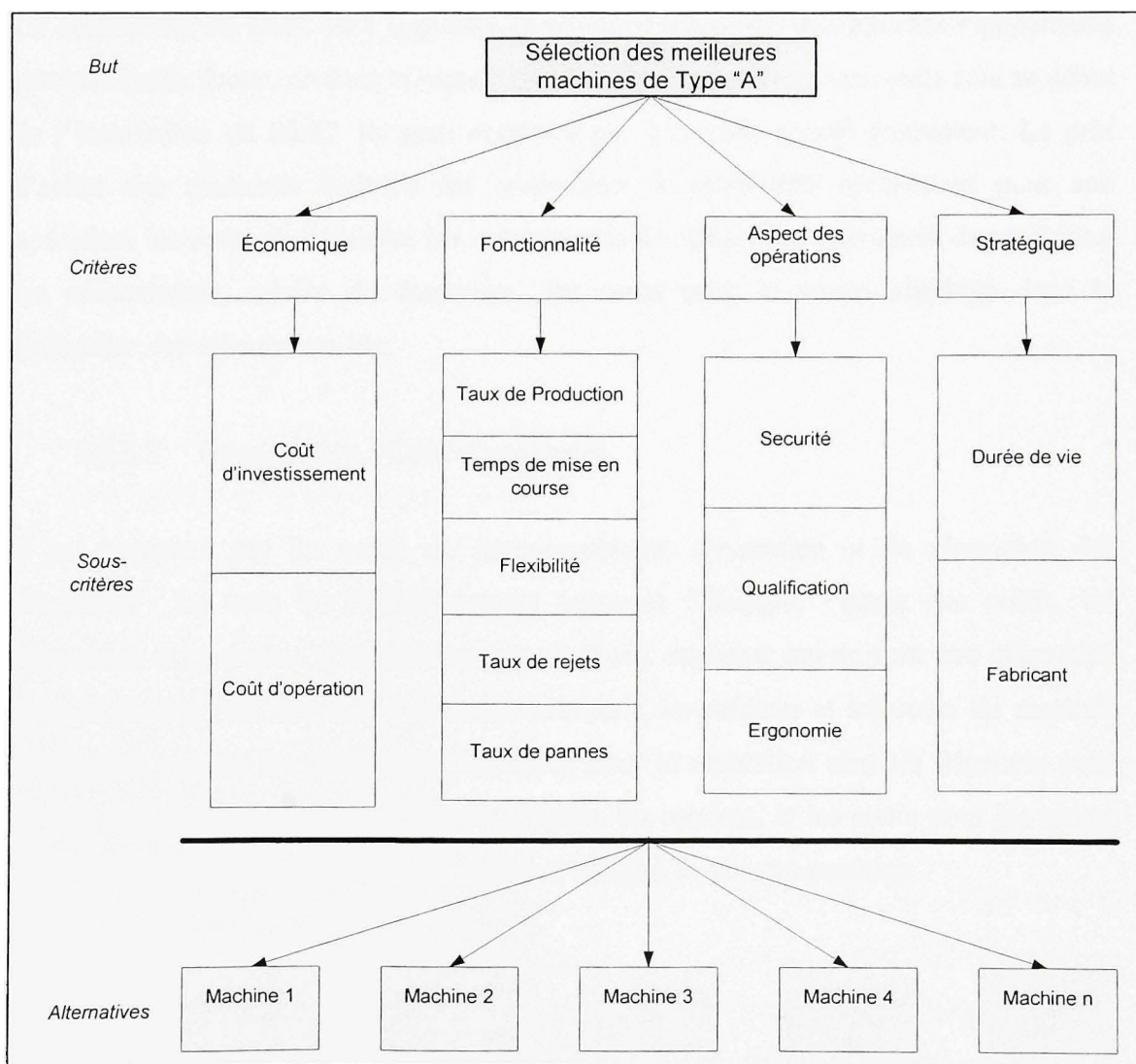


Figure 3.1 Hiérarchie du modèle de présélection de machines.

3.3.1 Critère : Économique

Il s'agit des dépenses réalisées pour l'achat et opération des machines. Le poids sera fixé en fonction inverse du coût, c'est-à-dire que l'on assignera un poids plus grand aux machines ayant le coût moins élevé.

3.3.1.1 Sous-critère : Coût d'investissement

La conception du SMC de l'approche développée considère que tous les équipements seront achetés. Donc, on tient compte des coûts qui se réaliseront une seule fois au début de l'installation du SMC. Ils sont exprimés par leur coût annuel équivalent. Le prix d'achat des machines incluant les accessoires et dispositifs nécessaires pour son opération, les coûts de livraison, les coûts pour la formation des opérateurs de machines, les mécaniciens, salaire du formateur, les coûts pour le temps employé dans la formation, documentation, etc.

3.3.1.2 Sous-critère : Coût d'opération

Il est composé par les coûts de fonctionnement, d'entretien et de réparation des machines. Le coût de fonctionnement implique l'énergie, l'usure des outils, les assurances et garanties. L'entretien correspond aux dépenses qui doivent être effectuées pour la mise à jour du plan d'entretien préventif, les salaires et les coûts du matériel d'entretien comme les lubrifiants. Les coûts pour la réparation sont les dépenses pour l'achat de pièces de rechange, l'usure d'outils, les salaires, et les coûts pour les temps d'arrêt; elles sont fonction de la durabilité et fiabilité de chaque machine.

3.3.2 Critère : Fonctionnalité

Fait référence aux avantages et désavantages de différents facteurs tels que: le taux de production, les temps de mise en course, la flexibilité, le taux de rejet et le taux de panne.

3.3.2.1 Sous-critère : Taux de production

La quantité de pièces traitées par unité de temps. Les machines plus performantes auront un poids plus élevé.

3.3.2.2 Sous-critère : Temps de mise en course

Le temps employé pour la modification de la configuration de la machine tel que le changement d'aiguille, fil, calibrage et programmation de nombre de points de couture, etc. Ici le poids est fixé de façon inverse au temps de mise en course.

3.3.2.3 Sous-critère : Flexibilité

La flexibilité est fonction directe du nombre d'opérations différentes que la machine peut faire, et les différents types de tissus et matériaux qu'elle peut traiter. Une machine plus flexible aura un poids plus élevé.

3.3.2.4 Sous-critère : Taux de rejet

Le pourcentage de rejets qui se produisent dans les stations à cause des défauts dans le traitement. Dans le procès de couture, le rejet est fonction de la qualité de la machine et de l'habilité du travailleur. Donc, on considère ici le rejet qui se produit dans une station de travail avec un travailleur d'habilité moyenne. La pondération est faite en fonction inverse de la valeur du taux de rejet.

3.3.2.5 Sous-critère : Taux de panne

Le taux de panne est calculé en utilisant la relation 3.1 qui considère le temps moyen entre pannes (MTBF) et le temps employé pour sa réparation (MTTR). Une occurrence majeure des pannes sera pondérée avec un poids majeur.

$$Taux_de_pannes = \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \quad (3.1)$$

3.3.3 Critère : Ressources humaines

Considère les aspects relatifs aux travailleurs comme la sécurité, les qualifications et l'ergonomie.

3.3.3.1 Sous-critère : Sécurité

Des critères qualitatifs qui sont relatifs aux risques de blessure que les travailleurs pourraient subir en utilisant les machines. Quelques machines possèdent des dispositifs mécaniques et électroniques de sécurité pour éviter que le travailleur soit exposé à ces risques. La pondération favorisera des machines plus sécuritaires.

3.3.3.2 Sous-critère : Qualification

C'est le niveau des compétences que le travailleur doit avoir pour une utilisation effective et sécuritaire des machines. Si la machine demande des travailleurs avec plus de qualifications, cela signifie qu'il y aura des dépenses additionnelles pour la formation ou pour l'embauche d'opérateurs, afin d'acquérir les compétences requises. Les poids seront assignés en fonction inverse du niveau de qualification.

3.3.3.3 Sous-critère : Ergonomie

Le sous-critère Ergonomie reflète les différentes propriétés des équipements, ici les machines, pour s'adapter à l'opérateur, de telle façon que ce dernier puisse mener ses activités avec un maximum d'efficacité, de satisfaction et de bien-être avec une phase d'adaptation réduite. Les machines candidates devront avoir des caractéristiques importantes comme la facilité de déplacement, la configuration de la surface de travail à différentes hauteurs et le type d'actionnement pour son fonctionnement (électronique ou mécanique). Les machines plus adaptables aux travailleurs mériteront des poids plus élevés.

3.3.4 Critère : Stratégique

Il comprend des facteurs qui doivent être pris en compte afin d'accomplir la stratégie de l'entreprise à moyenne et longue date. Les facteurs considérés sont le fabricant de la machine et la durée de vie des machines.

3.3.4.1 Sous-critère : Durée de vie

C'est le temps estimé pour que la machine réalise les opérations de façon efficace. C'est-à-dire avec un minimum de rejets et de pannes. Les machines ayant la durée de vie la plus longue mériteront les poids les plus élevés.

3.3.4.2 Sous-critère : Fabricant

Les fabricants de machines jouissent d'un certain prestige pour la qualité de leurs produits et de leurs services après vente, qu'ils offrent à leurs clients, comme la provision garantie et opportune de pièces de rechange. On fait l'évaluation intégrale des machines par rapport aux fabricants. Les machines produites par le fabricant le plus

réputé pour la qualité de la machine et les services qu'il offre aura un poids plus élevé. Ici, le jugement du concepteur ou le conseil d'un expert sera très important.

3.4 Pondération et valorisation relative des critères

Dans cette étape, il faut disposer de documentation adéquate avec toute l'information sur les machines, afin de pouvoir pondérer les divers critères. L'information requise est d'ordre qualitatif et quantitatif, et son utilisation demande le jugement du concepteur et/ou du conseil d'experts.

La pondération débute avec l'établissement d'une échelle de comparaison, par exemple celle du tableau 3.1.

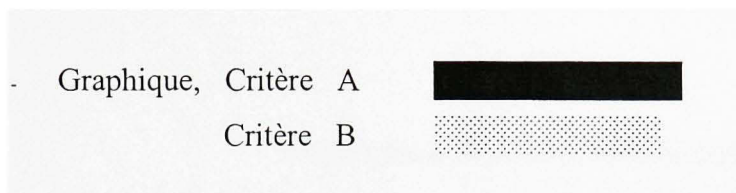
Tableau 3.1

Exemple d'une échelle de comparaison 2 à 2.
(Saaty, 1982)

Degré de préférence	Pondération
Même ordre de grandeur	1
Légèrement meilleur	3
Plus important	5
Beaucoup plus important	7
Nettement plus important	9

La pondération se réalise par comparaison binaire de chaque paire de critères; elle cherche à établir l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres. Cette comparaison peut être réalisée des suivantes façons :

- Verbal, le critère A est légèrement meilleur que le critère B, selon le tableau 3.1, on fixe la valeur 3 pour établir la pondération de la comparaison entre A et B
- Numérique, le critère A est 1.1 fois plus important que le critère B.



Le logiciel ExpertChoice permet de réaliser la pondération par comparaison binaire dans ces trois façons : verbal, numérique et graphique. Le tableau 3.2 montre le résultat numérique de la pondération binaire, de tous les critères, en utilisant la méthode graphique.

Tableau 3.2

Pondération binaire des critères obtenue à partir de la méthode graphique.

	Économique	Fonctionnalité	Ressources humaines	Stratégique
Économique	1	0,81	1,34	1,22
Fonctionnalité	1,23	1	1,46	1,49
Ressources humaines	0,75	0,68	1	1,33
Stratégique	0,82	0,67	0,75	1

Pour exemple on peut voir que le critère Économique est 0,81 fois moins important que le critère Fonctionnalité. Par contre il est 1,34 fois plus importante que le critère Ressources humaines et 1,22 fois plus importante que le critère Stratégique.

Ensuite on réalise la valorisation relative de chaque critère. On calcule le vecteur propre normalisé de la façon suivante:

- (1) Diviser chaque élément par la somme de la colonne
- (2) Additionner chaque rangée pour faire un vecteur propre
- (3) Diviser le vecteur propre par le nombre d'éléments

Tableau 3.3

Valorisation relative de chaque critère.

	Ec. Fonc. RH Strat.	Ec Fonc. RH Strat.	Vecteur Propre (2)	Vecteur propre Normalisé (3)
		(1)		
Ec.	1,000 0,813 1,340 1,220	0,263 0,257 0,294 0,242	1,056	0,264
Fonc.	1,230 1,000 1,460 1,490	0,324 0,316 0,321 0,296	1,256	0,314
RH	0,746 0,685 1,000 1,330	0,197 0,216 0,220 0,264	0,896	0,224
Strat.	0,820 0,671 0,752 1,000	0,216 0,212 0,165 0,198	0,791	0,198
Somme	3,796 3,169 4,552 5,040	1,000 1,000 1,000 1,000	4,000	1,000

À partir du résultat de la valorisation relative des critères on aperçoit l'importance relative de chaque critère. Ainsi, le critère le plus important dans notre processus de sélection de machines sera le critère Fonctionnalité suivi par le critère Économique, le critère Ressources humaines, et finalement le critère Stratégique. La figure 3.2 montre la représentation graphique, produite par ExpertChoice, du vecteur propre normalisé.

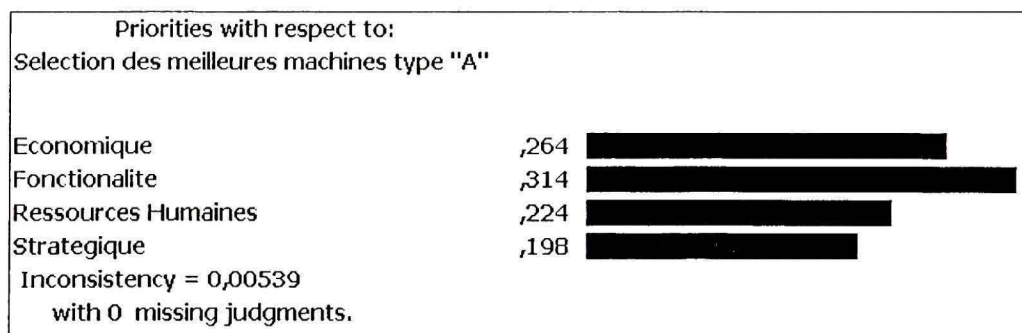


Figure 3.2 Résultat de la valorisation relative de chaque critère.

On voit que pour la sélection des meilleures machines de type « A », on donnera une importance majeure au critère fonctionnalité plutôt qu'au critère économique. Cette pondération particulière est causée par le prix bas des machines dans cette industrie.

La pondération de sous-critères se réalise de la même façon, en utilisant la comparaison binaire. Le tableau 3.4 montre le résultat de la pondération de tous les critères et sous-critères considérés dans la structure hiérarchique de notre problème.

Tableau 3.4
Valorisation relative des critères et des sous-critères.

Critères	Sous-critères	Priorités
Économique		0,264
	Coût d'investissement	0,444
	Coût d'opération	0,556
Fonctionnalité		0,314
	Taux de production	0,220
	Temps de mise en course	0,191
	Flexibilité	0,190
	Taux de rejet	0,164
	Taux de panne	0,235
Ressources humaines		0,224
	Sécurité	0,375
	Qualifications	0,238
	Ergonomie	0,386
Stratégique		0,198
	Durée de vie	0,567
	Fabricant	0,433

3.5 Analyse de la cohérence en la pondération de critères et sous-critères

Afin de valider la pondération faite aux critères et sous-critères, on doit déterminer si la cohérence des jugements réalisés est acceptable.

On peut comprendre la cohérence des jugements de la façon suivante : Si on dit que A possède une valeur plus grande que B, c'est à dire $A > B$ et que $B > C$ en appliquant la propriété de transitivité on peut conclure que $A > C$, le jugement fait de cette façon peut se considérer cohérente, mais si au contraire on dit que $C > A$ alors le jugement fait est incohérent. La cohérence est étroitement liée à la propriété de transitivité.

Saaty (1982) indique que la plus grande valeur propre d'une matrice cohérente réciproque, est égale au nombre de comparaisons ($\lambda_{\max} = n$). Donc, pour déterminer la cohérence des pondérations des critères, on utilise l'analyse du ratio d'incohérence, lequel est un indicateur mathématique de la cohérence de nos comparaisons des critères de sélection faites 2 par 2. Il est une fonction de la valeur propre maximale (λ_{\max}) et la taille de la matrice de comparaison de critères (n), laquelle est ensuite comparée à des valeurs similaires de comparaison de critères réalisés de façon aléatoire appelés ratios d'incohérence moyennes (tableau 3.5). Selon Saaty (1982), le ratio d'incohérence devra être inférieur à 0,1 pour que le jugement réalisé dans les pondérations soit considéré cohérent ou acceptable.

Afin de réaliser le calcul du ratio d'incohérence, on multiplie la matrice de comparaisons $[A]$ avec le vecteur propre normalisé $[B]$ (tableau 3.3) et on obtient le vecteur $[C]$.

$$[C] = [A] \times [B]$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,813 & 1,340 & 1,220 \\ 1,230 & 1,000 & 1,460 & 1,490 \\ 0,746 & 0,685 & 1,000 & 1,330 \\ 0,820 & 0,671 & 0,752 & 1,000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,264 \\ 0,314 \\ 0,224 \\ 0,198 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,061 \\ 1,261 \\ 0,899 \\ 0,794 \end{bmatrix}$$

On divise chaque élément du vecteur $[C]$ pour sa valeur correspondant dans le vecteur $[B]$ afin de trouver le nouveau vecteur $[D]$.

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1,061}{0,264} & \frac{1,261}{0,314} & \frac{0,899}{0,224} & \frac{0,794}{0,198} \end{bmatrix}$$

$$[D] = [4,019 \quad 4,016 \quad 4,013 \quad 4,010]$$

Ensuite, on trouve la moyenne des éléments du vecteur $[D]$. Laquelle est une approximation de ce qui est appelée la « valeur propre ».

$$\lambda_{\max} = \frac{4,019 + 4,016 + 4,013 + 4,010}{4} = 4,014$$

L'indice d'incohérence (II) d'une matrice de taille N est donné par la formule.

$$II = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (3.2)$$

$$II = \frac{4,014 - 4}{4 - 1} = 0,0047$$

À partir de cette information nous calculons le ratio d'incohérence RI . Le ratio d'incohérence devrait être inférieur à 0,1 pour que l'incohérence des jugements soit considérée négligeable (Saaty, 1982).

$$RI = \frac{II}{RIM} \quad (3.3)$$

Où : RI = Ratio d'incohérence

II = Indice d'incohérence

RIM = Ratio d'incohérence moyenne

Pour calculer le ratio d'incohérence on utilise la relation 3.3 et le tableau d'incohérences moyennes développé par Saaty (1982) qui a été obtenue, par lui même, à partir de simulations réalisées sur des problèmes avec différents nombres d'attributs ou critères (tableau 3.5).

Tableau 3.5

Ratios d'incohérence moyenne par nombre des facteurs (Saaty, 1982).

<i>N</i> Nombre des critères	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>RIM</i>	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41 ...

Donc, pour notre cas l'indice d'incohérence est 0,0047 et le ratio d'incohérence moyenne pour les 4 critères est 0,9. Le ratio d'incohérence pour le problème est calculé avec la relation 3.3.

$$RI = \frac{II}{RIM} = \frac{0,0047}{0,9} = 0,0052 \leq 0,1$$

Le ratio d'incohérence est inférieur à 0,1 et conséquemment nos jugements sont considérés comme consistants et valides.

On peut obtenir le ratio d'incohérence en utilisant ExpertChoice. Le tableau 3.6 présente les ratios d'incohérence de la pondération des sous-critères.

Tableau 3.6

Ratios d'incohérence en la pondération des sous-critères

Critères	Sous-critères	<i>RI</i>
Économique	Coût d'investissement	0
	Coût d'opération	
Fonctionnalité	Taux de production	0,00875
	Temps de mise en course	
	Flexibilité	
	Taux de rejet	
	Taux de panne	
Ressources humaines	Sécurité	0,00558
	Qualifications	
	Ergonomie	
Stratégique	Durée de vie	0
	Fabricant	

3.6 Pondération et valorisation relative des alternatives

La pondération des alternatives par rapport aux critères et sous-critères est réalisée en utilisant l'introduction directe des données. Le tableau 3.7 montre les données utilisées pour la pondération des alternatives par rapport aux critères et sous-critères. Les valeurs des critères Économique (Investissement et Opération), Taux de production, Taux de rejet, Taux de panne, Temps de mise en course et Flexibilité sont présentées pour chaque alternative de sélection. On a réalisé la même procédure pour les restants critères et sous critères.

Tableau 3.7

Pondération des alternatives par introduction directe de données.

AID	Alternative	Total	Economique Investissement	Economique Operation	Fonctionalite Taux de production	Fonctionalite Mise en course	Fonctionalite Flexibilite
A2	<input checked="" type="checkbox"/> Machine1	,125	2000	2800	2.87	1.89	35
A3	<input checked="" type="checkbox"/> Machine2	,085	2200	2900	2.94	1.96	15
A4	<input checked="" type="checkbox"/> Machine3	,123	1960	2640	2.77	2.04	22
A5	<input checked="" type="checkbox"/> Machine4	,107	1940	2560	2.72	2.08	19
A7	<input checked="" type="checkbox"/> Machine5	,116	1920	2480	2.72	1.84	18
A8	<input checked="" type="checkbox"/> Machine6	,150	2000	2400	2.68	1.98	22
A9	<input checked="" type="checkbox"/> Machine7	,148	1991	2320	2.62	1.65	31
A10	<input checked="" type="checkbox"/> Machine8	,147	1860	2240	2.53	1.52	17

À titre d'exemple, on réalisera la pondération des alternatives par rapport au sous-critère investissement.

Le tableau 3.8 montre les données de la valeur de l'investissement pour chaque alternative. Ces données sont introduites directement et ExpertChoice réalise la valorisation relative des alternatives par rapport au sous-critère investissement. Il faut spécifier si la pondération est directement proportionnelle à la valeur introduite ou non. De plus, il faut spécifier la valeur maximale et minimale de la pondération. À partir de ces données, le logiciel détermine l'équation d'une ligne droite.

Tableau 3.8

Valeur de l'investissement des alternatives.

Alternative	Investissement
Machine 1	2000
Machine 2	2200
Machine 3	1960
Machine 4	1940
Machine 5	1920
Machine 6	2000
Machine 7	1991
Machine 8	1860

À partir des valeurs extrêmes de ces données, le logiciel détermine l'équation de la droite 3.4 qui passe par les coordonnées (2200;0) et (1800;1), laquelle sert à calculer les valeurs relatives de chaque alternative.

$$y = \frac{11}{2} - \frac{x}{400} \quad (3.4)$$

Tableau 3.9

Vecteur propre normalisé de l'investissement pour chaque alternative.

Alternative	x Investissement	y Valeur relative	Vecteur propre normalisé
Machine 1	2000	0,500	0,116
Machine 2	2200	0,000	0,000
Machine 3	1960	0,600	0,139
Machine 4	1940	0,650	0,150
Machine 5	1920	0,700	0,162
Machine 6	2000	0,500	0,116
Machine 7	1991	0,523	0,121
Machine 8	1860	0,850	0,197
Somme		4,323	1,000

Le tableau 3.9 montre les valeurs obtenues à partir de l'équation 3.4 et le vecteur propre normalisé de ces valeurs. ExpertChoice réalise tout ce calcul en interne, il calcule le vecteur propre normalisé, c'est-à-dire la synthèse de la pondération des alternatives.

On utilise la même procédure pour le sous-critère coût d'opération. Le tableau 3.10 présente les valeurs relatives des alternatives par rapport aux deux (2) sous-critères et par rapport au critère économique.

Tableau 3.10

Vecteur propre normalisé du critère Économique pour chaque alternative.

Alternatives	^(B) Vecteur propre du sous-critère		Vecteur propre du critère Économique $\Sigma(A*B)$
	Investissement	Opération	
^(A) Vecteur propre du critère Économique	0,444	0,556	
Machine 1	0,116	0,055	0,082
Machine 2	0,000	0,027	0,015
Machine 3	0,139	0,098	0,116
Machine 4	0,150	0,120	0,134
Machine 5	0,162	0,142	0,151
Machine 6	0,116	0,164	0,143
Machine 7	0,121	0,186	0,157
Machine 8	0,197	0,208	0,203
Somme	1,000	1,000	1,000

On procède de la même façon pour les autres critères : fonctionnalité, ressources humaines et stratégique.

Le tableau 3.11 présente le résultat final et le vecteur propre pour le choix final des alternatives.

Tableau 3.11

Vecteurs propres de chaque critère et vecteur propre final pour la sélection des meilleures machines type « A ».

	Vecteur propre du critère				Choix Optimal
	Économique	Fonctionnalité	Ressources Humaines	Stratégique	
Vecteur propre des critères	0,264	0,314	0,224	0,198	
Machine 1	0,082	0,166	0,132	0,109	0,125
Machine 2	0,015	0,103	0,120	0,110	0,085
Machine 3	0,116	0,133	0,135	0,102	0,123
Machine 4	0,134	0,088	0,116	0,093	0,107
Machine 5	0,151	0,080	0,129	0,110	0,116
Machine 6	0,143	0,126	0,129	0,221	0,150
Machine 7	0,157	0,152	0,121	0,158	0,148
Machine 8	0,203	0,153	0,119	0,097	0,147
Somme	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

3.7 Synthèse des pondérations

La pondération finale de toutes les alternatives est présentée par la figure 3.3. Pour l'objectif de sélection de machines de type « A », la machine plus importante est la machine 6 qui a un poids final de 0,150 et la machine moins importante par rapport aux critères analysés est la machine 2 avec un poids final de 0,085. Malgré que cette machine possède un haut taux de production, ses coûts d'investissement et d'opération élevés et sa flexibilité réduite font qu'elle est moins intéressante.

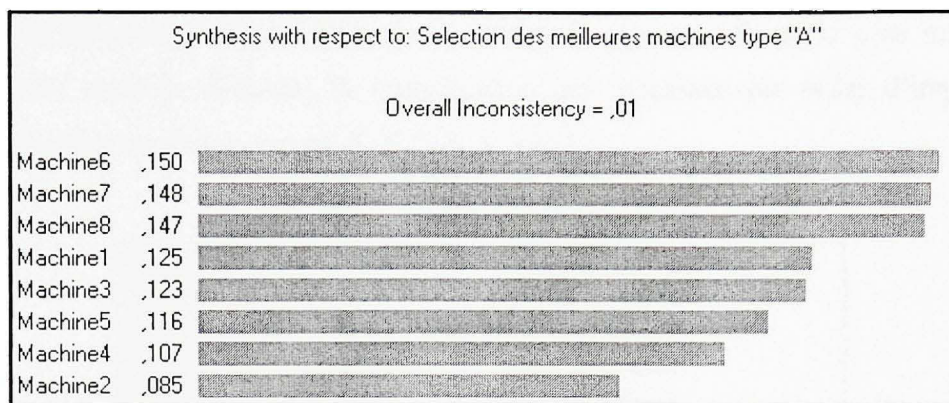


Figure 3.3 Synthèse des pondérations pour la sélection des machines type « A ».

En conclusion, à partir de ces résultats qui définissent les priorités de sélection, on pourrait choisir comme machines candidates pour la formation de cellules, celles qui possèdent les poids finals plus élevés c'est à dire le machines 6, 7, 8, 1 et 3, et on élimine celles qui ont les poids finales moins élevés, les machines 5, 4 et 2.

Pour valider cette décision, on doit déterminer si la cohérence des jugements réalisés pour toutes les alternatives est acceptable. ExpertChoice nous donne le ratio d'incohérence (0,01), lequel est inférieur à 0,1 (suggéré par Saaty, 1982) en conséquence l'incohérence des jugements est considérée négligeable.

3.8 Analyse de sensibilité

Pour valider le choix réalisé, on doit évaluer l'effet sur le modèle qu'aurait un changement dans la pondération des critères. À ce sujet, ExpertChoice permet au concepteur de faire une manipulation graphique dynamique très simple des variations dans la pondération des critères.

À titre d'exemple, on fait l'analyse de sensibilité pour vérifier la consistance de la décision de sélection. La figure 3.4 montre la pondération des critères et la pondération

finale des alternatives. On y voit que le critère Fonctionnalité est le plus important. Donc, avec cette pondération, la classification des machines par ordre d'importance comme meilleure solution est : 6, 7, 8, 1, 3, 5, 4 et 2.

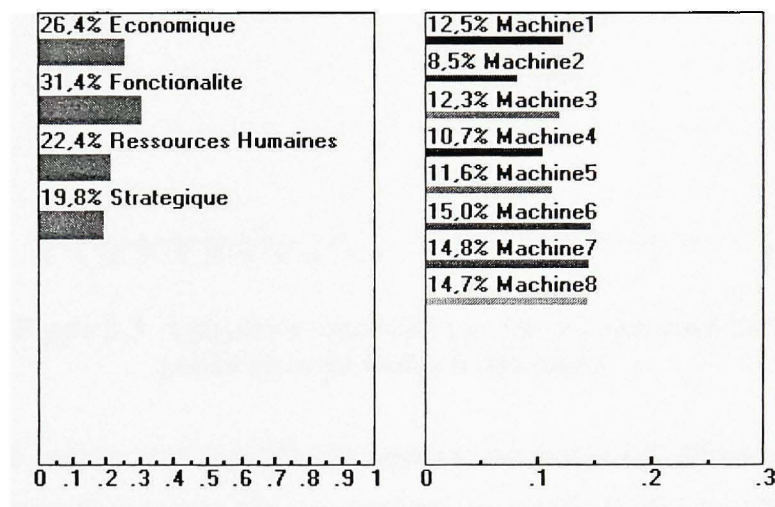


Figure 3.4 Graphiques de pondération des critères et alternatives.

Maintenant supposons que le concepteur décide de changer les poids des critères en donnant une importance majeure au critère Économique. Alors, à titre d'exemple, on incrémente le poids de ce critère de 26,4 % jusqu'à 34,2 %. La figure 3.5 montre que cette nouvelle pondération provoque un changement dans les résultats et maintenant la nouvelle classification est 8, 7, 6, 5, 3, 1, 5, 4 et 2.

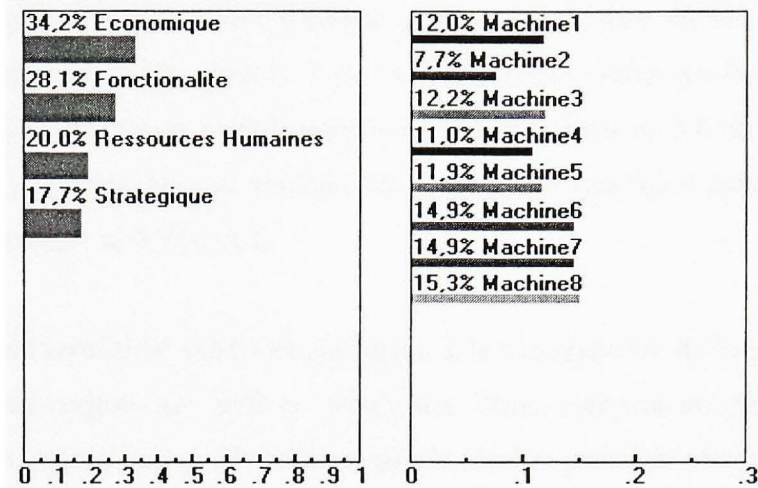


Figure 3.5 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère économique.

La Figure 3.6 montre une nouvelle assignation des poids qui donne une importance majeure au critère Stratégique. On a incrémenté son poids de 19,8 % à 50,5 %. Avec ce changement, la classification est 6, 7, 8, 1, 3, 5, 4 et 2.

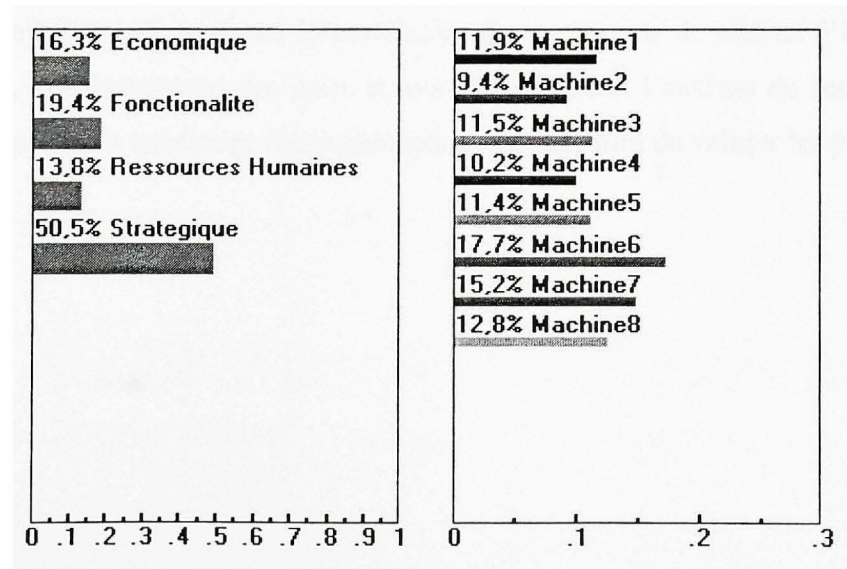


Figure 3.6 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère Stratégique.

Un incrément de poids du critère Ressources Humaines donne un résultat semblable, c'est à dire le groupe de machines 6, 7, 8, 1 et 3 est mieux classé que les machines 5, 4, et 2. Ce qui nous indique qu'évidemment notre sélection faite en 3.6 est robuste. Donc, les machines que nous devons éliminer du groupe des machines candidates pour la formation de cellules sont 5, 4 et 2.

Cette analyse de sensibilité peut s'élargir jusqu'à la manipulation de la pondération des sous-critères par rapport aux critères principaux. Mais, l'impact est plus faible qu'un changement en la pondération des critères dans le résultat global de sélection.

3.9 Conclusion

La présélection des machines est un pas nécessaire pour réduire la complexité du problème de formation de cellules. Dans ce chapitre, on a présenté l'analyse hiérarchique de procédés (AHP) appliquée à la présélection de machines. Les critères ou facteurs qualitatifs et quantitatifs ont été pondérés de façon numérique et par comparaison binaire. Le logiciel ExpertChoice nous a permis de réaliser l'introduction de données, la comparaison des pairs et tous les calculs et l'analyse de sensibilité. De plus, on a analysé la cohérence des jugements du modèle afin de valider les pondérations faites.

CHAPITRE 4

PHASE II : FORMATION DE CELLULES

4.1 Introduction

Le présent chapitre aborde la problématique de la formation de cellules (FC), qui est l'étape principale dans la conception du système manufacturier cellulaire (SMC). Elle consiste en l'identification de familles de pièces et de machines, et la conséquente assignation aux cellules. Plus spécifiquement, les modèles proposés dans ce chapitre cherchent à réaliser :

- La sélection de familles de produits : quantité et produits à traiter dans chaque cellule de chaque saison.
- La sélection des machines : quantité par type de machine et assignation à chaque cellule de chaque saison.
- La sélection de travailleurs : quantité par type de travailleur et assignation à chaque cellule de chaque saison.
- Assignation de chaque opération à chaque machine et travailleur.
- Équilibrage de lignes, cherchant à trouver l'utilisation optimale des ressources (machine et travailleur).

Ce chapitre présente aussi une description de la problématique de formation de cellules, ainsi qu'une description détaillée du système manufacturier cellulaire.

Pour la formation de cellules on présente deux types d'approches, une analytique et une autre empirique.

L'approche analytique utilise la Programmation Linéaire en nombres Mixtes (PLM), laquelle permet de trouver la solution optimale. L'applicabilité de ce modèle est limitée par la complexité de sa résolution, elle exige un temps de résolution excessivement long parce qu'il s'agit d'un des problèmes connus comme NP-complet. Elle serait applicable pour des problèmes très petits, lesquels sont pratiquement inexistants dans l'industrie du vêtement.

L'approche empirique recourt à une Heuristique de Formation de Cellules (HFC) qui trouve une solution faisable non optimale, mais dans un délai court et en plus, elle est capable de résoudre des problèmes de grande taille.

On présente aussi des exemples d'application des deux approches et on constate l'impossibilité d'utilisation du modèle analytique pour des problèmes de taille réelle. Par contre l'approche empirique, avec l'outil heuristique, réussit bien à résoudre ces problèmes avec des résultats acceptables.

4.2 Le système manufacturier cellulaire SMC

Le système manufacturier cellulaire est une application de la Technologie de Groupe (TG). « La TG est une philosophie de production qui identifie pièces, procédures et machines par ses attributs, et les regroupe par rapport à ses similarités. Ce qui augmente l'efficacité et l'efficacité d'administrer ses éléments » (Jeon et al., 1998).

« Dans un système manufacturier cellulaire, les pièces semblables réunies comme familles de pièces, sont produites en cellules de manufacture ou famille de machines dissemblables, lesquelles sont physiquement proches et peuvent produire complètement une famille de pièces » (Mansouri et al., 2000).

Le système manufacturier cellulaire a comme objectif l'utilisation efficiente des ressources, machines et travailleurs, afin de minimiser le coût et obtenir des avantages compétitifs tels que l'amélioration de la qualité, être plus réceptif au marché et devenir plus flexible quant aux produits à traiter.

4.3 Le problème de formation de cellules

« La formation de cellules consiste en la formation de familles de pièces et groupes de machines dans lesquels les familles de pièces seront traitées. C'est la première étape dans la conception du système manufacturier cellulaire » (Hyer et Wemmerlöv, 2002).

« La formation de cellules est un problème avec une résolution complexe et même dans des conditions assez restrictives elle est connue comme un problème NP-complet » (Sarker et Yi 2000). Face à la difficulté de sa résolution, la recherche a été dirigée principalement vers le développement d'heuristiques performantes à la place de techniques de résolution optimales.

La recherche réalisée au sujet de la formation de cellules a amené au développement de plusieurs techniques de résolution. Ainsi, il existe des méthodes graphiques, matriciels, descriptives, de programmation mathématique, d'intelligence artificielle, etc. (Kusiak 1992; Selim et al., 1998). Toutes ces méthodes utilisent des concepts de la Technologie de Groupe pour la formation de cellules.

4.3.1 Objectifs et contraintes de conception du SMC.

La conception du système manufacturier cellulaire et conséquemment la formation de cellules sont abordées différemment selon la problématique particulière définie par les objectifs et contraintes de conception comme :

- **Le réaménagement.** Il s'agit de la réorganisation à partir d'un aménagement quelconque vers un aménagement cellulaire avec les ressources actuelles (machine-travailleur), ce qui est très différent de la conception d'un système manufacturier cellulaire, où la problématique doit considérer la sélection de nouvelles machines, sélection ou embauche de travailleurs et la postérieure formation de cellules avec ces ressources.
- **Le niveau d'automatisation de machines.** Normalement, la considération d'équipements hautement automatisés détermine une participation des travailleurs très réduite, donc les coûts et performance des travailleurs ne sont pas aussi importants que celles des machines. Conséquemment l'analyse se centre sur la ressource machine en cherchant son utilisation efficiente. La figure 4.1 montre l'exemple d'une cellule avec 4 machines où chaque machine réalise au moins deux opérations afin d'avoir une utilisation efficiente des machines. Cette situation est totalement différente à celle représentée par la figure 4.3 où il existe 9 machines pour les 9 opérations, donc l'utilisation des machines est moins efficiente.

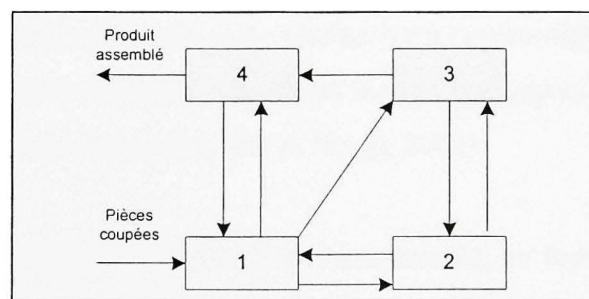


Figure 4.1 Cellule de production avec utilisation maximale de machines (9 opérations - 4 machines).

- **La versatilité de machines.** La versatilité est définie comme la capacité de réaliser différents types d'opérations sur pièces différentes. La versatilité est offerte principalement par des machines contrôlées numériquement. Donc, on sélectionne

d'avantage ces types de machines par rapport aux prix, à l'alternative d'acheter plusieurs machines non flexibles pour réaliser les mêmes opérations.

- ***La flexibilité de routage.*** Des pièces similaires peuvent être traitées sur différentes routes simultanément. Cela est possible si les temps de mise en course ne sont pas importants. Normalement, ils sont en fonction du niveau d'automatisation des machines. L'importance du temps de mise en course dans l'industrie de la confection oblige à travailler par lots de production, comme c'est le cas du *Production Bundle System* qui est très populaire dans l'industrie d'habillement (Chuter, 1995).
- ***Les coûts des machines et travailleurs.*** L'importance relative de ces coûts dans le coût total, détermine que le processus de formation de cellules se centre principalement sur une de ces ressources selon son importance, en cherchant son utilisation efficiente.
- ***La reconfiguration de cellules.*** Dans le cas de produits saisonniers ou de grand nombre de produits, il faut reconfigurer la cellule afin d'obtenir une performance acceptable pour tous les produits. Une alternative à la reconfiguration physique est la conception de cellules virtuelles, lesquelles sont reconfigurées virtuellement avec un coût minime de réaménagement (Mak et Wang, 2002).
- ***La similarité de pièces/produits.*** Traditionnellement, la formation de familles de pièces dans la TG est réalisée par rapport à la similarité de procédés et/ou formes des pièces. Ces pièces sont des composants d'un produit final, donc les machines sont regroupées en cellules pour les produire. Une alternative qui permet de réduire les temps de terminaison de produits finaux assemblés est le Système Manufacturier Cellulaire Focalisé (SMCF) qui est un système d'aménagement qui regroupe les composantes par produits finaux et forme des cellules de machines pour produire ces produits finaux assemblés (Al-Mubarak et al., 2003).

- ***La versatilité des travailleurs.*** Pour la conception, on peut considérer qu'il existe différents degrés de versatilité des travailleurs. C'est-à-dire que certains travailleurs ne sont pas capables de réaliser quelques opérations. Mais selon plusieurs études, dans un système cellulaire, il est hautement recommandable que les travailleurs soient totalement versatiles, car ils doivent être capables de réaliser toutes les opérations, pour ainsi profiter d'une bonne performance en la cellule. Dans ce système les travailleurs se déplacent entre machines pour réaliser les opérations (Gilbert, 1991; Solinger, 1988; Black et Chen, 1995). Cette versatilité permet aussi à la cellule de réduire l'impact de l'absentéisme des travailleurs sur la performance de la cellule, parce que le travailleur pourra être facilement remplacé par les autres travailleurs.

En considérant ces contraintes principales ainsi que d'autres qui sont très liées à l'industrie de la confection de vêtements, on a défini le SMC de façon à obtenir la meilleure performance possible. Ces autres contraintes principales sont décrites à la section 4.4 et ils font partie de nos hypothèses de conception.

Le problème de formation de cellules dans notre cas spécifique peut se définir comme suit:

« Si on connaît le nombre, le type, la capacité de production de chaque machine et travailleur, le nombre et le type de produits à être fabriqués dans chaque saison, le routage et les temps de production de chaque produit, quelles machines, quels travailleurs et quelles pièces associées devront être regroupés ensemble pour former les cellules d'assemblage? »

4.4 Hypothèses de conception

La conception du système manufacturier cellulaire dans l'industrie de confection doit considérer certaines particularités de cette industrie. Pour ces raisons, les cellules envisagées dans cette étude ont les caractéristiques suivantes :

1. Chaque cellule réalise l'assemblage de produits finaux, sauf dans le cas de produits avec un grand nombre d'opérations. Dans ce cas, les cellules traitent des sous-ensembles ou des composants.
2. La formation de familles de produits se réalise en considérant les similarités des processus et ressources nécessaires pour la production des produits finaux ou sous-ensembles appliquant le concept de système manufacturier cellulaire focalisé (SMCF).
3. Le niveau d'automatisation n'est pas très significatif et les temps de mise en course sont importants en comparaison aux temps d'opération. Ces temps de mise en course comprennent le temps d'arrêt pour changer le fil, l'aiguille, les accessoires, etc.; le calibrage de machines et la reconfiguration du processus d'assemblage. Donc, afin de réduire le nombre de mises en course, chaque type de produit sera traité une type à la fois, c'est-à-dire un type de produit occupera une cellule pendant tout le temps nécessaire pour produire la commande en cours de ce produit (temps total de cycle de la commande). La figure 4.2 montre une représentation de la séquence dans le traitement des commandes de trois types de produits (○, ▲ et □).

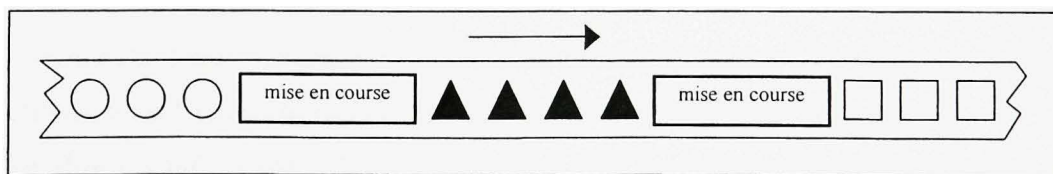


Figure 4.2 Séquence de traitement des produits dans la cellule.

4. Le coût de la main d'œuvre dans l'industrie de la confection représente de 30 % à 50 % du coût total (Lin et al., 2002). Cela est plus évident dans les industries des pays développés avec des coûts de main d'œuvre élevés. Conséquemment, la conception se centre dans la maximisation de l'emploi du travailleur en cherchant sa pleine utilisation. Donc, un emploi efficient de la ressource travailleur est une priorité.
5. Il n'existe pas de flexibilité de routage, par conséquent chaque opération d'un produit sera réalisée par une seule machine. Le nombre de machines utilisées sera égal au nombre d'opérations du produit. La ligne de production pour chaque produit aura une seule route.
6. Une cellule pourra traiter plus d'un produit, si la somme de temps total de cycle des produits à traiter est inférieure au temps disponible dans la saison. Dans ce cas-ci, la cellule sera réaménagée pour chaque produit.
7. Chaque produit est assigné à une seule cellule, la capacité d'une cellule est assez suffisante pour répondre à la demande de chaque produit. On considère que les produits à traiter dans le système sont hauts de gamme. Les demandes sont assez petites et c'est pour cette raison qu'on décide d'utiliser le SMC.
8. Il existe toujours des différences dans la performance (vitesse) des travailleurs. Il y aura différents types de travailleurs, mais tous les travailleurs devront être totalement versatiles et ils pourront réaliser toutes les opérations.
9. Le nombre maximal de travailleurs dans la cellule est égal au nombre de postes de travail (opérations - machines). Il s'agit de maximiser l'emploi du travailleur sur plus d'une machine. Il doit exister un flux ordonné de produits qui facilite la bonne performance du travailleur, parce qu'il détermine la cadence de la production. Selon Chuter (1995), la relation machine-travailleur fréquemment utilisée dans l'industrie de la confection est de 4 machines par travailleur.
10. Le flux de pièces est à l'unité ou à flux tiré. La pièce sera traitée de façon continue sur la ligne dans chaque machine avec très peu d'interruptions dans son flux, conséquemment le temps d'attente sera minime. On applique le principe de

production à l'unité (*stock on hand*) ce qui amène à avoir toujours la ligne de production en équilibre.

11. Afin de réduire le temps de déplacement du travailleur, la forme la plus recommandée et la plus utilisée dans l'industrie de vêtements est en forme de U (*U-shaped assembly cells*) (figure 4.3).

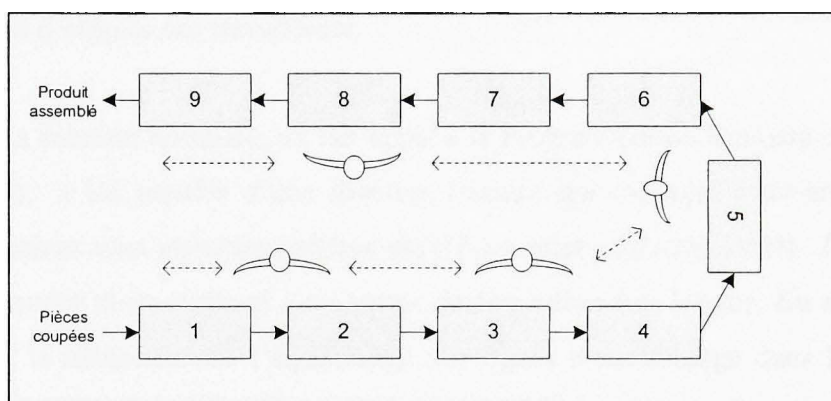


Figure 4.3 Système manufacturier cellulaire avec utilisation efficace de travailleurs (9 opérations - 9 machines - 4 travailleurs).

12. Il existe un nombre limite de travailleurs (NXTrav) à placer dans une cellule. Ce nombre est fonction de la meilleure performance que peut porter une équipe de travail. Cette performance est le résultat des facteurs psychologiques, qu'on ne peut pas étudier dans le modèle, mais on peut fixer un nombre limite de travailleurs comme un paramètre de conception.
13. L'assignation spécifique de chaque travailleur à chaque opération sur la ligne de production sera définie dans l'étape de simulation.

La production de quelques produits dans la même ligne (cellule) et la limitation quant à l'importance du temps de mise en course suggère un problème d'ordonnancement dans lequel il faut décider la séquence d'assemblage des lots. Dans ces conditions, la cellule fonctionne comme une ligne multi-produits.

4.5 Approche analytique

Le modèle analytique développé considère l'équilibrage de lignes, lequel a une incidence directe sur la sélection des machines et travailleurs et conséquemment sur le coût total. Donc, le modèle a comme objectif la minimisation du coût total. Ce coût considère les coûts variables et fixes des machines, ainsi que les coûts d'embauche, de licenciement et d'emploi des travailleurs.

Pour trouver la solution optimale, on fait appel à la Programmation Linéaire en nombres Mixtes (PLM). « Un modèle d'une fonction linéaire qui est sujet à un ensemble de contraintes linéaires avec variables entières est NP-complet » (Garey, 1979). Donc, il est difficile à résoudre et on s'attend à un temps de résolution très longue. En outre, notre modèle inclut la réalisation de l'équilibrage des lignes d'assemblage dans le contexte *generalized assembly line balancing problem* (GALBP) lequel est connu comme étant un problème NP-complet (Bukchin et Tzur, 2000). Un modèle analytique est pratiquement inutile pour la conception de systèmes manufacturiers dans l'industrie de l'habillement où il est bien connu qu'il existe une grande quantité de produits (styles), plus d'une saison, et un nombre assez grand d'opérations par produit. Tout cela exige pour sa modélisation une grande quantité de variables entières.

Plusieurs modèles analytiques ont été formulés par plusieurs auteurs. Une révision des modèles analytiques qui utilisent la technique de la programmation mathématique est présentée par Selim, Askin et al. (1998). Il s'agit de modèles de programmation linéaire, en nombres entiers, non linéaires, programmation dynamique, etc. En plus de cette révision, l'article présente la formulation d'un modèle pour résoudre le problème général de formation de cellules, qui considère les coûts d'achat et d'utilisation de machines et sa conséquente assignation, l'outillage, le transport des matériaux dû au flux intercellulaire et l'assignation des travailleurs aux cellules. Ce modèle ne considère pas la formation de cellules par saisons.

Le modèle développé dans ce présent mémoire considère l'allocation des ressources « travailleurs et machines » aux cellules d'assemblage formées pour chaque saison. Il tient en compte la reconfiguration de cellules entre les saisons avec les mêmes ressources (machines) et la possibilité d'embaucher ou licencier des travailleurs entre les saisons. Ce modèle ne considère pas la flexibilité de routage.

4.5.1 Hypothèses pour la formulation analytique

1. Il existe plusieurs types de machines (*NTM*) qui peuvent réaliser chaque opération. Chaque machine candidate peut faire plus d'une opération.
2. Pour chaque type de machine les données suivantes sont définies :
 - Coût fixe (*CFM*).
 - Coût Variable (*CVM*).
 - Taux d'Utilisation Maximale de Machines (*TUM*).
 - Taux de disponibilité de la machine (*UTR*).
3. Pour chaque opération, il existe *NTT* types de travailleurs candidats.
4. Chaque type de travailleur est capable de réaliser toutes les opérations, ils sont complètement versatiles (*cross-trained*). La différence entre eux est par rapport à la vitesse d'exécution des opérations, et le coût que représente l'emploi, l'embauche et le licenciement.
5. Pour chaque type de travailleur, il existe les données suivantes :
 - Coût de Main d'œuvre (*CMO*).
 - Coût d'Embauche (*CE*).
 - Coût de Licenciement (*CL*).
 - Taux d'utilisation maximale de travailleurs (*TUT*).
6. La demande de chaque produit est de type déterministe.
7. Le temps d'opération est de type déterministe et dépend du type de machine utilisée et du type de travailleur.
8. Les opérations ne peuvent pas être divisées.

9. Chaque opération sera réalisée sur la machine de la station correspondante seulement.
10. Il existe une seule machine par opération.
11. Les temps de mise en course sont considérés inclus dans la durée de chaque opération.
12. Le taux de rejet d'une opération sera considéré ici comme une moyenne des taux de rejet de tous les travailleurs et machines candidates dans l'opération.
13. Il existe une limite maximale pour le nombre de machines (*NXMach*) et travailleurs (*NXTrav*) qui devront être assignés à une cellule.
14. Le modèle n'est pas limité par la disponibilité de capital d'investissement ou de l'espace physique de plancher et il ne considère pas l'emplacement physique des machines (aménagement).

4.5.2 Modèle d'optimisation AMSMT (assemblage, multi-saison, machine-travailleur).

Le modèle a comme objectif la minimisation du coût total (exprimé en valeur de coût annuel équivalente). Ce coût inclut :

- Le coût d'investissement en machines.
- Le coût de fonctionnement des machines.
- Le coût d'embauche et de licenciement de travailleurs.
- Le coût d'emploi de la main d'œuvre.

Ici, le coût total est en réalité un coût partiel parce qu'on ne tient pas en compte les coûts des matières premières et autres, ces coûts n'ont pas une incidence directe sur l'aspect de conception du système cellulaire, donc son inclusion n'est pas importante dans ce modèle.

Le modèle possède des variables en nombres réels et entiers qui compliquent sa résolution. Les variables en nombres entiers représentent les machines et travailleurs qui réalisant chaque opération de chaque produit, en chaque machine, cellule et saison.

4.5.3 Notation

Indices:

$s :$	Saison.
$c :$	Cellule.
$i :$	Produit.
$j :$	Opération.
$n :$	Type de machine.
$t :$	Type de travailleur.

Pour des raisons de simplification de la description on a défini:

Cellule $sc :$	Cellule c à la saison s .
Produit $sci :$	Produit i de la cellule c de la saison s .
Produit $si :$	Produit i de la saison s .
Opération $scij :$	Opération j du produit sci .
Opération $sij :$	Opération j du produit i de la saison s .

Variables de décision :

$Y_{scijnt} :$	Capacité utilisée de la machine n et du travailleur t par l'opération j du produit i dans la cellule c à la saison s .
$TC_{sci} :$	Temps total de cycle du produit sci .
$NT_{sct} :$	Nombre de travailleurs de type t dans la cellule sc .
$TE_t :$	Nombre de travailleurs de type t embauchés durant toute l'année.
$TEI_t :$	Nombre de travailleurs de type t embauchés dans la saison 1.
$TL_t :$	Nombre de travailleurs de type t licenciés durant toute l'année.

- M_{scn} : Nombre de machines de type n à acheter pour la cellule sc .
- MA_{sn} : Nombre de machines de type n ajoutées au système dans la saison s .
- MM_{scijn} : Égale à 1 si la machine n est utilisée dans l'opération $scij$.
Égale à 0 si la machine n n'est pas utilisée dans l'opération $scij$.
- L_{sci} : Demande du produit i dans la saison s en la cellule c .
- P_{sci} : Égale à 1 Si le produit i est assigné à la cellule sc .
Égale à 0 Si le produit i n'est pas assigné à la cellule sc .

Paramètres :

- T_{sijnt} : Durée de l'opération sij dans la machine type n quand elle est réalisée par le travailleur type t .
- D_{si} : Demande du produit i dans la saison s .
- TDS_s : Temps disponible dans la saison s .
- R_{sij} : Taux de rejet de l'opération sij .
- UTR_n : Taux de disponibilité de la machine de type n .
C'est le pourcentage du temps où la machine est disponible pour son utilisation, il est calculé par :

$$UTR_n = \frac{MTBF_n}{MTBF_n + MTTR_n} \quad (4.1)$$

- $MTBF_n$: Temps moyen entre pannes d'une machine de type n .
- $MTTR_n$: Temps moyen de réparation d'une machine de type n .
- TUM_n : Taux d'utilisation maximal de la machine de type n .
C'est la capacité réelle de la machine en termes de pourcentage en relation avec la capacité nominale.
- TUT_t : Taux maximal d'utilisation du travailleur de type t .
- CVM_{sn} : Coût variable dans la saison s d'une machine de type n complètement chargée (énergie, maintenance).
- CFM_n : Coût fixe annuel d'une machine de type n (dépréciation).
- CMO_{st} : Coût de main d'œuvre du travailleur de type t pour la saison s .

- CE_t : Coût d'embauche du travailleur de type t .
Il inclut le coût encouru dans le recrutement et la formation du travailleur.
- CL_t : Coût de licenciement de travailleurs de type t .
- NS : Nombre de saisons.
- NC_s : Nombre de cellules dans la saison s .
- NP_s : Nombre de produits dans la saison s .
- NTT : Nombre de type de travailleurs.
- NTM : Nombre de type de machines.
- NO_{si} : Nombre d'opérations du produit si .
- MXM_s : Nombre maximal de machines dans la saison s .
- MXT : Nombre maximal de travailleurs dans chaque cellule.

La figure 4.4 montre le diagramme d'opérations d'une ligne d'assemblage avec 10 opérations. L'ensemble principal est représenté par la branche principale et trois sous-ensembles (a, b et c) sont représentés par les branches secondaires. Les opérations 2, 3, et 4 représentent les opérations d'assemblage des sous-ensembles a, b et c à l'ensemble principal.

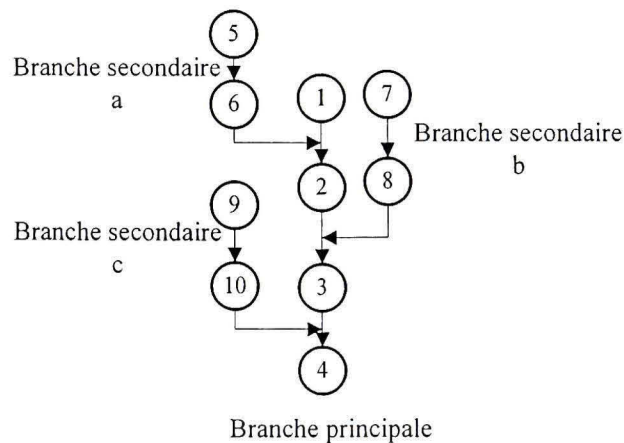


Figure 4.4 Diagramme d'opérations d'une ligne d'assemblage.

- $OFBP_{si}$: Opération finale de la branche principale du produit si . ($= 4$).
 $OIBS_{sib}$: Opération initiale de la branche secondaire b du produit s . ($= 7$).
 $OFBS_{sib}$: Opération finale de la branche secondaire b du produit si . ($= 8$).
 NB_{si} : Nombre de branches du produit si . ($= 3$ branches).

4.5.4 Formulation du modèle AMSMT (assemblage, multi-saison, machine-travailleur).

Fonction objectif :

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{s=1}^{NS} \sum_{c=1}^{NC_s} \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} Y_{scijnt} \times CVM_{sn} + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{n=1}^{NTM} MA_{sn} \times CFM_n \\
 & + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{c=1}^{NC_s} \sum_{t=1}^{NTT} NT_{sct} \times CMO_{st} + \sum_{t=1}^{NTT} (TE_t \times CE_t + TL_t \times CL_t)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Contraintes :

Branche principale : Satisfaction de la demande externe par cellule

$$\sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} \left(Y_{scijnt} \frac{TDS_s \times UTR_n \times (1 - R_{sij})}{T_{sijnt}} \right) = L_{sci} \tag{4.3}$$

$$\forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = OFBP_{si}$$

Branches secondaires : Satisfaction de la demande externe des branches

$$\sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} \left(\frac{Y_{scijnt} \times UTR_n \times (1 - R_{sij})}{T_{sijnt}} \right) = \sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} \left(\frac{Y_{sciAnt} \times UTR_n}{T_{siAnt}} \right) \tag{4.4}$$

$$\forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = OFBS_{sib}, b = 1, \dots, NB_{si},$$

A = opération d'assemblage dans la branche principale.

Satisfaction de la demande interne dans la branche principale et les branches secondaires :

$$\sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} \left(\frac{Y_{scijnt} \times UTR_n \times (1 - R_{sij})}{T_{sijnt}} \right) = \sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} \left(\frac{Y_{sciknt} \times UTR_n}{T_{siknt}} \right) \quad (4.5)$$

Branche principale :

$$\forall s, i = 1, \dots, NP_s, j = 1, \dots, (OFBP_{si} - 1), k = j + 1$$

Branches secondaires :

$$\forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = OIBS_{sib}, \dots, (OFBS_{sib} - 1), k = j + 1$$

Satisfaction de la demande externe par une seule cellule :

$$L_{sci} = D_{si} \times P_{sci} \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s \quad (4.6)$$

$$\sum_{c=1}^{NC_s} P_{sci} = 1 \quad \forall s, i = 1, \dots, NP_s \quad (4.7)$$

Temps total de cycle :

$$\sum_{t=1}^{NTT} Y_{scijnt} \leq TC_{sci} / TDS_s \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = 1, \dots, NO_{si}, n \quad (4.8)$$

$$\sum_{i=1}^{NP_s} TC_{sci} \leq TDS_s \quad \forall s, c \quad (4.9)$$

Capacité des machines :

$$\sum_{t=1}^{NTT} Y_{scijnt} \leq MM_{scijn} \times TUM_n \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = 1, \dots, NO_{si}, n \quad (4.10)$$

Machines par saison - cellule :

$$\sum_{j=1}^{NO_{si}} MM_{scijn} \leq M_{scn} \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, n \quad (4.11)$$

Machines par opération :

$$\sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{n=1}^{NTM} MM_{scijn} = NO_{si} \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s \quad (4.12)$$

$$\sum_{n=1}^{NTM} MM_{scijn} \leq 1 \quad \forall s, c, i = 1, \dots, NP_s, j = 1, \dots, NO_{si} \quad (4.13)$$

Nombre maximal de machines :

$$\sum_{c=1}^{NC_s} \sum_{n=1}^{NTM} M_{scn} \leq MXM_s \quad \forall s \quad (4.14)$$

Nombre de machines à acheter :

$$\sum_{c=1}^{NC_s} M_{scn} = MA_{sn} \quad \forall n, s = 1 \quad (4.15)$$

$$\sum_{c=1}^{NC_s} (M_{scn} - M_{(s-1)cn}) \leq MA_{sn} \quad \forall n, s = 2, \dots, NS \quad (4.16)$$

Capacité des travailleurs :

$$\sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{n=1}^{NTM} Y_{scijnt} \leq NT_{sct} \times TUT_t \quad \forall s, c, t \quad (4.17)$$

Nombre maximal de travailleurs :

$$\sum_{t=1}^{NTT} NT_{sct} \leq MXT \quad \forall s, c \quad (4.18)$$

Nombre de travailleurs à embaucher :

$$\sum_{s=1}^{NS-1} \sum_{c=1}^{NC_s} (NT_{s+1,c,t} - NT_{sct}) \leq TE1_t \quad \forall t \quad (4.19)$$

$$\sum_{c=1}^{NC_s} NT_{sct} + TE1_t = TE_t \quad \forall t, s = 1 \quad (4.20)$$

Nombre de travailleurs à licencier :

$$\sum_{s=1}^{NS-1} \sum_{c=1}^{INC_s} (NT_{sct} - NT_{s+1,ct}) \leq TL_t \quad \forall t \quad (4.21)$$

Où :

$$Y_{scijnt}, M_{scn}, MA_{sn}, TE_t, TE1_t, TL_t, TC_{sci}, L_{sci} \geq 0$$

$$NT_{sct} \geq 0, \text{ et entière}$$

$$MM_{scijn}, P_{sci} \text{ binaire}$$

4.5.5 Description de la formulation

La fonction objective établit la minimisation du coût total. Donc, elle décrit le coût d'utilisation des machines, le coût d'acquisition ou d'investissement, le coût d'emploi de main d'œuvre et les coûts d'embauche et de licenciement des travailleurs dans toute la période d'analyse.

Contrainte 4.3 : La production de la dernière opération devra satisfaire la demande externe. Le calcul de la production considère des facteurs comme le temps disponible dans la saison (TDS_s) pour réaliser la production, la disponibilité de la machine (UTR_n), Le taux de rejet dans la dernière opération (R_{sij}).

Contrainte 4.4 : La production de la dernière opération du sous-ensemble b , doit être égale à la demande de l'opération d'assemblage dans la branche principale.

Contrainte 4.5 : La production de chaque opération, dans la branche principale et les branches secondaires, doit être égale à la demande de l'opération suivante.

Les contraintes 4.6 et 4.7, Assurent que la demande D_{si} du produit i sera satisfaite par la production d'une seule cellule.

Contrainte 4.8 : Le temps employé pour tous les travailleurs sur la machine n en produisant le produit i doit être inférieur au temps total de cycle du produit, qui est défini par l'opération la plus lente.

Contrainte 4.9 : Le temps employé pour traiter tous les produits dans une cellule ne devra pas être supérieur au temps disponible dans la saison.

Contrainte 4.10 : L'utilisation de la machine type n , par tous les travailleurs, ne peut pas dépasser sa propre capacité, laquelle est limitée par le taux d'utilisation maximale TUM_n .

La contrainte 4.11 : Détermine que le nombre d'assignations de machines type n à toutes les opérations de chaque produit de la cellule sc devra être inférieur ou égale au nombre des machines type n dans la cellule sc .

Contrainte 4.12 : Le nombre de machines devra être égal au nombre d'opérations. Il doit exister une seule machine par opération.

Contrainte 4.13 : Au maximum un seul type de machine devra être utilisé pour réaliser l'opération $scij$.

Contrainte 4.14 : Le nombre total de machines de type n assignées à la cellule sc ne devra pas dépasser le nombre maximal de machines par cellule de la saison s (MXM_s)

Contraintes 4.15 et 4.16 : Le nombre de machines ajoutées dans la saison s est égal au nombre de machines existantes dans la saison présente moins le nombre de machines existantes dans la saison précédente.

Contrainte 4.17 : L'utilisation ou l'emploi du travailleur de type t ne peut pas dépasser sa propre capacité, laquelle est limitée par le taux maximal d'utilisation. TUT_t .

Contrainte 4.18 : Le nombre total de travailleurs dans la cellule sc ne devra pas dépasser la quantité maximale MXT .

Contrainte 4.19 et 4.20 : Le nombre de travailleurs de type t embauchés dans la saison est égal au nombre de travailleurs existants dans la saison présente moins le nombre de travailleurs existants dans la saison précédente.

Contrainte 4.21 : Le nombre de travailleurs de type t licenciés dans la saison est égal au nombre de travailleurs existants dans la saison présente moins le nombre de travailleurs existants dans la saison suivante.

Le modèle est formulé avec des variables réelles, un type de variable entière (NT_{sct}) et deux types de variables binaires (MM_{scijn} et P_{sci}).

4.5.6 Résolution du modèle analytique

Le modèle analytique possède un grand nombre de contraintes et de variables. Le tableau suivant présente les formules pour calculer le nombre de contraintes et de variables de ce modèle.

Tableau 4.1

Formules pour le calcul du nombre de variables et contraintes.

Nombre de contraintes		$3T+S(2C+P+M+1)+SC(P(3+2O+M+2OM))$
Nombre de Variables:		
Réelles		$SM(CPOT+C+1)+3T+2CP$
Entières		SCT
Binaires		SCP(OM+1)

Nombre de : S= saisons, C=cellules, P=produits, O=opérations, M=machines et T=travailleurs

Pour la résolution du modèle analytique on utilise le logiciel ILOG-OPL version 3.7 qui est un langage de programmation pour l'optimisation. Il est très performant et amplement utilisé. Dans ce langage de programmation, on écrit un programme qui représente le modèle (*.mod) et une base de données qui est l'archive des paramètres du modèle (*.dat), les deux font partie d'un projet (*.prj). Donc le modèle est général, et on change seulement l'archive des données pour résoudre d'autres problèmes. La section 4.7 présente quelques exemples numériques de résolution.

4.6 Approche empirique

Sachant que le problème de formation de cellules est un problème NP-complet, on propose l'utilisation d'une heuristique afin de surmonter la difficulté de la résolution du modèle analytique. Cette heuristique est capable de trouver une solution faisable dans un temps très court en comparaison au modèle analytique. De plus, ce modèle peut résoudre des problèmes de grandes tailles.

L'heuristique calcule le nombre de cellules dans le système, le nombre de machines et de travailleurs dans chaque cellule, et l'assignation des produits aux cellules, machines et travailleurs. L'heuristique développée dans ce mémoire considère les besoins très particuliers de notre problématique comme :

- *La multi saisonnalité* : La demande des produits varie de saison en saison, cette variation est en rapport avec la quantité et les types de produits demandés, conséquemment on devra reconfigurer les cellules à chaque saison avec l'ensemble de machines de la saison précédente. Il se peut que pendant certaines saisons, quelques machines ne soient pas utilisées, par contre dans d'autres saisons elles seront employées pleinement. Dans le cas des travailleurs, ils seront embauchés ou licenciés selon les besoins de main d'œuvre entre les saisons.
- *L'assemblage* : Les processus de production de vêtements sont des processus d'assemblage principalement. Pour cette raison l'heuristique considère cet aspect important du processus de production.
- *La production à l'unité* : On ordonne la production de façon à minimiser les temps de mise en course. La production des commandes qui arrivent des différents types de produits se réalise à l'unité (flux tiré).

- *Assignment unique de machine-opération* : Une machine réalise une seule opération par produit. Donc, pour la production d'un type de produit on utilise autant de machines que d'opérations que possède ce type de produit.
- *Assignment exclusive pendant le temps total de cycle de la commande* : Les ressources de la cellule (machines et travailleurs) sont assignées à un type de produit pendant tout le temps total de cycle de la commande de ce produit. Pendant ce temps, elles ne sont pas disponibles pour réaliser les opérations sur d'autres types de produits.

Ces deux dernières considérations entraînent l'inexistence de flexibilité de routage.

4.6.1 Heuristique de formation de cellules (HFC).

L'heuristique réalise la formation de cellules autonomes sans flux intercellulaire, normalement l'introduction de flux intercellulaire a comme objectif la réduction de la sous-utilisation de machines. Dans le contexte de l'industrie de vêtement, où les coûts relatifs aux machines sont inférieurs aux coûts des travailleurs, la sous utilisation des machines n'a pas un impact économique plus important que la sous utilisation du travailleur. Donc, les cellules formées par l'heuristique seront totalement autonomes, les produits seront traités entièrement dans la cellule assignée.

L'heuristique développée est en réalité une composition de deux (2) heuristiques qui réalisent :

- L'agrégation de cellules.
- La sélection de machines-travailleurs.

Au départ, on assigne chaque produit à une cellule, donc le nombre de cellules est égal au nombre de produits ($NC_s = NP_s$) Cette assignation initiale considère que la demande

sera toujours assez petite et pourra être satisfaite par la production d'une seule cellule, cela malgré les limitations de conception imposées comme le nombre maximal de machines par cellule (MXM), et par opération (une par opération).

L'agrégation de cellules consiste en la fusion de deux cellules qui possèdent le plus grand coefficient de similarité, ce qui signifie que les deux cellules possèdent des groupes de machines et des travailleurs semblables en type et en nombre. Pour cette raison il est convenable de fusionner ces deux cellules afin de réduire le coût d'exploitation des machines et travailleurs. Cette agrégation se réalise jusqu'à ce que la cellule formée par l'agrégation atteinte une limite déterminée par les paramètres de conception :

- Nombre maximal de produits dans une cellule ($NXProd$).
- Nombre maximal de machines dans une cellule ($NXMach$).
- Coefficient de similarité minimal $MINCSS$.
- Ou qu'il n'existe plus de cellules à agréger dans chaque saison.

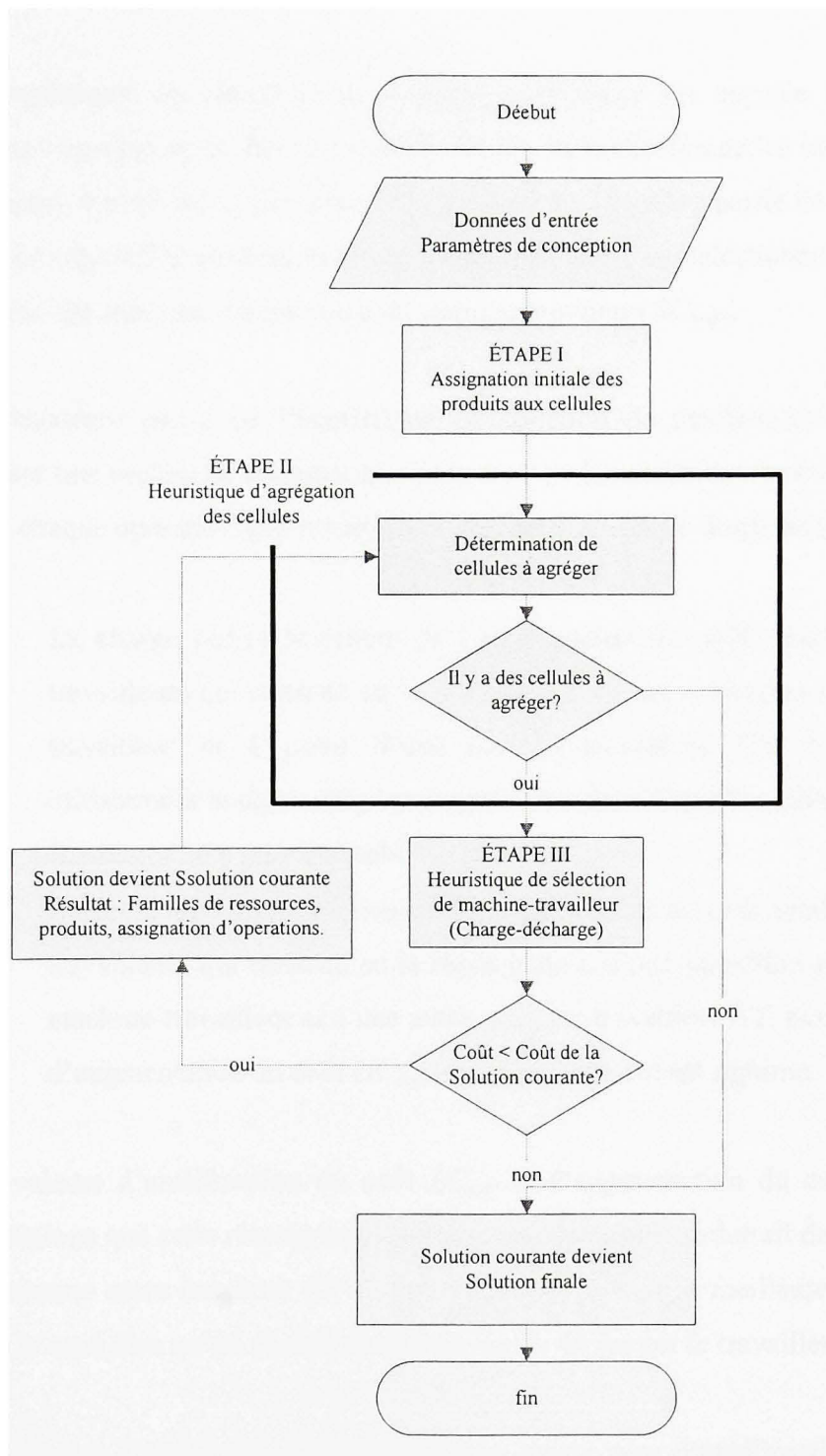


Figure 4.5 Diagramme logique général de l'heuristique de formation de cellules (HFC).

L'heuristique de sélection de machine-travailleur est appelée chaque fois qu'on réalise l'agrégation ou fusion de deux cellules. Elle sélectionne les nouveaux groupes de machines-travailleurs pour toutes les cellules. La première partie de cette heuristique a comme objectif la génération d'une solution faisable, on sélectionne les machines pour chaque opération par rapport au coût statique minimum SC_{scijn} .

La deuxième partie de l'heuristique de sélection de machine-travailleur consiste à réaliser une recherche systématique pour trouver les machines-travailleurs plus adéquats pour chaque opération, par le moyen de la charge-décharge d'opérations :

- La charge utilise le critère de l'amélioration du coût total d'exploitation des travailleurs qui consiste en la réassignation d'une opération $scij$ à une machine-travailleur nt à partir d'une machine-travailleur NT , à laquelle elle est initialement assignée, et pour laquelle la valeur d'amélioration du coût LC_{scij} (cf. équation 4.45) est maximale.
- La décharge utilise le critère de l'augmentation du coût total d'exploitation des travailleurs qui consiste en la réassignation d'une opération $scij$ traitée dans une machine-travailleur nt à une autre machine-travailleur NT , pour laquelle la valeur d'augmentation du coût UC_{scij} (cf. équation 4.46) est minimale.

Les valeurs d'amélioration du coût LC_{scij} et d'augmentation du coût UC_{scij} sont des estimations que cette réassignation (charge ou décharge) produirait dans le coût total. On sélectionne entre ces deux (2) valeurs celle qui produit la meilleure réduction du coût total, c'est à dire qu'on choisit de charger ou de décharger le travailleur t .

La sélection s'arrête quand l'heuristique ne trouve plus d'amélioration du coût dans la charge-décharge.

4.6.2 Notation

Les indices utilisés sont les mêmes que dans la notation du modèle analytique, ainsi que plusieurs variables et paramètres. D'autres paramètres et variables particuliers à cette approche sont les suivants :

Données d'entrée :

$NS :$	Nombre de saisons.
$NP_s :$	Nombre de produits dans la saison s .
$NTM :$	Nombre de type de machines.
$NO_{si} :$	Nombre d'opérations du produit i dans la saison s .
$NTT :$	Nombre de type de travailleurs.
$T_{sijnt} :$	Durée de l'opération sij sur la machine de type n par le travailleur de type t .
$UTR_n :$	Taux de disponibilité de la machine de type n .
$TUM_n :$	Taux maximal d'utilisation de la machine de type n .
$TUT_t :$	Taux maximal d'utilisation du travailleur de type t .
$D_{si} :$	Demande du produit i dans la saison s .
$TDS_s :$	Temps disponible dans la saison s .
$CVM_{sn} :$	Coût variable dans la saison s d'une machine de type n complètement chargée (énergie et maintenance).
$CFM_n :$	Coût fixe annuel d'une machine de type n (dépréciation).
$CMO_{st} :$	Coût de main d'œuvre d'un travailleur de type t pour la saison s .
$CEt :$	Coût d'embauche de travailleurs de type t . Il inclut le coût encouru dans le recrutement et formation du travailleur.
$CL_t :$	Coût de licenciement d'un travailleur de type t .
$R_{sij} :$	Taux de rejet dans l'opération sij .

Paramètres de conception :

- $NXMach$: Nombre maximal de machines dans une cellule.
 $NXProd$: Nombre maximal de produits dans une cellule.
 $MINCSS$: Coefficient de similarité de cellules minimal.

Variables de décision :

- OM_{sijt} : Égale à 1 si le travailleur t peut réaliser l'opération sij avec la machine de type n
 Égale à 0 si le travailleur t ne peut pas réaliser l'opération sij avec la machine de type n
 OA_{scijn} : Égale à 1 si l'opération $scij$ a été assignée à la machine n .
 Égale à 0 si l'opération $scij$ n'a pas été assignée à la machine n .
 TOA_{scijt} : Machine type à laquelle a été assignée l'opération $scij$ qui est traitée par le travailleur t .
 SM_{snm} : Coefficient de similarité dans la saison s des machines n et m

$$SM_{snm} = \frac{\sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_s} \sum_{t=1}^{NTT} (OM_{sijn} \times OM_{sijm})}{\sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_s} (OM_{sijn})} \quad \forall s, n, m \quad (4.22)$$

Il calcule l'habilité de la machine m à faire les mêmes opérations que la machine n .

- C_{sci} : Égale à 1 si le produit i est assigné à la cellule sc .
 Égale à 0 si le produit i n'est pas assigné à la cellule sc .
 NC_s : Nombre de cellules nécessaires dans la saison s .

MAC_{sij} : Nombre de machines nécessaires pour l'opération sij .

MAX_{si} : Nombre maximal de machines pour une des opérations du produit si .

$$MAX[MAC_{sij}] \quad \forall j \quad (4.23)$$

CSC_{sab} : Coefficient de similarité de la cellule a par rapport à la cellule b dans la saison s .

$$= \frac{\sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} CM_{sant} \times (MAX[CM_{sbmu} \times SM_{snm}] \forall m = 1, \dots, NTM \text{ et } u = 1, \dots, NTT)}{\sum_{n=1}^{NTM} \sum_{t=1}^{NTT} CM_{sant}} \quad \forall s, a, b \quad (4.24)$$

CM_{sant} : Égale à 1 si la cellule sa possède au moins un pair machine-travailleur nt
Égale à 0 si la cellule sa ne possède pas un pair machine-travailleur nt

CS_{ab} : Coefficient de similarité entre les cellules a et b .

$$CS_{sab} = MAX[CSC_{sab}, CSC_{sba}] \quad \forall s, a, b \quad (4.25)$$

CAP_{scijnt} : Capacité utilisée de machine-travailleur nt en réalisant l'opération $scij$.

$$= \frac{T_{sijnt} \times L_{sci}}{TDS_s \times UTR_n \times \prod_{k=j}^{NO_{si}} (1 - R_{sik})} \quad \forall s, c, i, j, n, t \quad (4.26)$$

MCP_{scn} : Capacité utilisée de la machine de type n dans la cellule sc .

$$MCP_{scn} = \sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{t=1}^{NTT} CAP_{scijnt} \quad \forall s, c, n \quad (4.27)$$

NM_{scijn} : Nombre de machines de type n nécessaires pour l'opération $scij$.

$$= \left\lceil \frac{\sum_{t=1}^{NTT} CAP_{scijnt}}{TUM_n} \right\rceil \quad (4.28)$$

NM_{scn} : Nombre de machines de type n nécessaires dans la cellule sc .

$$= MAX_i \left[\sum_{j=1}^{NO_{si}} NM_{scijn} \right] \quad (4.29)$$

NM_{sn} : Nombre de machines de type n nécessaires dans la saison s .

$$= \sum_{c=1}^{NC} MAX_i \left[\sum_{j=1}^{NO_{si}} NM_{scijn} \right] \quad \forall i \quad (4.30)$$

UM_{sn} : Utilisation des machines type n dans la saison s .

$$= \frac{\sum_{c=1}^{NC} MCP_{scn}}{NM_n} \quad (4.31)$$

AMU_{sab} : Utilisation moyenne de machines pour les cellules a et b .

$$= \frac{\sum_{n=1}^{NTM} (MCP_{san} + MCP_{scn})}{\sum_{n=1}^{NTM} (NM_{san} + NM_{sbn})} \quad \forall s, a, b \quad (4.32)$$

PR_{sij} : Demande réelle de l'opération sij .

$$= \frac{D_{si}}{\prod_{k=j}^{NO_{si}} (1 - R_{sik})} \quad (4.33)$$

\bar{T}_{sijnt} : Durée de l'opération sij sur la machine n par le travailleur t .

$$= MIN \left[\frac{T_{sijnt} \times PR_{sij}}{UTR_n} \right] \quad (4.34)$$

TCY_{sc} : Temps total de cycle des produits dans la cellule sc .

$$= \sum_{i=1}^{NP_s} MAX \left[\frac{T_{sijnt} \times PR_{sij}}{UTR_n \times MUT_n} \right] \quad \forall s, j, n / C_{sci} = 1 \quad (4.35)$$

C'est le temps que la cellule occupe pour traiter tous les produits assignés.

L_{sci} : Demande du produit i qui sera produit par la cellule sc .

SC_{scijnt} : Coût statique de l'opération $scij$ sur la machine n avec le travailleur t .

$$= \left(\frac{CFM_n}{TUM_n} + CVM_{sn} \right) \times \frac{CAP_{scijnt}}{NS} + \frac{CMO_{st}}{TUT_t} \times CAP_{scijnt} + \frac{CE_t + CL_t}{TUT_t} \times CAP_{scijnt} \quad (4.36)$$

C'est le coût associé à la capacité maximale de la ressource machine-travailleur nt en réalisant l'opération $scij$.

CC_{scijnt} : = Coût courant de l'opération $scij$ sur la machine n avec le travailleur t .

$$\left(\frac{CFM_n}{UM_{sn}} + CVM_{sn} \right) \times \frac{CAP_{scijnt}}{NS} + \frac{CMO_{st}}{UT_t} \times CAP_{scijnt} + \frac{CE_t + CL_t}{UT_t} \times CAP_{scijnt} \quad (4.37)$$

C'est le coût associé à la capacité utilisée de la ressource machine-travailleur nt en réalisant l'opération $scij$.

TCP_t : Capacité utilisée du travailleur de type t .

$$= \sum_{s=1}^{NS} \sum_{c=1}^{NC_s} \sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{n=1}^{NTM} CAP_{scijnt} \quad \forall t \quad (4.38)$$

NT_{sct} : Nombre de travailleurs de type t nécessaires pour la cellule sc .

$$= \left[\frac{\sum_{i=1}^{NP_s} \sum_{j=1}^{NO_{si}} \sum_{n=1}^{NTM} CAP_{scijnt}}{TUT_t} \right] \quad (4.39)$$

NT_{st} : Nombre de travailleurs de type t nécessaires dans la saison s .

$$= \sum_{c=1}^{NC} NT_{sct} \quad \forall s, t \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned}
 UT_t : \quad & \text{Utilisation des travailleurs de type } t. \\
 & = \frac{TCP_t}{NT_t + NS}
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
 TEMB_t : \quad & \text{Travailleurs de type } t \text{ embauchés dans la saison } s. \\
 & = NT_{st} - NT_{(s-1)t}
 \end{aligned} \tag{4.42}$$

$$\begin{aligned}
 TLIC_t : \quad & \text{Travailleurs de type } t \text{ licenciés dans la saison } s. \\
 & = NT_{(s-1)t} - NT_{st}
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

$CTOTAL :$ Coût total d'exploitation des machines et travailleurs.

$$\begin{aligned}
 & = \sum_{n=1}^{NTM} \left(CFM_n + \sum_{s=1}^{NS} CVM_{sn} \times UM_{sn} \right) \times NM_n + \sum_{s=1}^{NC_s} \sum_{t=1}^{NTT} CMO_{st} \times NT_{st} \\
 & \quad + CE_t \times TEMB_t + CL_t \times TLIC_t
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

Dans cette approche, à la différence de l'approche analytique, le nombre de cellules $NC(s)$ est une variable de décision.

4.6.3 Description de l'heuristique

L'heuristique de formation de cellules est décrite par ces étapes.

ÉTAPE I Assignment initiale

- 1.1. Assigner le produit si à la cellule c . Dans chaque saison le nombre de cellules est égal au nombre de produits $NC_s = NP_s$,

$$C_{sii} = 1 \quad \forall s, i$$

ÉTAPE II Agrégation de cellules

Le processus d'agrégation de cellules est le suivant :

- 2.1. Calculer le coefficient de comparaison de chaque paire de machines SM_{snm} .
- 2.2. Assigner chaque opération sij à la machine de type n et au travailleur de type t le plus rapide.

$$OA_{scij} = 1 \quad TOA_{scijt} = n$$

$$\forall s, i, j / C_{sci} = 1 \text{ et } n / MIN(\bar{T}) \text{ et } OM_{sijnt} = 1$$

- 2.3. Calculer le coût total. Si le coût est inférieur à celui de la solution courante, la solution présente devient la solution courante, au cas contraire elle forme une solution temporelle.
- 2.4. Calculer le temps total de cycle TCY_{sc} dans chaque cellule sc .
- 2.5. Calculer le nombre de type de produits dans chaque cellule NP_{sc} .
- 2.6. Calculer le coefficient de similarité entre cellules CS_{scc} .
- 2.7. Choisir provisoirement les cellules a et b ayant le plus grand coefficient de similarité ($CS_{sab} = \text{MAX}[CS_{scc}]$). Si $CS_{sab} = 0$ **Aller à 2.18.**
- 2.8. Si le coefficient de similarité des cellules a et b est inférieur au coefficient de similarité minimum ($CS_{sab} < \text{MIN}CS$). **Aller à 2.18.**
- 2.9. Si plus d'une paire de cellules ont le plus grand coefficient de similarité, choisir parmi ces paires celle qui possède la plus basse utilisation moyenne de machines ($\text{MIN}[AMU_{sab}]$)
- 2.10. Calculer le nombre de produits des cellules a et b choisies.
- 2.11. Si le nombre de produits des cellules choisies a et b est supérieur au nombre maximal de produits ($NXProd$), faire $CS_{sab} = 0$. **Aller à 2.7.**
- 2.12. Si le nombre de cellules est inférieur au nombre minimal de cellules $NMINCell$. **Aller à 2.18.**
- 2.13. Si le nombre de machines dans les cellules à agréger est supérieur au nombre maximal de machines par cellule $NXMach$, faire $CS_{sab} = 0$. **Aller à 2.7.**

- 2.14. Si le nombre de travailleurs dans la cellule à agréger est supérieur au nombre maximal de travailleurs par cellule $NXTrav$, faire $CS_{sab}=0$. **Aller à 2.7.**
- 2.15. Si le temps total de cycle de la cellule a (TCY_{sa}) plus celui de la cellule b (TCY_{sb}) est supérieur au temps disponible dans la saison s (TDS_s), faire $CS_{sab}=0$. **Aller à 2.7.**
- 2.16. Former une solution temporelle en fusionnant les cellules a et b (si $CS_{sab}>0$)
- 2.17. Si le coût de la solution temporelle est supérieur à celui de la solution courante **aller à 2.18**, au cas contraire, l'agrégation ou fusion de cellules a et b est acceptée et le nombre de cellules est réduit en une unité ($NC_s=NC_s-1$). La solution temporelle devient solution courante. **Aller à 3.1** pour réaliser la charge et décharge des opérations de cette dernière agrégation.
- 2.18. **Arrêter** l'heuristique. La solution courante devient la solution finale de la formation de cellules.

ETAPE III Sélection de machine-travailleur

Charge-décharge : (d'opérations).

- 3.1. Réaliser le processus de charge/décharge des opérations de chaque machine-travailleur $scnt$ de la façon suivante:

Charge

La charge d'opérations des travailleurs de type t avec les opérations réalisées par les autres travailleurs jusqu'au nombre de travailleurs NT_{scf} augmente un (1) travailleur, est réalisée de la façon suivante :

- 3.1.1. Calculer le temps total de cycle de chaque cellule (TCY_{sc}) avec l'assignation actuelle des machines et des travailleurs (OA_{scij} et TOA_{scijt}).

- 3.1.2. Charger une opération $scij$ assignée initialement à une machine N et un travailleur T à une autre machine n et travailleur t qui donne une amélioration maximale du coût total (LC_{scij}).

$$LC_{scij} = CC_{scijNT} - SC_{scijnt} \quad (4.45)$$

où $C_{sci} = 1, N = OA_{scij}, N = TOA_{scijT}, N \neq n, OM_{sijnt} = 1$

Cette charge doit respecter la limitation du temps totale de cycle en la cellule:

$$TCY_{sc} \leq TDS_s$$

- 3.1.3. Actualiser la capacité MCP_{scn} et TCP_{sct} à chaque itération de charge d'opérations et calculer le coût total ($CTOTAL$)
- 3.1.4. Continuer la charge du travailleur sct jusqu'à :
- Ce qu'il n'existe pas d'opérations à charger, ou;
 - Que le nombre de travailleurs (NT_{sct}) augmente à $NT_{sct} + 1$ avec une utilisation maximale.

Décharge

La décharge d'opérations réalisées par le travailleur t aux autres travailleurs jusqu'à la diminution du nombre de travailleurs NT_{sct} d'un (1) travailleur se réalise de la façon suivante :

- 3.1.5. Calculer le temps total de cycle dans chaque cellule TCY_{sc} avec l'assignation actuelle des machines et travailleurs (OA_{scij} et TOA_{scijt})
- 3.1.6. Décharger une opération $scij$ à partir d'une machine n et travailleur t à une autre machine N et travailleur T qui donne la plus basse augmentation du coût total (UC_{scij}).

$$UC_{scij} = CC_{scijNT} - SC_{scijnt} \quad (4.46)$$

Où : $C_{sci} = 1, n = OA_{scij}, n = TOA_{scijt}, m \neq n, OM_{sijNT} = 1$

Cette décharge doit respecter la limitation du temps totale de cycle dans la cellule:

$$TCY_{sc} \leq TDS_s$$

- 3.1.7. Actualiser la capacité MCP_{scn} et TCP_{sct} dans chaque itération de charge d'opérations et calculer le coût total ($CTOTAL$).
- 3.1.8. Continuer la décharge du travailleur sct jusqu'à :
 - Ce qu'il n'existe pas d'opérations à décharger, ou;
 - Que le nombre de travailleurs (NT_{sct}) diminue à $NT_{sct} - 1$ avec une utilisation maximale.
- 3.2. Choisir la solution de charge ou décharge du travailleur sct avec la meilleure amélioration du coût total.
- 3.3. Si cette solution est meilleure que la solution courante, elle devient solution courante, réaliser une nouvelle charge-décharge, **aller à 3.1**. Au cas contraire, **arrêter** la sélection et aller à 2.6 pour réaliser l'agrégation suivante.

L'heuristique a été programmée en utilisant le langage de programmation MATLAB. Dans sa résolution, il utilise un programme principal qui fait appel à d'autres sous-routines (*M-files* ou *script files*) qui réalisent quelques parties de la résolution de l'heuristique, de la même façon, il existe des archives dans lesquels on introduit toutes les données ainsi que les paramètres de conception.

4.7 Exemples numériques

Quatre (4) exemples numériques sont présentés, les exemples sont de trois (3) tailles différentes définies par le nombre de saisons, de produits par saison, d'opérations par produit, de types de machines et de type de travailleurs (voir tableau 4.2). Ces exemples servent à évaluer la performance des modèles dans la résolution du problème de formation de cellules.

Tableau 4.2

Taille des problèmes utilisés pour l'exemple numérique.

Problème	Nombre de saisons S	Nombre de produits NP_s^*	Nombre d'opérations NO_{st}^{**}	Nombre de type de machines NTM	Nombre de type de travailleurs NTT
A1 et A2	2	2	3	3	3
B	2	5	5	5	3
C	4	10	10	10	3

* le nombre maximal de produits en la saison.

** le nombre maximal d'opérations en la saison cellule.

Les problèmes de taille A et B sont pratiquement inexistants dans la réalité, pour le très petit nombre de produits, d'opérations et de machines candidates.

Le problème de taille C pourrait représenter ce qui se passe dans quelques industries de vêtements sportifs, lingerie, etc.; où le nombre d'opérations par produit est réduit, à cause de la simplicité du processus de ce type de produits.

La formulation du modèle analytique demande un grand nombre de variables. Le tableau 4.3 présente le nombre de variables utilisées pour la formulation de chaque problème-exemple. On peut voir que les problèmes B et C demandent un nombre important de variables binaires et entières.

Tableau 4.3

Nombre de variables et contraintes dans la formulation du modèle analytique.

Type de variable	PROBLÈME		
	A1 et A2	B	C
Réelle	251	1559	48289
Entière	12	12	48
Binaire	80	520	16160
Total variables	343	2091	64497
Contraintes	269	1399	37405

Les paramètres utilisés pour le problème du type A sont présentés ci-dessous. D'autres informations comme le coût de machines et travailleurs, les temps, les taux de rejet, etc.; sont présentées à l'Annexe I.

TDS_s :	69 120 min
$_{[min]}$	$8 \frac{heures}{jour} \times 60 \frac{min}{heure} \times 24 \frac{jour}{mois} \times 6 \frac{mois}{saison} * 1 \text{ quart}$
MUT_n :	Taux maximal d'utilisation de la machine de type n .
$_{[%]}$	On assume une utilisation de 90 %.
TUT_t :	Taux maximal d'utilisation du travailleur de type t .
$_{[%]}$	On assume une utilisation de 95 %.
MXM_s :	Nombre maximal de machines dans chaque cellule sc .
	5 machines.
MXT :	Nombre maximal de travailleurs dans chaque cellule.
	5 travailleurs.

Les solutions trouvées par les deux (2) approches sont présentées dans le tableau 4.4. Elles ont été obtenues en utilisant un ordinateur avec un processeur de 2.4 GHz et 640 Mb de mémoire RAM. Les problèmes B et C n'ont pas pu être résolus par l'approche analytique. La résolution par l'approche empirique du problème C prend un temps acceptable.

Le modèle analytique a résolu les problèmes de taille A dans un temps acceptable pour un modèle optimal. Les problèmes de taille B sont excessifs pour cette approche, le problème-exemple B a été arrêté en sa résolution après 442 min à cause de la moindre amélioration du résultat pendant le long temps de sa résolution. La solution trouvée du problème B n'est pas optimal. Le problème C n'a pu être formulé par le logiciel ILOG-OPL à cause de un manque de capacité de mémoire de l'ordinateur. Ce problème possède 64497 variables et 37405 contraintes (voir tableau 4.3). Cette approche demeure

destinée simplement pour des problèmes hypothétiques de tailles très petites. Le fichier des résultats se trouve à l'Annexe II.

Tableau 4.4

Résumé de solution des exemples numériques.

Prob.	Approche	Nombre			Coût [\$]			% de écart	Temps [min:sc]
		Cellules [s1;s2]	Mach. [n1;n2;n3]	Trav. [t1;t2;t3]	Mach.	Trav.	TOTAL		
A1	ANALYTIQUE	[2;2]	[4;0;2]	[2;0;4]	16	132	149 144	-1,37	4 :19
				[2;0;2]	423	720			
	EMPIRIQUE	[2;2]	[4;2;2]	[2;0;4]	18	132	151 190		0 :08
				[2;0;2]	470	720			
A2	ANALYTIQUE	[2;1]	[5;0;1]	[1;1;3]	13	106	119 786	-	2 :10
				[1;1;1]	446	340			
	EMPIRIQUE	[2;1]	[5;0;1]	[2;0;3]	13	106	120 100	0,26	0 :10
				[2;0;1]	240	860			
B	ANALYTIQUE ¹	-	-	-			225 826 ²	-2,74	442 :09
	EMPIRIQUE	[2;2]	[9;3;2;1;0]	[3;3;3]	31	200	232 020		
				[3;3;0]	378	640			
C	ANALYTIQUE ³	-	-	-	-	-	-	-	-
	EMPIRIQUE	[4;4;4;4]	[32;12;7;3;2;1]	[19;0;5]	82	623	706 080		
				[19;0;7]	593	490			
				[18;0;5]					
				[16;0;5]					

L'heuristique a résolu tous les problèmes avec une précision acceptable par rapport à l'approche analytique, le temps de résolution est acceptable malgré qu'il soit élevé pour

¹ Arrêté après 442 min

² Solution non optimale

³ Pas assez de mémoire de l'ordinateur pour la formulation interne avec le logiciel ILOG-OPL

une heuristique, ce qui montre la complexité du problème de formation de cellules. Pour des problèmes de taille supérieure, il faudrait considérer des approches complémentaires comme la décomposition du problème et sa conséquente résolution par parties.

Le pourcentage d'écart entre les résultats des deux approches montre que les résultats de l'approche empirique ne sont pas très différents des ceux de l'approche analytique. Donc, on peut conclure que l'heuristique est valide pour réaliser la formation de cellules. La solution complète pour le problème A1 par l'approche empirique est présentée dans les tableaux 4.5, 4.6 et 4.7.

Tableau 4.5

Assignation des produits à chaque cellule et assignation de machines et travailleurs à chaque opération *scij* – Problème A1.

Saison	Cellule	Produit	Opération	Type de Machine	Type de Travailleur
1	1	1	1	1	3
			2	1	1
			3	1	3
	2	2	1	2	3
			2	1	3
			3	2	1
	2	1	1	1	1
			2	1	1
			3	3	1
		2	1	1	3
			2	3	3
			3	1	3

Tableau 4.6

Nombre et type de machines par cellule et son niveau d'utilisation - Problème A1.

Saison	Cellule	Type de Machine	Nombre de machines	Utilisation
1	1	1	3	77,0 %
		2	0	0,0 %
		3	0	0,0 %
	2	1	1	79,4 %
		2	1	72,8 %
		3	1	0,0 %
2	1	1	2	71,7 %
		2	0	0,0 %
		3	1	45,6 %
	2	1	2	62,1 %
		2	0	0,0 %
		3	1	52,3 %
Moyenne			65,8 %	

Tableau 4.7

Nombre et type de travailleurs par cellule et son niveau d'utilisation - Problème A1.

Saison	Cellule	Type de Travailleur	Nombre de Travailleurs	Utilisation
1	1	1	1	86,4 %
		2	0	0,0 %
		3	2	72,3 %
	2	1	1	81,2 %
		2	0	0,0 %
		3	2	71,9 %
2	1	1	2	94,5 %
		2	0	0,0 %
		3	0	0,0 %
	2	1	0	0,0 %
		2	0	0,0 %
		3	2	88,2 %
Moyenne			81,3 %	

Les résultats des tableaux 4.5 et 4.6 et 4.7 montrent que le modèle empirique obtient des résultats avec une élection privilégiée du travailleur 1 à cause de l'avantage performance-coût de ce type de travailleur établi par les données d'entrée.

Le résultat de l'utilisation des ressources montrées par les tableaux 4.6 et 4.7 (et les résultats des autres exemples) met en évidence que notre modèle donne la priorité à la meilleure utilisation de la ressource travailleur. Aspect qui a été considéré dans le développement de l'heuristique à cause du coût plus élevé des travailleurs.

4.8 Analyse de sensibilité

Pour valider l'heuristique, on a choisi un exemple de taille moyenne. Les produits de cet exemple possèdent des sous-ensembles. Le problème-exemple D possède les caractéristiques suivantes:

Nombre de saisons S :	2
Nombre de produits NP_s :	4
Nombre d'opérations NO_{si} :	10
Nombre de type de machines NTM :	3
Nombre de type de travailleurs NTT :	3

La figure 4.6 présente le diagramme d'opérations des produits du problème-exemple D.

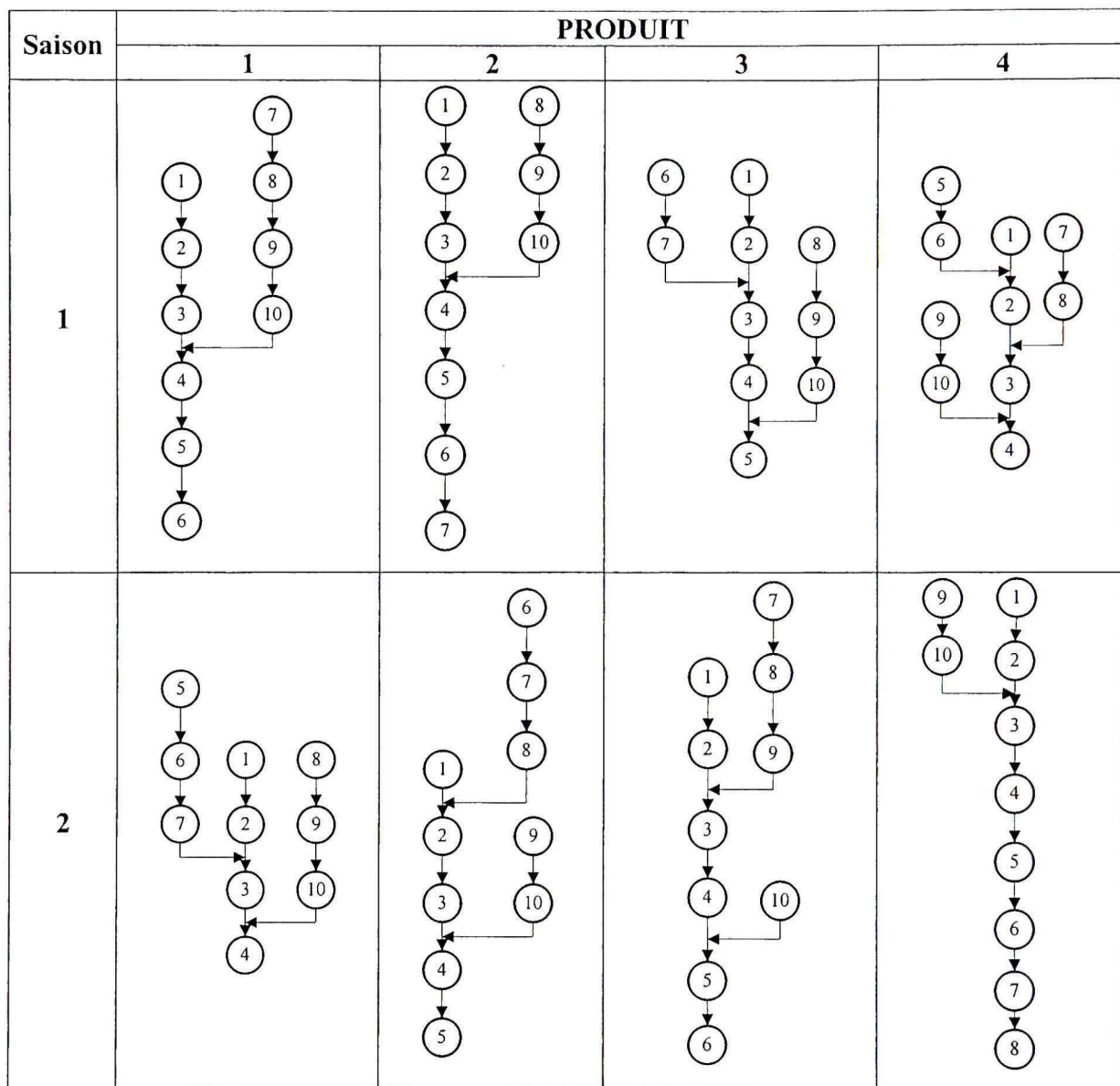


Figure 4.6 Diagramme schématique des opérations des produits du problème-exemple D.

Légende :

$\odot x$ Opération x

Produit 1,2,3 et 4

S = Saison 1 et 2

Tableau 4.8
Résultats de l'analyse de sensibilité.

Variation	Ctotal	% écart	NC	TRAVAILLEURS			MACHINES			Conclusions
				T1	T2	T3	M1	M2	M3	
Solution Initiale	372090		3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	Solution avec les paramètres de conception relaxés à l'extrême. La solution présente des cellules avec un nombre de processeurs maximal de 7 travailleurs et 15 machines (cf. Annexe II).
NMINCell=3 Nombre minimal de cellules par saison	372150	0,02	3 3	9 9	2 1	1 1	25	5	6	Le coût augmente à cause d'une variation dans le niveau d'utilisation de chaque travailleur.
NXMach=11 Nombre maximal de machines par saison	402140	8,08	4 4	7 7	3 2	3 3	28	6	9	Limite l'agrégation de cellules et on a une cellule par chaque produit. Donc, on a besoin de plus de machines et travailleurs.
NXTrav=6 Nombre maximal de travailleurs par cellule	372150	0,02	3 3	9 9	2 1	1 1	25	5	6	Limite l'agrégation. Chaque cellule possède un maximum de 6 travailleurs et 3 cellules par saison (cf. Annexe II).
NXProd=1 Nombre maximal de produits par cellule	402140	8,08	4 4	7 7	3 2	3 3	28	6	9	Limite l'agrégation de cellules et on a une cellule par chaque produit. Donc, on a besoin de plus de machines et de travailleurs.
MINCSS=0.7 Coefficient de similarité minimal entre cellules	392070	5,37	3 4	12 12	0 0	0 0	28	6	6	Limite l'agrégation de cellules. Dans la deuxième saison il n'y pas d'agrégation (4 cellules) Le coût augmente, on emploi des travailleurs de type 1 plus chers.
DEMANDE +10%	417420	12,18	3 3	13 13	0 0	0 0	25	5	6	Pour satisfaire la demande le nombre de cellules dans la 2ème saison augmente à 3. L'utilisation de travailleurs plus performants augmente le coût.
DEMANDE -10%	332660	-10,60	2 2	9 9	0 0	2 1	18	3	5	Le nombre de cellules diminue à 2 dans la première saison, ainsi que le nombre de machines et travailleurs.
TEMPS DISPONIBLE DANS LA SAISON +10%	332740	-10,58	2 2	9 8	1 1	1 1	18	3	5	Le nombre de cellules diminue à 2 dans la 1ère saison ainsi que le nombre de machines et de travailleurs.
TEMPS DISPONIBLE DANS LA SAISON -10%	444620	19,49	3 3	14 14	0 0	0 0	25	5	6	Pour satisfaire la demande en temps réduit, le modèle propose 1 cellule additionnelle dans la 2ème saison et utilise des travailleurs plus performants.

Tableau 4.8

Résultats de l'analyse de sensibilité (continuation).

Variation	Ctotal	% écart	NC	TRAVAILLEUR S			MACHINES			Conclusions
machine 1 CFM et CVM +30%	383410	3,04	3 4	9 9	2 1	1 1	23	5	6	Favorise la sélection et l'utilisation des machines du type 2 et 3. L'exemple ne reflète pas cette situation. La sélection des machines est contrainte par l'agrégation qui utilise le critère de performance (travailleur type 1)
machine 1 CFM et CVM -30%	357210	-4,00	3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	Similaire à la solution initiale dans la composition de machines sauf que le coût présente des différences, produit de l'utilisation différente des ressources. La compositions ne varie pas malgré la variation de coûts de machines, parce que la sélection est contrainte par la versatilité limitée des machines. Si les trois types de machines par opération pouvaient faire toutes les opérations, on verrait une configuration différente pour chaque variation de coût, de façon semblable à ce qui passe avec les travailleurs dans les analyses qui suivent.
machine 2 CFM et CVM +30%	374200	0,57	3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	
machine 2 CFM et CVM -30%	367110	-1,34	3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	
machine 3 CFM et CVM +30%	374650	0,69	3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	
machine 3 CFM et CVM -30%	369360	-0,73	3 2	9 9	2 1	1 1	25	5	6	À chaque augmentation des coûts d'un type de travailleur, on favorise la sélection des autres types de travailleurs. À chaque diminution des coûts d'un type de travailleur, le modèle favorise la sélection de ce travailleur sur les autres types de travailleurs. Le coût total varie de façon logique.
travailleur 1 CMO, CE et CL +30%	397260	6,76	3 2	3 4	8 4	1 3	25	5	6	
travailleur 1 CMO, CE et CL -30%	282070	-24,19	3 2	12 11	0 0	0 0	25	5	6	
travailleur 2 CMO, CE et CL +30%	364640	-2,00	3 2	5 5	0 0	7 6	25	4	6	
travailleur 2 CMO, CE et CL -30%	304440	-18,18	3 2	3 4	9 7	0 0	24	5	6	
travailleur 3 CMO, CE et CL +30%	367730	-1,17	3 2	4 4	8 7	0 0	25	5	6	
travailleur 3 CMO, CE et CL -30%	332540	-10,63	3 2	3 9	0 1	9 1	24	5	6	

Le tableau 4.8 montre la solution initiale, les variations réalisées sur les paramètres de conception et les conséquences sur les résultats.

On peut voir que les effets de la variation des paramètres sur les résultats sont tout à fait logiques et valables. On conclut que l'heuristique réalise la formation de cellules de façon adéquate et pour cette raison elle sera utilisée dans l'approche de ce mémoire.

4.9 Conclusion

À partir des contraintes propres à l'industrie de la confection, deux types de modèles ont été élaborés pour résoudre le problème de formation de cellules.

Ces deux modèles, un analytique et l'autre empirique, réalisent la formation de cellules d'assemblage qui sont configurables entre saisons avec allocation de machines et travailleurs. Les contraintes de cette industrie ont aussi aidé à définir le système cellulaire spécifique qu'on croit être sera le plus adéquat pour l'industrie du secteur de la confection.

De ces deux modèles, le modèle empirique prenant la forme d'une heuristique s'avère la meilleure alternative puisqu'il résout des problèmes de grande taille avec une précision et des temps acceptables.

CHAPITRE 5

PHASE III : MODÉLISATION ET SIMULATION

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente le modèle de simulation qui permettra de simuler les scénarios de SMC générés par l'heuristique, ces scénarios seront générés en utilisant la méthodologie indiquée dans la section 2.3.2. La simulation générera les mesures de performance des différents scénarios simulés dans le but de les utiliser dans la phase de sélection du meilleur scénario du SMC. Le chapitre contient la description de la formulation du problème de simulation, la description du SMC modélisé et une description générale des différents composants du modèle de simulation.

5.2 Modélisation

Le processus de modélisation utilise l'information générée par l'heuristique et de l'information additionnelle d'éléments qui permettront d'ajouter l'aspect dynamique et aléatoire à l'expérience de simulation. Le niveau de détail dans la modélisation ira jusqu'à la satisfaction des objectifs de l'approche. La modélisation et la résolution sont réalisées en utilisant le logiciel de simulation AweSim.

5.2.1 Formulation du problème

Le modèle présenté ne cherche pas à améliorer le SMC, mais principalement à générer de l'information nécessaire pour l'étape de sélection. Les objectifs sont :

- Évaluer le SMC dans un contexte dynamique et en occurrence d'événements discrets et aléatoires comme le temps d'opération, l'arrivée de commandes et l'arrivée de pannes.

- Générer des mesures de performance pour chaque scénario afin de pouvoir les évaluer dans la prochaine étape de l'analyse AHP de sélection de SMC.

5.2.2 Système manufacturier cellulaire modélisé

Le modèle considère les aspects du système qui affectent le problème étudié. Le niveau de détails dans la construction du modèle est suffisamment élevé pour que l'on puisse tirer des conclusions valides sur le système réel.

Les commandes de la saison s , arrivent périodiquement. Chaque commande Cx correspond à un seul produit x . Après, la commande est acheminée à la cellule c . On identifie la cellule comme $SsCc$.

La commande Cx occupe la cellule $SsCc$ pendant tout le temps de production de la commande. Les autres commandes, qui arrivent après, attendent jusqu'à la production totale de la commande Cx . Quand la commande est complète, les pièces en cours sont retirées de la cellule. Une fois la cellule totalement libre elle est occupée par la commande suivante. On applique la politique d'ordonnancement premier arrivé, premier servi (FIFO). À ce point-ci, il est possible qu'on doive reconfigurer la cellule si la nouvelle commande est d'un autre type de produit que le précédent.

Les produits sont traités en suivant la séquence d'opérations indiquées par le diagramme d'opérations et l'assignation faite par l'heuristique. Pour chaque opération on demande la participation de deux (2) types de processeurs : machine m et travailleur t , lesquels sont assignés d'avance. Quelques opérations sont assignées à deux (2) travailleur, mais à une seule machine m . Pour ces opérations il existe un travailleur principal $TOPAt$ et un travailleur secondaire $TOPBt$. L'opération est assignée au travailleur principal en priorité, mais si dans la file de ce travailleur principal il existe plus de Y pièces qui l'attendent (à déterminer dans la simulation), la pièce suivante ($Y+1$) est assignée au

travailleur secondaire *TOPBt*. Cette politique a comme objectif balancer la charge de travail entre les travailleurs, lesquels doivent travailler sur au moins une machine, et d'éviter l'existence de goulots d'étranglement afin d'obtenir un meilleur taux de production en réalisant une assignation efficace des deux types de processeurs.

Le modèle a été implémenté en utilisant le logiciel AweSim qui possède une interface graphique où l'on représente tous les composants du système dans la forme de réseaux et/ou sous réseaux. De plus, chaque modèle compte un fichier de contrôle qui sert à définir les variables et à introduire les paramètres du modèle. Le modèle, ainsi conçu, peut considérer un nombre illimité de cellules, produits et opérations, mais un maximum de quatre (4) saisons, 30 machines, 30 travailleurs et trois (3) sous composants. On peut facilement modifier le modèle pour qu'il puisse considérer un nombre plus grand de saisons, machines, travailleurs et sous composants. Une description détaillée du modèle se trouve dans l'Annexe III.

5.2.3 Hypothèses et contraintes

Les hypothèses et contraintes que le modèle de simulation considère sont :

- L'existence de l'information sur la formation de cellules générées par l'heuristique.
- La durée de la simulation est d'une année (elle inclut toutes les saisons).
- On connaît la distribution de probabilité des variables : intervalle d'arrivée des commandes, temps d'opération, temps d'arrivée des pannes et la durée des pannes.
- Chaque cellule traite un seul type de produit à la fois. En plus, la production est à l'unité ou flux tiré.
- Le traitement des commandes obéit à un ordonnancement de premier arrivé premier servi (FIFO).

- Les cellules réalisent le processus d'assemblage où chaque travailleur est assigné à un groupe de machines adjacentes. Un travailleur est assigné au moins à une machine.
- Quelques opérations sont assignées à deux (2) travailleurs. Pendant la production, les pièces qui ont besoin de ces opérations. Seront dirigées vers un de ces deux (2) travailleurs, selon la disponibilité de chaque travailleur.
- Il existe un stock tampon dans la file de chaque station.
- L'inspection pour le contrôle de qualité est réalisée par chaque travailleur en même temps qu'on réalise l'opération.
- Les temps de mise en course et les déplacements sont considérés inclus dans le temps d'opération.
- Les temps morts pour les pauses et les changes de quarts de travail n'ont pas été pris en compte.

5.2.4 Données d'entrée du modèle

La principale source d'information pour le modèle de simulation est l'heuristique parce qu'elle génère la configuration des cellules ainsi que l'assignation de produits, d'opérations, de machines et de travailleurs à chaque cellule. La notation utilisée est la suivante :

$DureeSaison_s$	Durée de la saison s
D_{si}	Demande de chaque produit i dans la saison s
$TIAC_{si}$	Temps d'inter-arrivée de commandes du produit si
i	Types de produits
t_{scijnt}	Temps moyen de l'opération j du produit sci par les processeurs nt
$TOPA_{scij}$	Travailleur principal assigné à la cellule c et opération sij
$TOPB_{scij}$	Travailleur secondaire assigné à la cellule c et opération sij
MOP_{scij}	Machine assignée à la cellule c et opération sij

NSE_{si}	Nombre de sous-ensembles du produit si
NOA_{si}	Nombre d'opérations dans la pièce principale en produit si
$NOSE_{xsi}$	Nombre d'opérations dans le sous-ensemble x du produit si
OPF_{si}	Opération finale dans la branche principale du produit si
$OPFSE_{xsi}$	Opération finale du sous-ensemble x du produit si
$MTBF_n$	Temps moyen entre pannes de la machine n
$MTTR_n$	Temps moyen de réparation de la machine n
R_{sijnt}	Taux de rejet en l'opération sij par les processeurs nt

Le $TIAC_{si}$ permet de générer l'arrivée des commandes tel qu'indiqué dans la méthodologie (section 2.4.1).

5.3 Description du modèle

Le modèle développé possède un réseau principal, un sous réseau, un fichier de contrôle et trois (3) fichiers des données qui constituent la base de donnés. La figure 5.1 montre les composantes du modèle.

Le processus de simulation du système commence avec l'initialisation des paramètres et des variables. La lecture de fichiers de données est réalisée dans le réseau principal, ensuite dans le sous-réseau. La demande et les pannes sont générées ainsi que les activités de production. Finalement, la collecte de données est réalisée dans le réseau principal, en enregistrant cette information dans un fichier de résultats.

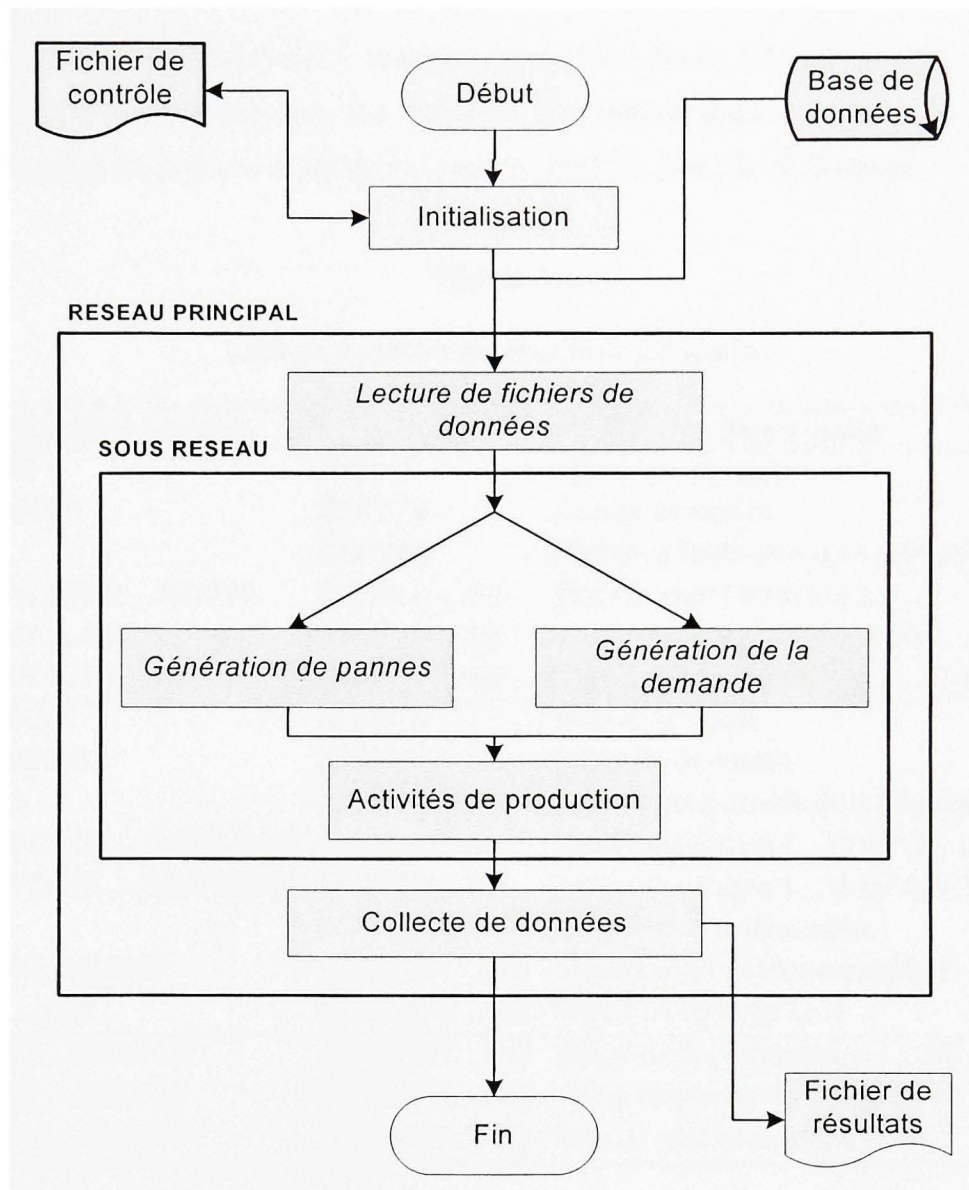


Figure 5.1 Diagramme de composants du modèle de simulation

5.3.1 Initialisation

Les modèles développés en AweSim demandent la spécification des variables à utiliser dans la simulation, ces variables peuvent être locales ou globales, de type décimal, entière ou de chaîne de caractères. Donc, dans cette étape, on déclare les variables et on

assigne des valeurs initiales à quelques-unes. Le tableau 5.1 montre les variables assignées et leur description. On introduit directement dans le fichier de contrôle l'information relative à la durée de la simulation et le nombre de réplifications.

Tableau 5.1

Liste de variables du modèle de simulation.

Nom de la variable	Variable	Description
<i>ETYPE</i>	<i>Entière</i>	Le numéro du produit
<i>PRODUIT</i>	<i>STRIB[0]</i>	Le nom du produit
<i>NOA</i>	<i>LTRIB[0]</i>	Opération finale dans la branche principale
<i>MOPI, MOP2, ..., MOP10</i>	<i>LTRIB[11...20]</i>	Machine pour l'opération 1,...10
<i>TOPA1, ..., TOPA10</i>	<i>LTRIB[21...30]</i>	Trav. Principal pour l'opération 1,...10
<i>TOPB1, ..., TOPB10</i>	<i>LTRIB[31...40]</i>	Trav. Secondaire pour l'op. 1,...,10
<i>CELLULE</i>	<i>STRIB[1]</i>	Nom de la cellule
<i>DEMANDE</i>	<i>ATRIB[0]</i>	Demande du produit
<i>TIACS</i>	<i>ATRIB[1]</i>	Temps d'inter-arrivée de commandes
<i>TEMPOPA1, ..., TEMPOPA10</i>	<i>LTRIB[21...30]</i>	Temps d'opération 1...10 par trav. A
<i>TEMPOPB1, ..., TEMPOPB10</i>	<i>LTRIB[31...40]</i>	Temps d'opération 1...10 par trav. B
<i>NSE</i>	<i>LTRIB[101]</i>	Nombre de sous-ensembles
<i>NOSE1, ..., NOSE3</i>	<i>LTRIB[102...104]</i>	Nombre d'op. en sous-ensemble 1...3
<i>PE1, ..., PE3</i>	<i>LTRIB[106...108]</i>	Point d'assemblage 1...3
<i>MTBF1, ..., MTBF10</i>	<i>ATRIB[101...110]</i>	Temps moyen entre pannes 1...10
<i>MTTR1, ..., MTTR10</i>	<i>ATRIB[111...120]</i>	Temps moyen de réparation 1...10
<i>REJET1, ..., REJET10</i>	<i>ATRIB[121...130]</i>	Taux de rejet en machine 1...10

5.3.2 Réseau principal : Lecture de fichiers des données

On réalise la lecture des données à partir des fichiers générés par l'heuristique et préparés avec EXCEL. Ces fichiers (*.dat) présentent l'information par lignes que AweSim lit une à la fois, selon le passage des entités. Simultanément, on assigne ces valeurs aux variables énoncées. L'information lue est relative à la saison, le produit à traiter, les ressources machine et travailleur, et les pannes. Avec cette information, on

pourra générer la demande et les pannes. La figure 5.2 montre le processus de lecture des fichiers. La notation ici utilisée est celle de l'heuristique.

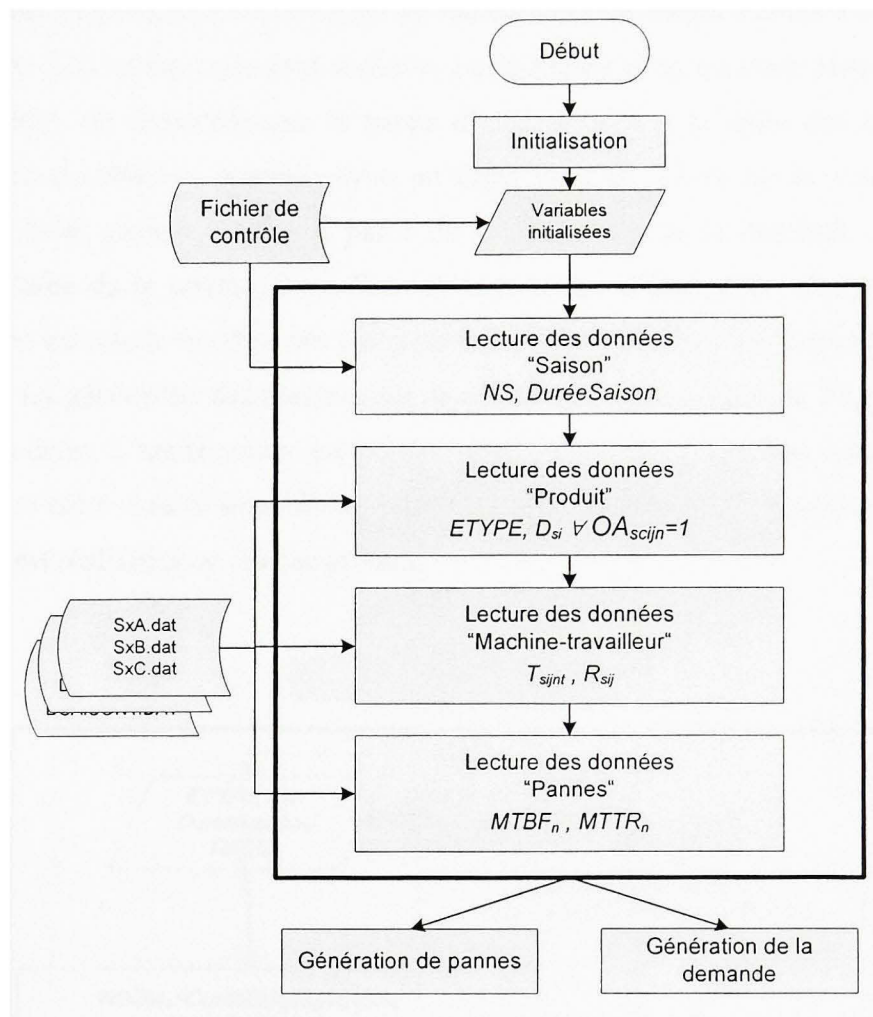


Figure 5.2 Diagramme de lecture de données.

La base des données est composée de trois (3) fichiers : SxA.dat, SxB.dat et SxC.dat, l'information contenue dans ces fichiers est montrée dans le tableau 5.1.

5.3.3 Sous-réseau : Génération de la demande

La figure 5.3 présente la façon dans laquelle la demande est générée pour la simulation. La demande est transmise par le détaillant directement au manufacturier au moyen des commandes. Ces commandes sont variables en fréquence et en quantité. Dans le modèle de simulation, on considère que le temps d'inter-arrivée et la taille des commandes suivent une distribution normale avec un écart type de 10 % de la valeur de ses moyennes (voir section 2.4.1). À partir de l'information de la demande saisonnière (D_{si}), la durée de la saison ($DuréeSaison_s$) et le temps d'inter-arrivé des commandes ($TIAC_{si}$), on calcule le nombre des commandes et la distribution des deux (2) variables aléatoires. La génération des commandes se réalise dans une boucle ou les entités sont clonées en deux. L'entité parent est utilisée pour générer la commande suivante tandis que le clone entre dans le sous-réseau pour déclencher les activités de production. Cette procédure est réalisée pour chaque produit.

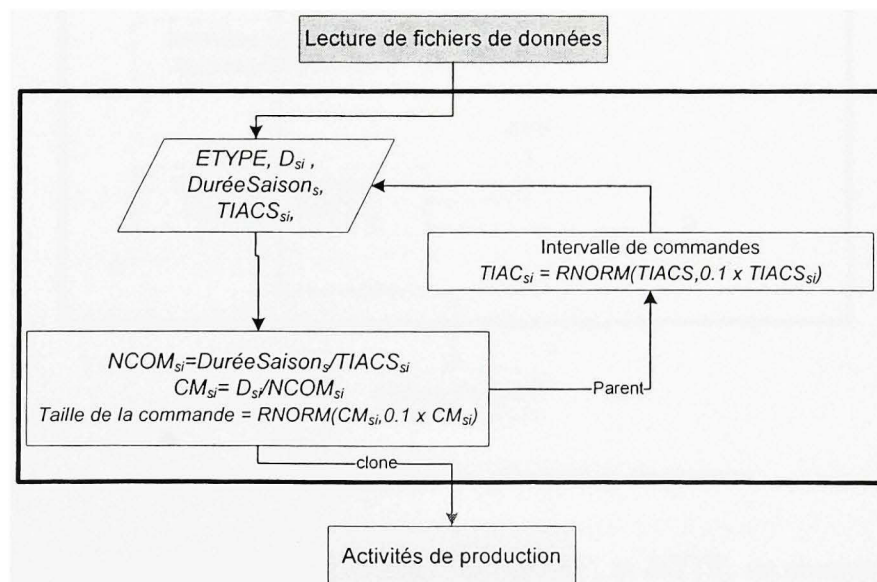


Figure 5.3 Diagramme de génération de la demande.

5.3.4 Sous-réseau : Génération des pannes

Après la lecture de données, l'information sur les pannes de chaque machine est introduite dans le seul sous-réseau qui représente les cellules. Dans ce sous-réseau le processus de génération de pannes est déclenché pour chaque machine selon la figure 5.4.

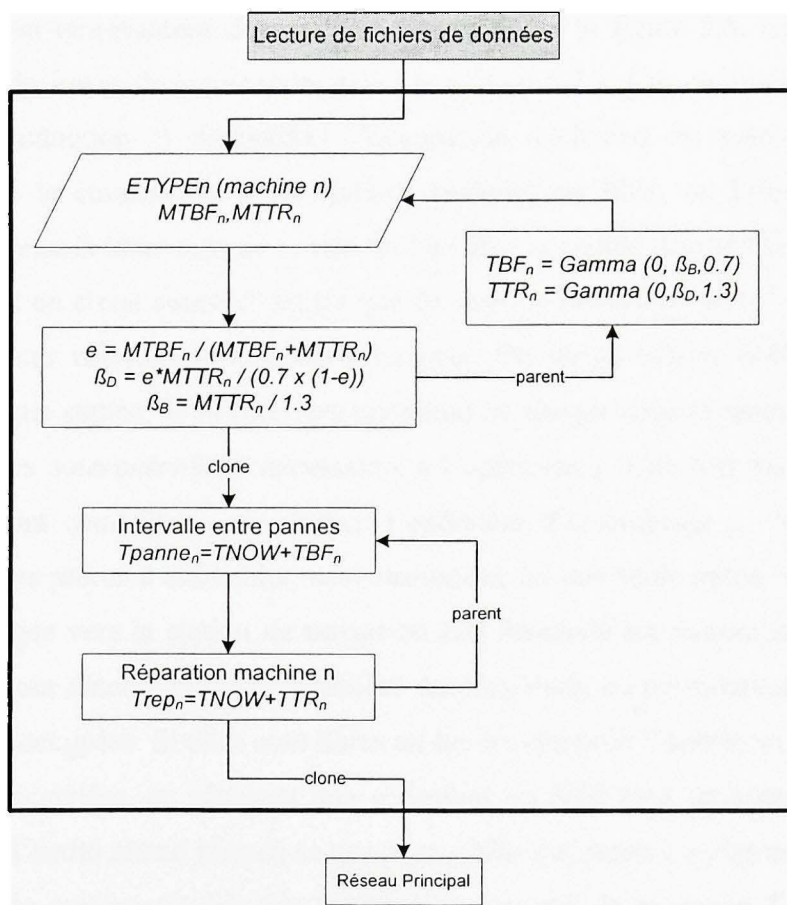


Figure 5.4 Diagramme de génération de pannes.

À l'intérieur du sous réseau, avec l'information $MTBF_n$ et $MTTR_n$ de chaque machine et selon la méthodologie expliquée à la section 2.4.3, on calcule l'efficience des machines (e) et les paramètres de forme β_B et β_D de la distribution gamma. Cette procédure se réalise pour toutes les machines dans une boucle, afin de déterminer le temps entre pannes (TBF_n) et le temps de réparation (TTR_n). Les événements pannes sont ensuite

générés dans une autre boucle au moyen d'une répétition successive de pannes et de réparations jusqu'à la fin de la simulation.

5.3.5 Sous-réseau : Activités de production

Le seul sous-réseau reflète chaque cellule (en instances différentes) Les activités de production sont représentées dans le sous-réseau selon la figure 5.5. La demande est générée dans la forme de commandes selon la section 5.2.3. Ces commandes arrivent à l'étape de production et demandent l'occupation exclusive du système jusqu'à la conclusion de la commande. Si le système (cellule) est libre, on l'occupe, sinon la commande attend la libération de la cellule. Une fois la cellule disponible pour traiter la commande C_i , on clone autant d'entités que de sous-ensembles possède le produit et un autre clone pour représenter la pièce principale. On dirige chaque entité (clonées et parent) à chaque station de la première opération de chaque sous-ensemble. Là, l'entité attend pour les sous-ensembles nécessaires à l'opération j . Une fois les pièces (sous-ensembles) sont complètes pour réaliser l'opération d'assemblage j , les entités, qui représentent les pièces à assembler, sont fusionnées en une seule entité. Cette nouvelle entité est dirigée vers la station de travail où elle demande les ressources machines et travailleurs. Pour déterminer la disponibilité des machines, on considère si les machines sont libres ou occupées. Si elles sont libres on les occupe pour l'opération en course j , et si elles sont occupées, en réalisant une opération ou elles sont en réparation à cause d'une panne, l'entité attend jusqu'à ce que la machine soit libre. Le traitement est réalisé avec une durée représentée par une distribution normale de moyenne T_{sijnt} et un écart type égale à 25 % du T_{sijnt} . Pendant la réalisation de chaque opération, le travailleur contrôle la qualité, donc la pièce peut être rejetée. Si elle est rejetée et la commande est complète, cette entité sort du système, sinon l'entité est recyclée et revient à la boucle de production vers la première station de la pièce principale ou sous-ensemble. S'il n'y a pas de rejet et que l'opération n'est pas la dernière, on continue avec l'opération suivante $j=j+1$, dans le cas contraire si la commande a été complétée, l'entité sort du sous réseau.

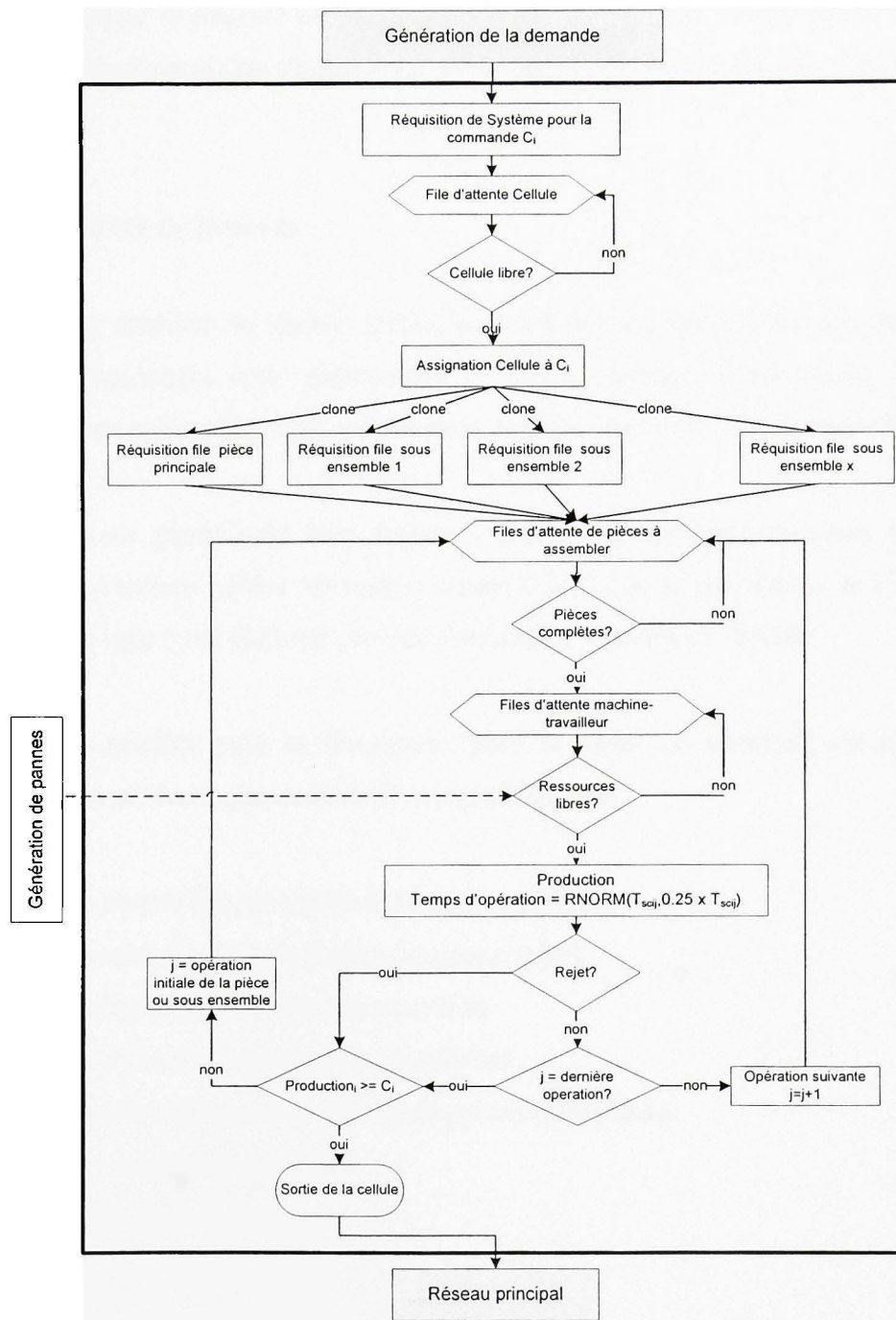


Figure 5.5 Diagramme d'activités de production

Pour comptabiliser le nombre de déplacements des travailleurs, on enregistre dans une variable la nouvelle position chaque fois que le travailleur doit se déplacer pour réaliser les opérations.

5.3.6 Collecte de données

La collecte de données se réalise durant la simulation au moyen des nœuds dans le réseau qui enregistrent cette information à chaque passage d'une entité. En plus, l'information est collectée par des instructions données dans le fichier de contrôle.

L'information est générée de deux façons, l'une d'elles est présentée dans un report sommaire qu'AweSim génère automatiquement à la fin de la simulation, et l'autre par des fichiers de type *.dat élaborés par des instructions d'un nœud WRITE.

L'information générée pour la simulation, pour la phase de sélection, est constituée principalement par les mesures suivantes de performance :

- Temps moyen dans le système de chaque produit.
- Temps total de cycle de production par produit.
- Taux moyen d'utilisation des machines.
- Taux moyen d'utilisation des travailleurs.
- Nombre de déplacements effectués par les travailleurs.
- Nombre de mises en course.
- Temps moyen de pannes.
- Temps total de réparation.
- Nombre de pièces rejetées

Cette information sera disponible de façon très détaillée (par produit, machine, cellule, etc.), et sera utilisée dans la phase suivante où on compare les scénarios de SMC.

5.4 Conclusion

On a présenté les principales étapes de la modélisation du modèle de simulation en commençant par la définition des objectifs, les hypothèses et les contraintes, l'information qui demande le modèle et l'information qui génère la simulation pour la phase suivante de l'approche, ainsi qu'une description générale du modèle. On présente aussi dans l'annexe III une description plus détaillée du modèle de simulation.

CHAPITRE 6

PHASE IV : SÉLECTION DU MEILLEUR SCÉNARIO

6.1 Introduction

La quatrième et dernière phase du modèle présenté dans ce mémoire consiste en l'analyse multicritère des différentes configurations de SMC, appelées ici scénarios, générées par l'heuristique selon la procédure indiquée dans la section 2.3.2. Chaque scénario diffère des autres pour sa composition en nombre de cellules, nombre et type de machines et de travailleurs, l'assignation des produits aux cellules et l'assignation des opérations aux machines et travailleurs (voir section 7.4.2). Donc, chaque scénario est différent et ils représentent des alternatives de sélection. Dans ce chapitre, on présente la méthode d'analyse hiérarchique de procédés (AHP) appliquée au problème de sélection de la meilleure configuration de SMC. Ce problème complexe est représenté avec une structure hiérarchique composée d'un objectif, de critères, de sous-critères et d'alternatives. On réalise la pondération de chaque critère et sous-critère et la valorisation de chaque alternative de sélection par rapport aux sous-critères. On détermine la synthèse des pondérations qui définit les priorités de sélection et on évalue la cohérence du modèle. Finalement, on effectue l'analyse de sensibilité pour évaluer la décision finale.

6.2 Critères d'évaluation

La sélection des critères de décision considère les facteurs qui pourraient s'avérer plus déterminants pour réaliser la sélection des alternatives (scénarios ou configurations de SMC) générés par l'heuristique (selon la méthodologie décrite en 2.3.2). La figure 6.1 montre la structure hiérarchique du problème. La sélection des critères est faite en considérant les caractéristiques des alternatives; par exemple si on était en train

seraient différents de ceux qu'on considère ici. Dans notre cas, les alternatives sont différentes, uniquement par rapport au nombre et composition des cellules et à l'assignation de produits aux cellules. Donc, les possibles critères tels que les encours, le coût de maintenance et autres, ne sont pas décisifs dans notre problématique de sélection, parce que ils seront très semblables en magnitude pour chaque scénario.

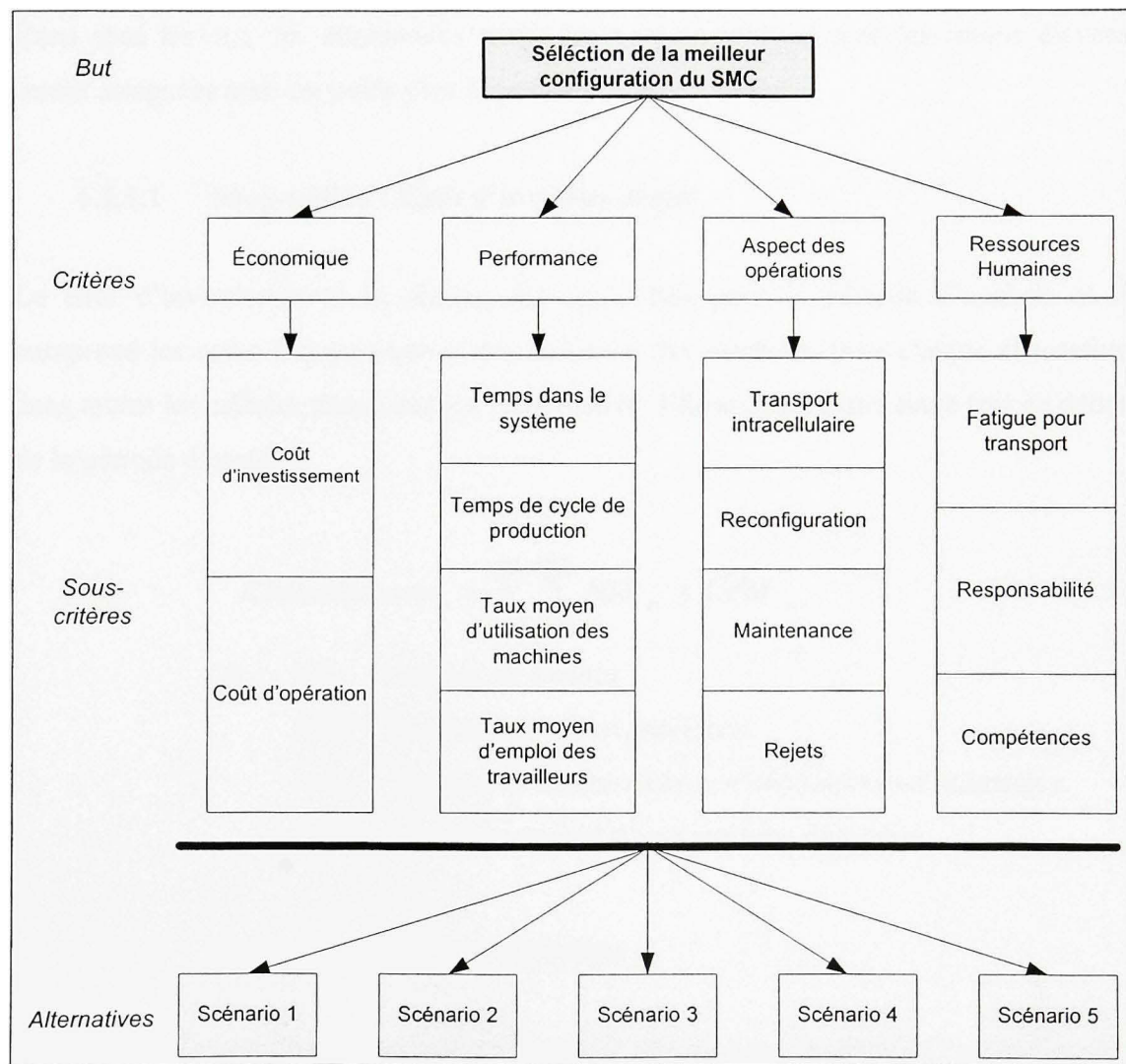


Figure 6.1 Hiérarchie du modèle de sélection de scénarios de SMC.

6.2.1 Critère : Économique

Le critère économique considère les dépenses nécessaires pour réaliser une configuration particulière de SMC. Ces dépenses sont réalisées à des moments différents de la période d'analyse. Elles comprennent l'achat et l'utilisation des machines, l'embauche, le licenciement et l'emploi des travailleurs. Ces valeurs économiques sont le coût d'investissement et le coût d'opération. Elles sont déterminées par l'heuristique. Dans tous les cas, les alternatives ayant les valeurs économiques les moins élevées seront assignées avec un poids plus important.

6.2.1.1 Sous-critère : Coût d'investissement

Le coût d'investissement se réalise une seule fois pour la période d'analyse et il comprend les coûts d'acquisition et d'installation des machines pour chaque alternative dans toutes les cellules proposées par l'alternative. Elle se réalise une seule fois au début de la période d'analyse.

$$C_{Investissement} = \sum_{s=1}^{NS} \sum_{n=1}^{NTM} NM_{sn} \times CFM_n \quad (6.1)$$

Où : NS : Nombre de saisons.

NTM : Nombre de type de machines.

NM_{sn} : Nombre de machines type n nécessaires en la saison s .

CFM_n : Coût fixe annuel d'une machine de type n

6.2.1.2 Sous-critère : Coût d'opération

Le coût d'opération inclut les coûts relatifs à l'utilisation du SMC. C'est à dire les processeurs, machines et travailleurs, et il comprend :

- Le coût d'utilisation des machines et salaire des travailleurs.

- Le coût d'embauche de travailleurs, la dépense réalisée pour le recrutement et l'entraînement du nouveau personnel nécessaire pour chaque saison.
- Le coût de licenciement des travailleurs, la dépense réalisée à cause du licenciement des travailleurs non nécessaires pour la saison suivante.

Le calcul de ces coûts utilisera les données générées par l'heuristique quant au nombre des travailleurs embauchés et licenciés, et par la simulation quant à l'utilisation des machines.

$$\begin{aligned}
 COperation = & \sum_{n=1}^{NTM} \left(\sum_{s=1}^{NS} CVM_{sn} \times UM_{sn} \right)_n + \sum_{s=1}^{NS} \sum_{t=1}^{NTT} CMO_{st} \times NT_{st} \\
 & + \sum_{t=1}^{NTT} CE_t \times TEMB_t + CL_t \times TLIC_t
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Où :

- NTT : Nombre de type de travailleurs.
- CVM_{sn} : Coût variable d'une machine de type n .
- CMO_{st} : Coût de main d'œuvre de travailleur type t pour la saison s .
- CE_t : Coût d'embauche de travailleurs de type t .
- CL_t : Coût de licenciement de travailleurs de type t .
- $TEMB_t$: Travailleurs de type t embauchés dans la saison s .
- $TLIC_t$: Travailleurs de type t licenciés dans la saison s .
- UM_{sn} : Utilisation des machines type n dans la saison s .

6.2.2 Critère : Performance

Les différentes configurations de SMC (alternatives) présentent différents niveaux de performance quant au temps moyen dans le système, le temps de cycle de production, le

taux moyen d'utilisation de machines et de travailleurs. Ici, on utilise l'information générée par la simulation.

6.2.2.1 Sous-critère : Temps moyen dans le système

Le temps que le produit passe dans le système. Ici, on considère la moyenne de temps dans le système de tous les produits traités dans la cellule. Ce temps représente le temps employé dans les opérations et l'attente pour les ressources. L'assignation des poids est inverse à la valeur du temps.

6.2.2.2 Sous-critère : Temps de cycle de production

Le temps de cycle de production est la valeur inverse de la cadence de production. On détermine le temps de cycle de chaque produit par la simulation. On considère ici le temps moyen entre les sorties des produits terminés indépendamment du temps passé dans le système. L'assignation des poids est inverse à la valeur du temps de cycle.

6.2.2.3 Sous-critère : Taux moyen d'utilisation des machines

L'utilisation de quelques machines diffère énormément pendant toute la période d'analyse, parce qu'il se peut que dans une saison une machine soit utilisée pleinement, tandis que dans une autre saison elle ne sera pas du tout utilisée. Dans chaque saison, une machine sera plus ou moins utilisée selon les produits à traiter, puisqu'il existe une reconfiguration de la cellule pour chaque produit. En conséquence, on considère l'utilisation moyenne des machines dans toute la période d'analyse. La pondération est établie de façon directe à la valeur de ce taux.

6.2.2.4 Sous-critère : Taux moyen d'utilisation des travailleurs

Le taux d'utilisation des travailleurs est obtenu à partir de la simulation. En général, ce taux est plus haut que l'utilisation des machines, vu que la formation de la cellule et l'assignation de travail sont centrées sur cette ressource plutôt que sur les machines. Un travailleur est assigné à au moins une machine. À la différence des machines, l'assignation des charges de travail aux travailleurs est uniforme et l'occupation de ces ressources est plus élevée que celle des machines, indépendamment du type de produit à traiter. L'assignation des poids est réalisée en fonction directe à ce taux.

6.2.3 Critère : Aspect des opérations

Dans le critère aspect des opérations, on considère la difficulté opérationnelle de chaque alternative. Les sous-critères qu'on prend en compte sont le transport intracellulaire, la reconfiguration de cellules, la maintenance et les rejets. La pondération de tous les sous-critères sera inverse à la valeur de chacun.

6.2.3.1 Sous-critère : Transport intracellulaire

Le transport intracellulaire a comme objectif la pondération de l'aspect de transport dans la complexité opérationnelle générée à l'intérieur de chaque alternative de solution. Pour cela, le concepteur tiendra compte le nombre de déplacements que les travailleurs réalisent entre les machines pour réaliser les opérations. Il influence le flux des produits à l'intérieur de chaque cellule.

6.2.3.2 Sous-critère : Reconfiguration de cellules

Le réaménagement de la cellule se réalise chaque fois qu'on introduit une commande d'un type de produit différent du précédent. Le réaménagement est réalisé aussi quand on passe à une autre saison. Le réaménagement de la cellule exige l'arrêt de la ligne de

production et l'emploi des travailleurs dans une activité différente de la production qui est la mise en course. Le nombre de reconfigurations nécessaires est fonction du nombre et de l'ordre d'arrivée des commandes.

6.2.3.3 Sous-critère : Maintenance

Le nombre de machines, la fréquence de pannes et le temps de réparation auront une influence sur la difficulté de gérer le système d'entretien correctif. Les variations des différentes alternatives se traduisent dans le temps total des pannes de toutes les machines de chaque alternative. Ici, on considère le temps employé pour la réparation de toutes les machines du SMC.

6.2.3.4 Sous-critère : Rejets

Il existe des variations dans le nombre des rejets de chaque scénario puisque le taux de rejet est fonction des types des machines et des travailleurs choisis dans la configuration du SMC. Les rejets ont une incidence sur le temps de production de la commande et sur le coût d'opération du système.

6.2.4 Critère : Ressources humaines

Les différentes configurations ont un impact sur le climat de travail, ce qui affecte les travailleurs. Ici, on considère la compétence requise, la responsabilité des travailleurs en la réalisation des opérations, et la fatigue générée par le transport. On assigne un poids inverse à la valeur de chaque sous-critère.

6.2.4.1 Sous-critère : Fatigue pour transport

La fatigue du travailleur est fonction de la charge de travail pour la réalisation des opérations sur les stations de travail et pour le transport des pièces entre les stations. Le

nombre de déplacements est fonction du nombre de machines, de travailleurs et le nombre de pièces à traiter. La simulation génère les valeurs du nombre de déplacements réalisés par les travailleurs pour réaliser les opérations. On fera une assignation inverse au poids du ratio du nombre de déplacements par travailleur.

6.2.4.2 Sous-critère : Responsabilité

La responsabilité exigée des travailleurs est exprimée par le nombre d'opérations qu'ils doivent réaliser. Ce degré de responsabilité aura un impact sur la productivité puisqu'il reflète la spécialisation du travailleur. Un petit nombre d'opérations par travailleur amène à une spécialisation majeure et conséquemment une productivité supérieure. Pour assigner les poids, on utilisera la relation du nombre moyen d'opérations assignées à chaque travailleur.

6.2.4.3 Sous-critère : Compétence

Ce critère fait référence à la nécessité d'avoir des travailleurs avec différents degrés de compétence. On a trois (3) types différents de travailleurs. Les travailleurs de type 1 sont les plus rapides et ils sont difficiles à recruter. Les travailleurs de type 2 sont moins rapides que les travailleurs de type 1 et plus faciles à recruter et moins chers. Les travailleurs de type 3 sont plus lents, mais coûtent moins cher et sont faciles à recruter. Généralement, on peut dire qu'on préfère d'avoir des travailleurs des types 2 et 3. Donc, pour la pondération, on considère la relation existante entre la quantité par type de travailleur requis dans chaque alternative.

6.3 Pondération des critères et sous-critères

Initialement, on réalise la comparaison binaire entre les critères pour déterminer les poids relatifs de chaque critère dans l'étape de sélection. La procédure pour réaliser la pondération est la même que la décrite en 3.4. Le tableau 6.1 montre les valeurs de cette

comparaison binaire des critères. Ainsi pour l'exemple, on peut voir que le critère Performance est 1,28 fois plus important que le critère Opérations selon la pondération spécifié.

Tableau 6.1

Pondération binaire des critères à partir de la méthode graphique.

	Économique	Performance	Opérations	Ress. Hum.
Économique	1,00	0,63	1,15	1,63
Performance	1,59	1,00	1,28	1,41
Opérations	0,87	0,78	1,00	1,36
Ress. Hum.	0,61	0,71	0,74	1,00

La valorisation relative de chaque critère est réalisée dans le tableau 6.2. On calcule le vecteur propre normalisé de la même façon qu'en la section 3.4, c'est à dire :

- (1) Diviser chaque élément par la somme de la colonne
- (2) Additionner chaque rangée pour faire un vecteur propre
- (3) Diviser le vecteur propre par le nombre d'éléments

Tableau 6.2

Valorisation relative de chaque critère.

	Ec.	Perf.	Op.	R. H.	Ec.	Perf.	Op.	R. H.	Vecteur Propre (2)	Vecteur propre Normalisé (3)
					(1)					
Ec.	1,000	0,629	1,150	1,630	0,246	0,202	0,276	0,302	1,025	0,256
Perf.	1,590	1,000	1,280	1,410	0,390	0,321	0,307	0,261	1,279	0,321
Op.	0,870	0,781	1,000	1,360	0,213	0,250	0,240	0,252	0,956	0,239
R. H.	0,613	0,709	0,735	1,000	0,151	0,227	0,177	0,185	0,740	0,185
Somme	4,073	3,119	4,165	5,400	1,000	1,000	1,000	1,000	4,000	1,000

À partir du résultat de la valorisation relative des critères on aperçoit l'importance relative de chaque critère. Le critère le plus important dans notre processus de sélection de machines sera le critère Fonctionnalité suivi par le critère Économique, le critère Ressources Humaines, et finalement le critère Stratégique. La figure 6.2 montre la représentation graphique du vecteur propre normalisé qui montre la priorité établie pour les critères dans le processus de sélection du SMC.

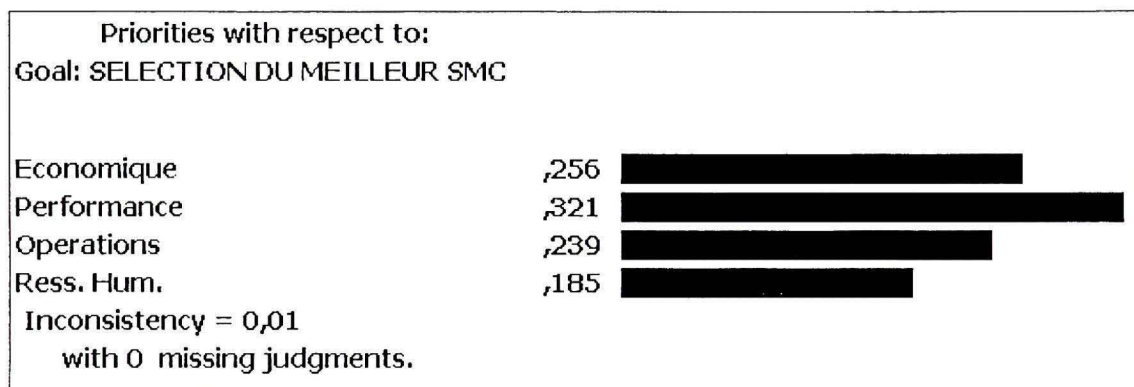


Figure 6.2 Résultat de la pondération binaire de critères.

Le critère Performance est le critère le plus important, suivi par les critères Économique, Opérations et Ressources Humaines. Le critère Performance, définie par ses sous-critères (voir section 6.2.2), est le plus important puisqu'il permettra au système de répondre au marché en temps réduit, ce qui est un des éléments stratégiques de concurrence les plus importants sur les marchés très compétitifs actuels.

De façon semblable, on réalise la pondération de sous-critères en référence à chaque critère, en utilisant la comparaison binaire. Le tableau 6.3 montre le résultat de la pondération de tous les critères et sous-critères considérés dans la structure hiérarchique du problème de sélection du meilleur scénario.

Tableau 6.3

Valorisation relative des critères et des sous-critères.

Critères	Sous-critères	Priorités
Économique		0,256
	Coût d'investissement	0,429
	Coût d'opération	0,571
Performance		0,321
	Temps dans le système	0,267
	Temps de cycle de production	0,236
	Taux moyen d'utilisation des machines	0,139
	Taux moyen d'emploi des travailleurs	0,358
Aspect des opérations		0,239
	Transport intracellulaire	0,274
	Reconfiguration	0,198
	Maintenance	0,340
	Rejets	0,188
Ressource humaines		0,185
	Fatigue pour transport	0,372
	Responsabilité	0,311
	Compétence	0,317

Avec l'objectif de déterminer si les jugements faits dans la pondération sont acceptables, on réalise l'Analyse de la cohérence en la pondération de critères et sous critères. Une description détaillé de la procédure du calcul de ce ratio se trouve en la section 3.5. Dans le cas présent on utilise directement les valeurs du ratio d'incohérence qui est calculé par le logiciel ExpertChoice. Ce logiciel détermine que le ratio d'incohérence est 0,01, lequel est inférieur à la valeur limite (0,1) établie par Saaty. Donc, les jugements réalisés son considérés acceptables.

6.4 Pondération des alternatives

Pour réaliser la pondération des alternatives (scénarios ou configurations de SMC), on utilise principalement l'information générée par l'heuristique, pour chaque configuration, telle que le coût d'investissement et le coût d'opération, et de

l'information générée par la simulation comme le temps moyen dans le système, le temps de cycle de production, le taux moyen d'utilisation des machines, le taux moyen d'utilisation des travailleurs, le nombre de déplacements, le nombre de mises en course, la durée totale de pannes et le nombre de pièces rejetées. Le tableau 6.4 montre les données utilisées pour la pondération des alternatives par rapport aux sous-critères : coût d'investissement, d'opération, temps moyen dans le système, temps de cycle de production, et taux d'utilisation des machines. De la même façon, les alternatives ont été pondérées en relation aux autres critères et sous-critères.

Tableau 6.4

Données utilisées pour la pondération des alternatives par rapport à chaque critère.

		DECR	DECR	DECR	DECR	INCR
AID	Alternative	Economique Cout d'investisse ment	Economique Cout d'operation	Performance Temps moyen dans le systeme	Performance Temps de cycle de production	Performance Taux moyen d'utilisation des machines
A1	<input checked="" type="checkbox"/> Scenario1	138060	450719	954	2,166	0,224
A2	<input checked="" type="checkbox"/> Scenario2	122280	433735	1594	2,138	0,261
A3	<input checked="" type="checkbox"/> Scenario3	132480	443150	1278	2,155	0,248
A4	<input checked="" type="checkbox"/> Scenario4	112500	434165	2137	2,166	0,274
A5	<input checked="" type="checkbox"/> Scenario5	112440	425013	1187	2,143	0,299

6.5 Synthèse des pondérations

La figure 6.3 montre la synthèse des pondérations. Selon cette synthèse, le scénario 5 résulte le meilleur suivi des scénarios 3, 4, 2 et 1. Dans cette section on se limite à expliquer l'utilisation de l'AHP dans le processus de sélection de scénarios. Une description détaillée de la composition des différents scénarios se trouve dans la section 7.4.2.

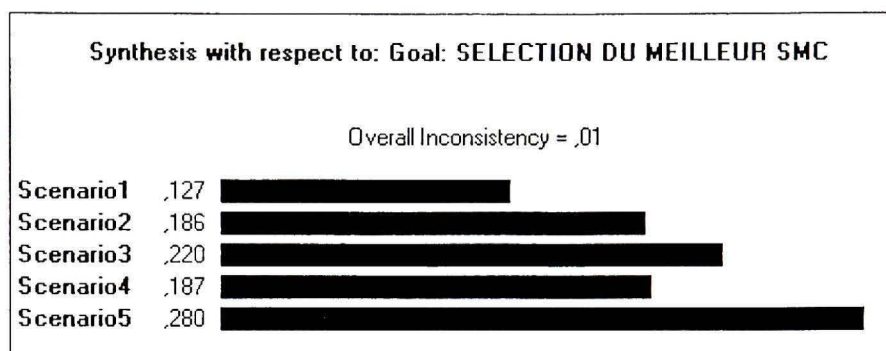


Figure 6.3 Synthèse des pondérations pour la sélection du meilleur SMC.

De la même façon que dans le cas de la présélection des machines (chapitre 3), on valide le résultat de cette sélection par rapport ratio d'incohérence que dans ce cas il est très petit 0,01 lequel est inférieur à 0,1. Donc, l'incohérence de nos jugements est considéré négligeable.

6.6 Analyse de sensibilité

Pour faire la validation finale de la sélection de la meilleure alternative qui dans notre cas est l'alternative 5, on soumet le modèle à de possibles variations dans les poids des critères dans la sélection. Une telle variation pourrait amener à la sélection d'une autre alternative. Donc, on réalise cette analyse de sensibilité pour voir l'élection possible d'une autre solution ou la ratification de l'élection du scénario 5.

Pour réaliser les variations de la pondération des critères, on fait une manipulation graphique dynamique des pondérations des critères de l'exemple. Selon la pondération originale des critères (figure 6.4), le critère Performance est le plus important et conséquemment le scénario 5 semble être le plus avantageux, suivi par les scénarios 3 et 4.

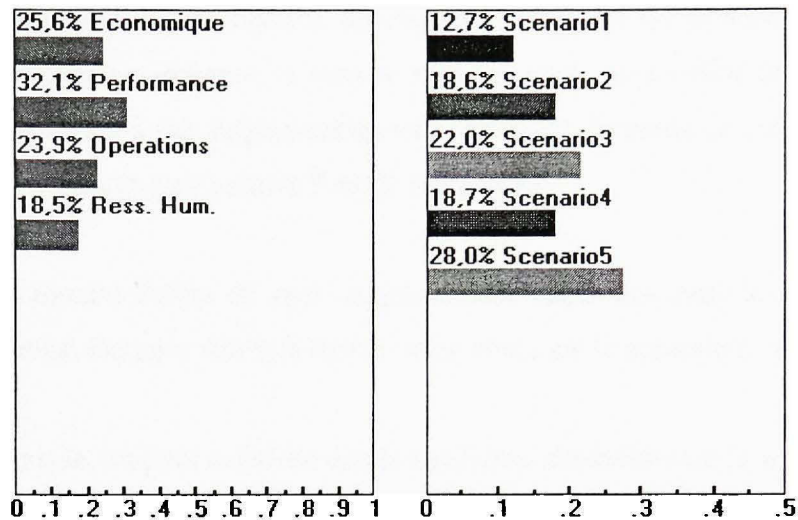


Figure 6.4 Graphiques de pondération des critères et des alternatives.
Pondération originale des critères

La figure 6.5 montre le résultat d'une augmentation du poids du critère économique. Cette augmentation (assez importante) ne produit pas de variation dans la sélection de la meilleure alternative. On peut voir que le scénario 5 continue d'être la meilleure alternative, mais cette fois suivi par les scénarios 4, 2 et 3.

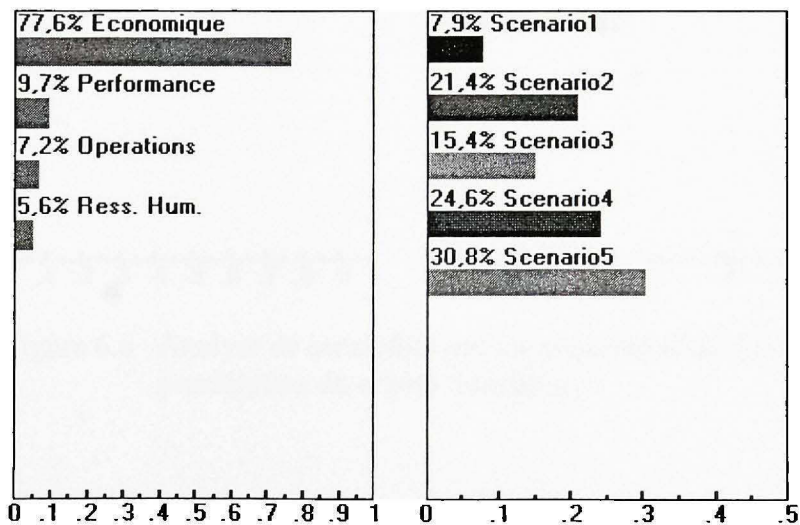


Figure 6.5 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère économique.

L'analyse de sensibilité a été réalisée en couvrant toutes les autres variations possibles dans la pondération des critères, et dans le seul cas où il est possible la sélection d'un autre scénario est due à une augmentation très important du poids du critère Aspect des Opérations; dans ce cas l'alternative 3 est la meilleure.

La figure 6.6 montre l'effet de cette augmentation important dans la pondération du critère Opérations. On peut voir que le deuxième choix est le scénario 5, suivi de 2 et 4.

Selon cette analyse, on peut conclure que la meilleure alternative est le scénario 5, parce qu'avec seulement une très grande variation dans la pondération des critères, cette élection sera compromise.

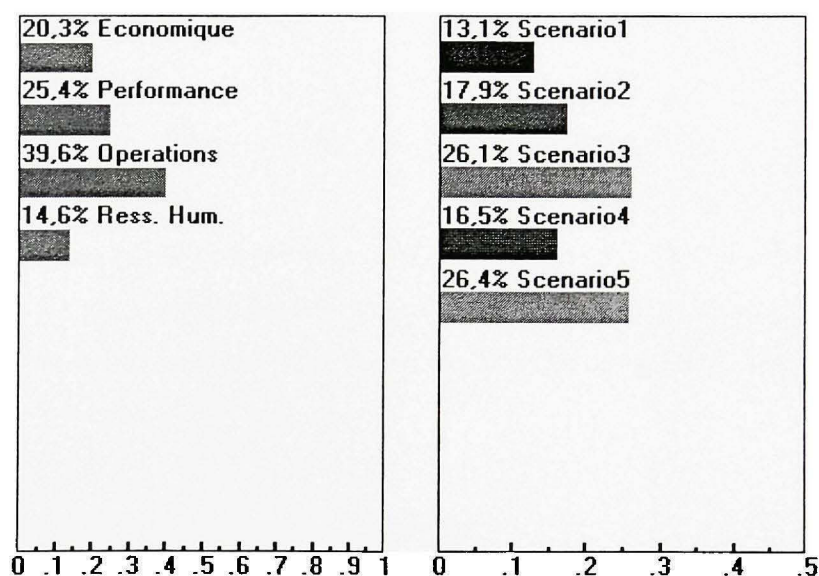


Figure 6.6 Analyse de sensibilité par une augmentation de la pondération du critère Stratégique

6.7 Conclusion

En utilisant l'analyse hiérarchique de procédés, on a présenté dans ce chapitre le modèle de sélection des scénarios de configuration de SMC. On a décrit l'élection des critères et des sous-critères, leur pondération, la synthèse des résultats calculée par le logiciel ExpertChoice, et finalement on a réalisé l'analyse de sensibilité qui amène à la confirmation de la sélection du scénario 5.

CHAPITRE 7

APPLICATION ET ANALYSE

7.1 Introduction

Ce chapitre a comme objectif de présenter un cas exemplaire d'application de l'approche développée dans ce mémoire. On décrit l'exemple d'application dans chacune de ses phases. L'exemple utilisé pour l'application est un cas hypothétique qui vise à couvrir les particularités les plus importantes de l'industrie de la confection, comme :

- Le type de demande.
- Les opérations d'assemblage.
- L'assignation d'opérations à deux processeurs machine et travailleur.
- L'organisation du travail à l'intérieur de chaque cellule.

Ce sont des aspects qui ont aussi été considérés dans le développement de chaque phase de l'approche. Donc, l'applicabilité de cette approche est limitée à des industries qui ont les mêmes types de particularités que l'industrie de vêtements décrites en 4.3 et 4.4.

7.2 Description de l'exemple d'application

Dans notre exemple, la demande arrive par commandes de quantité aléatoire et avec une fréquence aussi aléatoire laquelle reflète de façon proche à ce qui se passe dans l'industrie de la confection de vêtements, cet aspect est considéré dans l'étape de simulation. Le tableau 7.1 montre la moyenne de la demande par saison et produit. Étant donné que la saisonnalité est une caractéristique de l'industrie de la mode, on considère l'existence de deux (2) saisons ou périodes de durée égale. Les produits d'une saison

normalement sont différents de ceux de l'autre saison cela est du aux conditions climatiques et aux conditions de la mode.

Donc, le cas exemplaire est composé de 20 produits (10 par saison).

Tableau 7.1
Demande du cas exemplaire [u/saison].

Saison	Produits									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	65 000	42 000	53 000	43 000	64 000	53 000	60 000	59 000	37 000	56 000
2	59 000	54 000	62 000	54 000	54 000	61 000	45 000	60 000	37 000	58 000

Tous les produits présentent au moins deux pièces ou sous-ensembles qui doivent être assemblées dans chaque cellule. Les figures 7.1 et 7.2 montrent les diagrammes d'opérations des 10 produits par saison, chacun avec 10 opérations et un maximum de 3 sous-ensembles. Notre approche, avec les modèles de formation de cellules et de simulation, aura la possibilité de traiter de produits avec plus d'opérations et sous-ensembles.

Le temps disponible durant la saison pour la production est de 2 quarts par jour, 8 heures par quart, 20 jours par mois et 6 mois par saison. C'est à dire, on disposera de 115200 minutes par saison.

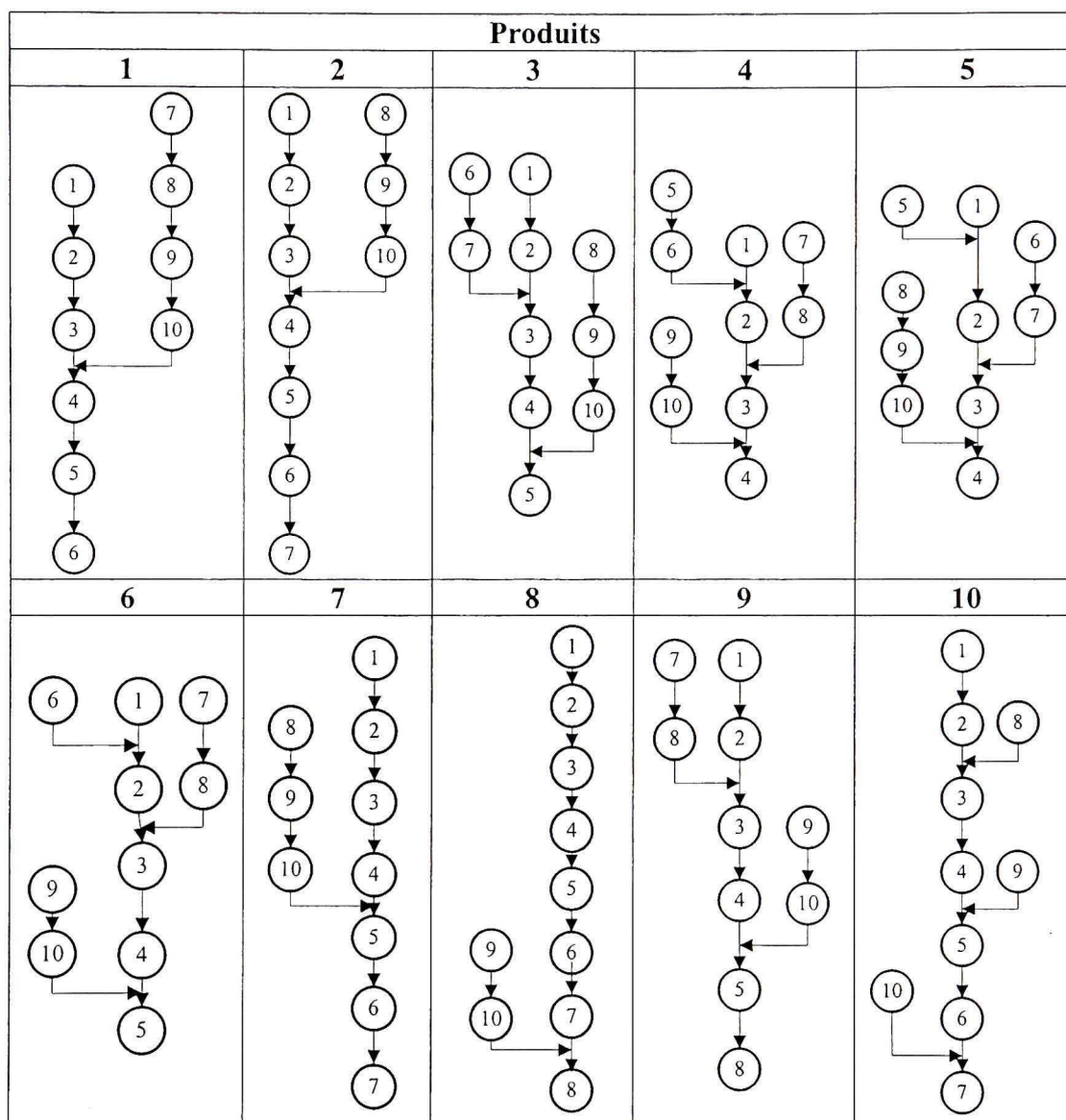


Figure 7.1 Diagrammes d'opérations des produits de la saison 1

Légende :

Opération x

Produit 1,2,3, 4 et 5

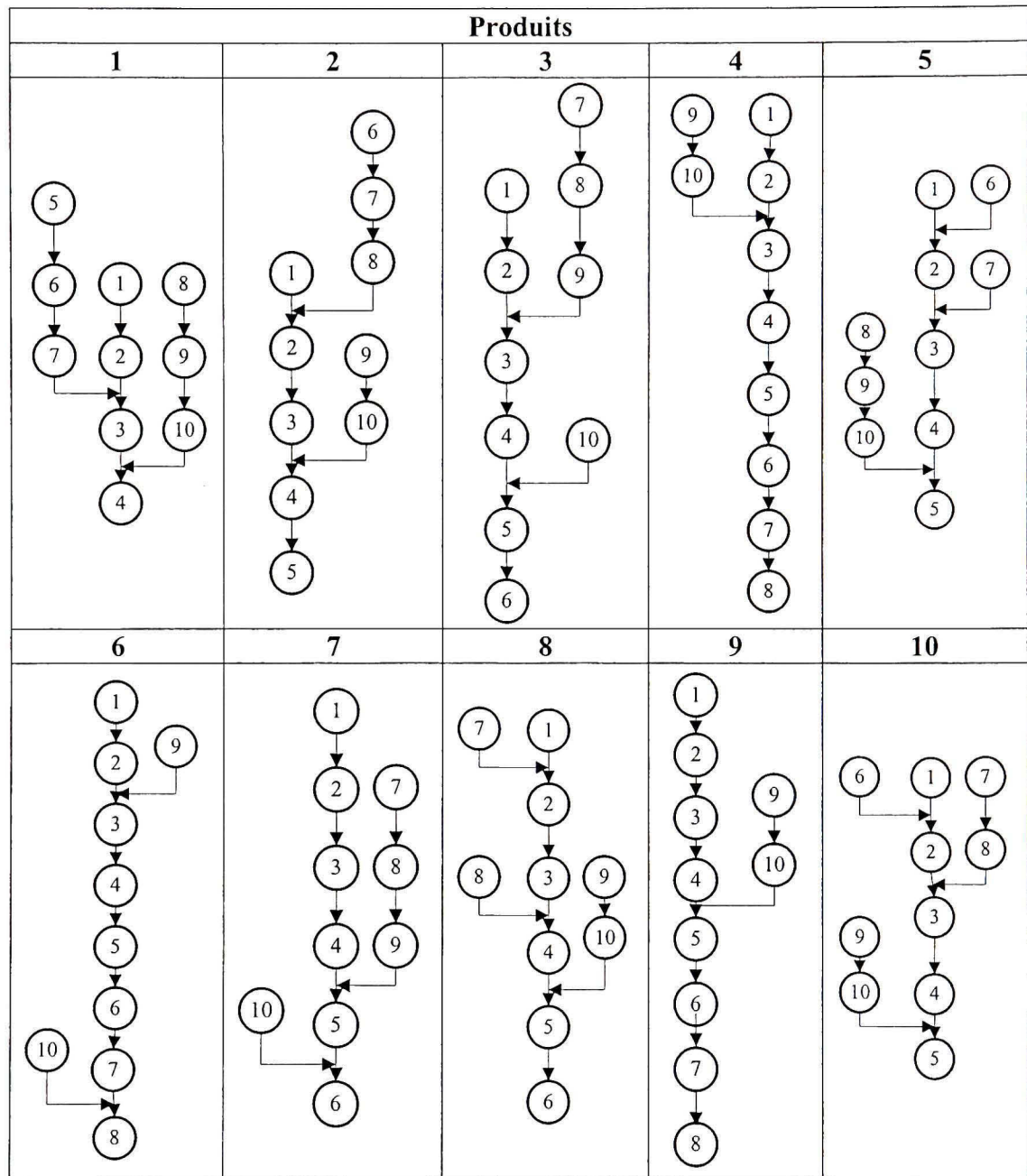


Figure 7.2 Diagrammes d'opérations des produits de la saison 2

7.3 Phase I : Présélection de machines

7.3.1 Données d'entrée

La présélection de machines a comme objectif de réduire le nombre de type de machines candidates afin de simplifier le processus de formation de cellules dans la phase suivante. En effet, notre exemple compte une banque de données de 57 types de machines qui peuvent faire les opérations requises pour la production des 20 produits du cas exemplaire. Un nombre aussi important des machines candidates complique grandement le processus de formation de cellules. En appliquant la méthodologie présentée dans le chapitre 3, on procède initialement à la classification de ces 57 machines par type d'opération. On identifie qu'entre les 200 opérations des 20 produits de l'exemple, ils existent trois (3) groupes principaux d'opérations. Donc, on appliquera l'analyse hiérarchique de procédés AHP à chaque groupe afin de réduire le nombre de machines candidates en éliminant les machines moins attractives pour les fins de cet exemple.

Le tableau 7.2 montre les données pour chaque machine déjà classifiée selon le type d'opération à réaliser. Ce qui en réalité fait référence au type de machine de couture : rabatteuses, ourleuses, piqueuses, etc. Donc, les trois (3) types de machines sont identifiés avec une lettre majuscule A, B et C.

Tableau 7.2

Base de données des machines candidates par type de machine.

Type de machine	Machine	Coût d'Invest. [\$/an]	Durée de vie [ans]	Coût d'opération [\$/an]	Taux de production [u/min]	Temps de mise en course [min]	Nombre d'opérations	Taux de Rejets [%]	Taux de Pannes [%]
A	M001	2000	5	2 800	2,87	1,89	35	0,38	0,53
	M002	2200	5	2 900	2,94	1,96	15	0,45	0,68
	M003	1960	5	2 640	2,77	2,04	22	0,16	0,65
	M004	1940	5	2 560	2,72	2,08	19	0,41	0,75
	M005	1920	5	2 480	2,72	1,84	18	0,60	0,88
	M006	2000	6	2 400	2,68	1,98	22	0,40	0,49
	M007	1991	5,5	2 320	2,62	1,65	31	0,45	0,70
	M008	1860	5	2 240	2,53	1,52	17	0,34	0,62
	M009	1840	5	2 160	2,51	1,87	24	0,44	0,83
	M010	2188	4	2 080	2,46	2,01	26	0,08	0,63
	M011	1960	5	2 950	2,86	1,98	15	0,05	0,85
	M012	1936	5	2 740	2,75	2,54	14	0,47	0,69
	M013	1920	5	2 850	2,89	1,45	12	0,65	0,65
	M014	1940	5	2 940	2,56	1,75	17	0,39	0,97
	M015	1960	5	2 870	2,47	1,95	16	0,36	0,90
	M016	2000	5	2 640	2,67	2,6	14	0,17	0,86
	M017	1896	5	2 560	2,48	1,86	13	0,50	0,91
	M018	1970	5	2 860	2,89	1,48	18	0,54	0,16
	M019	1892	5	2 730	3,01	1,75	24	0,63	0,30
B	M009	1840	5	2 160	3,98	1,56	16	0,18	0,70
	M010	1750	5	2 080	4,18	1,47	32	0,34	0,49
	M012	1855	5,5	2 100	3,60	1,89	24	0,70	0,39
	M004	1940	5	2 560	3,80	1,76	26	0,60	0,60
...

7.3.2 Pondération des critères et sous-critères

La pondération de critères a été réalisée par comparaison binaire en utilisant l'option graphique du logiciel ExpertChoice, cette pondération de critères et sous-critères est la même que celle de l'exemple du chapitre 3. La figure 7.3 montre la structure hiérarchique du modèle AHP pour la présélection des machines. On présente aussi la synthèse finale des pondérations de chaque critère et sous-critère. Ainsi, le critère plus important à considérer à l'heure d'évaluer les alternatives (machines) sera le critère

Fonctionnalité avec un 31,4 % de poids sur la décision finale. Le sous-critère le plus important pour définir le poids du critère Fonctionnalité est le Taux de panne 23,5 %.

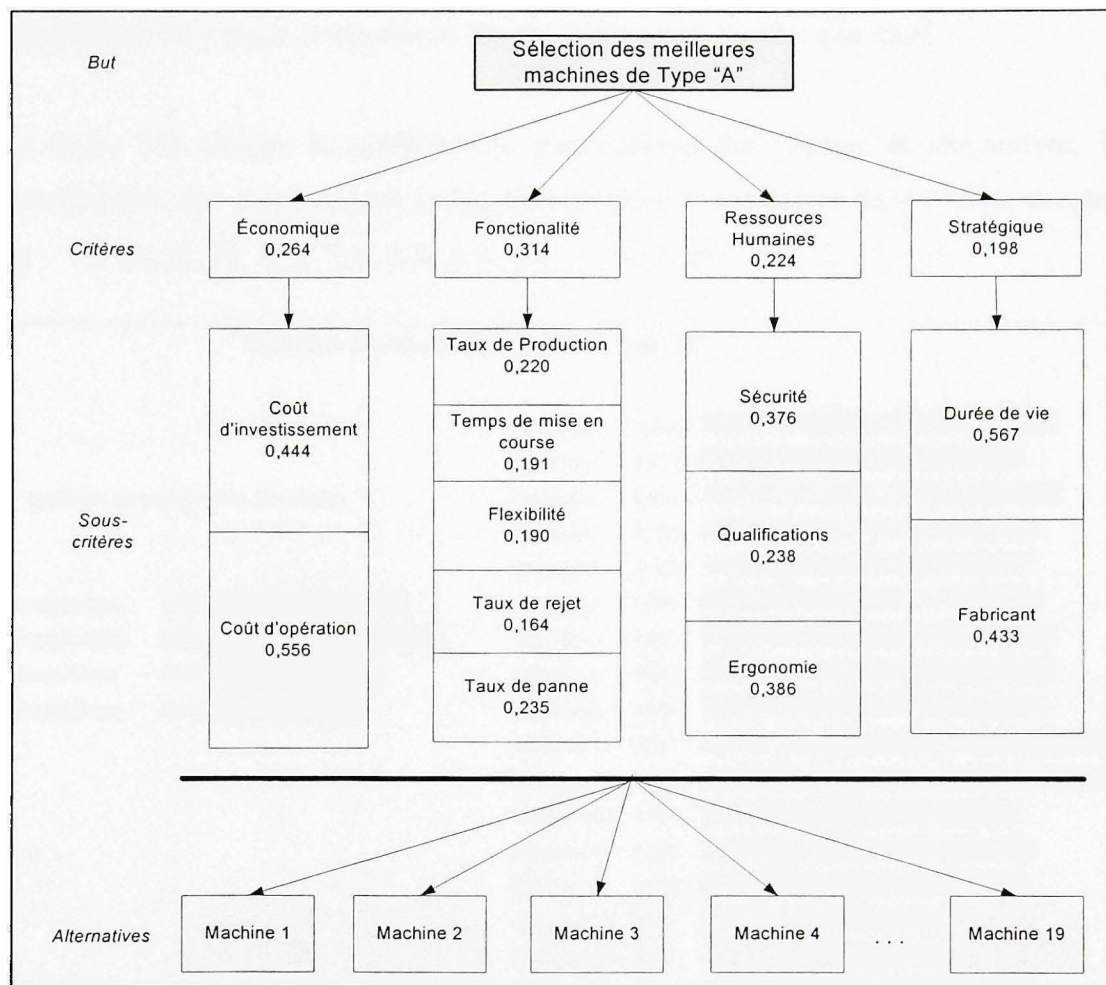


Figure 7.3 Hiérarchie du modèle de présélection de machines et synthèse de pondération de critères.

Le deuxième critère en importance est le facteur Économique avec 26,4 % étant son sous-critère le plus important le Coût de fonctionnement avec 55,6 % de poids. Le troisième critère est constitué par les Ressources Humaines avec un 22,4 % de poids, le sous-critère Ergonomie est le plus important de ses trois (3) sous-critères, avec 38,6 % de poids. Le critère Stratégique est le dernier en importance avec 19,8 % étant le sous-critère Durée de vie le plus important avec 56,7 % du poids total de ce critère.

7.3.3 Pondération des alternatives

La pondération des alternatives est faite par introduction directe de données quantitatives (du Tableau 7.2) et par comparaison binaire des aspects d'ordre qualitatif.

La figure 7.4 montre la synthèse des pondérations des critères et alternatives. La classification des machines par ordre d'importance à considérer dans l'étape suivante est : 11, 10, 18, 19, 1, 3, 7, 8, 9, 6, 4, 5, 13, 14, 16, 2, 15, 17 et 12.



Figure 7.4 Synthèse des pondérations de critères et alternatives pour la sélection de machines type « A »

L'indice d'incohérence est 0,01 le ratio 0,011 donc les pondérations présentent une incohérence négligeable, conséquemment les jugements sont acceptables.

7.3.4 Analyse de sensibilité

On réalise l'analyse de sensibilité du modèle par rapport aux variations dans la pondération des critères. La figure 7.5 montre le résultat d'une augmentation dans la pondération du critère économique de 26,4 % à 39,6 %. Avec cette variation, la nouvelle classification est 10, 11, 18, 19, 8, 3, 1, 9, 7, 4, 6, 16, 5, 13, 17, 14, 15, 2 et 12. De façon similaire on a réalisé la variation de la pondération des autres critères.

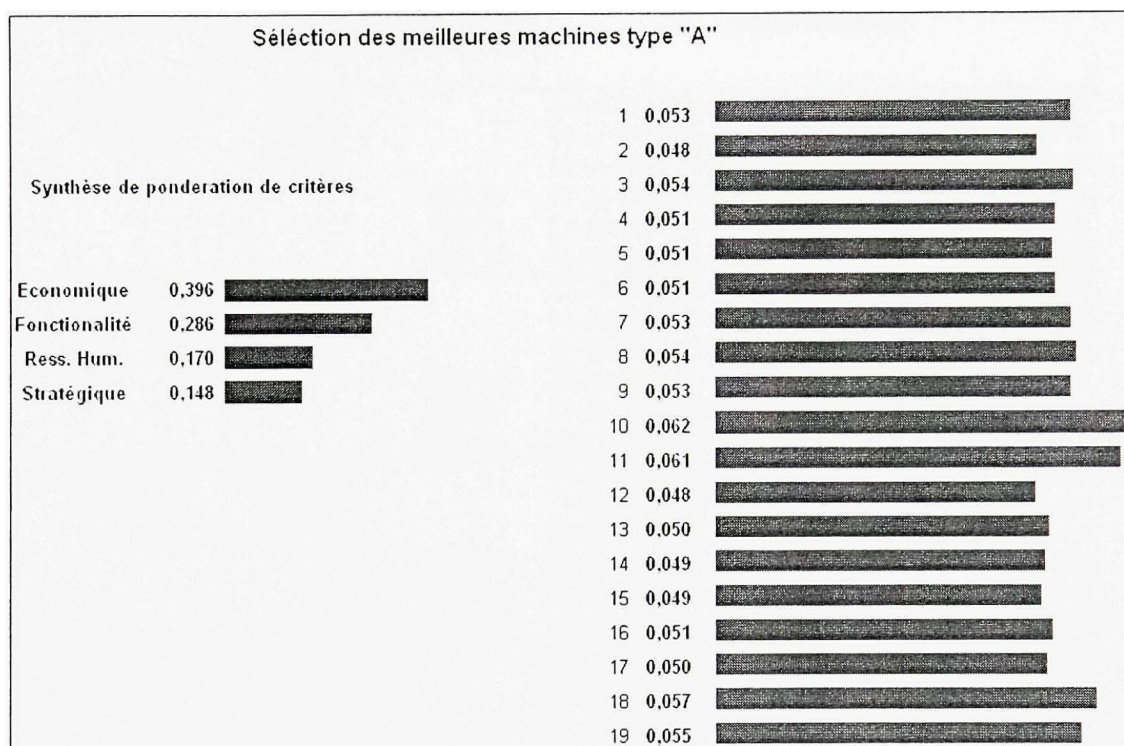


Figure 7.5 Analyse de sensibilité par une augmentation dans la pondération du critère Économique.

Le tableau 7.3 montre le résultat des variations de la pondération de tous les critères. Cette variation est faite de telle façon à couvrir la plupart des variations possibles afin d'obtenir des conclusions plus valables pour notre analyse. Ainsi on modifie chaque critère pour une augmentation et diminution petite, moyenne et grande. À partir des

classifications de machines qui résultent de ces variations, on peut déterminer le groupe de machines qui seront considérées comme candidates à l'étape de formation de cellules.

Tableau 7.3

Analyse de sensibilité
Résultat des variations de la pondération des critères.

Critère	Variation		Classification
	Augmentation à	Diminution à	
Économique 26,4 %	29,7 %		11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
	39,6 %		10-11-18-19-8-3-1-9-7-4-6-16-5-13-17-14-15-2-12
	47,9 %		10-11-18-8-19-9-3-7-1-4-5-16-6-13-17-14-15-12-2
		22,7 %	11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		18,6 %	11-10-18-19-3-1-7-8-6-9-4-16-13-5-14-17-2-15-12
		13,5 %	11-10-18-19-3-1-7-8-6-9-4-16-13-14-5-2-17-15-12
Performance 31,4 %	36,3 %		11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
	41,7 %		11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-16-4-13-5-14-17-2-15-12
	47,7 %		11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-16-4-13-5-14-2-15-17-12
		28,4 %	11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		24,8 %	11-10-18-19-3-8-7-1-9-6-4-16-13-5-17-14-15-2-12
		20,5 %	10-11-18-19-8-7-3-1-9-4-6-5-13-17-16-14-15-2-12
Ressources Humaines 22,4 %	26,7 %		11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
	29,4 %		11-10-18-19-3-1-8-7-9-4-6-16-13-5-14-17-15-2-12
	32,7 %		11-10-18-19-3-1-8-7-9-4-6-16-5-13-17-14-15-2-12
		20,5 %	11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		18,8 %	11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		16,7 %	11-10-18-19-3-7-1-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
Stratégique 19,8 %	22,8 %		11-10-18-19-3-1-7-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
	27,0 %		11-10-18-19-3-7-1-8-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
	33,0 %		11-10-18-19-7-3-1-8-9-6-4-16-13-14-5-17-15-2-12
		16,5 %	11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		14,7 %	11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12
		12,9 %	11-10-18-19-3-1-8-7-9-6-4-16-13-5-14-17-15-2-12

On peut distinguer clairement le groupe de machines qui pourront être considérées dans la prochaine étape. On applique la même procédure : pondération d'alternatives, synthèse de résultats et analyse de sensibilité pour la sélection des types de machines B et C. Le tableau 7.4 montre le résultat du processus de présélection. On détermine que 10 seront les types de machines candidates à réaliser les 200 opérations des 20 produits.

Tableau 7.4

Résultat du processus de présélection pour les 3 types de machines.

Machine type	Sélection
A	11, 10, 18, 19
B	11, 18, 24, 28, 34, 42
C	10, 34, 42, 48, 53
A, B et C	10, 11, 18, 19, 24, 28, 34, 42, 48, 53

7.4 Phase II : Formation de cellules

7.4.1 Données d'entrée

On utilise l'information de base dont on dispose sur le processus de production, et l'information sur les 10 machines candidates du tableau 7.5.

Tableau 7.5

Machines candidates pour la formation de cellules.

Machine	Coût Fixe CFM [\$ / an]	Coût Variable CVM [\$ / an]	Temps moyen entre pannes MTBF [min]	Temps moyen de réparation MTTR [min]	Taux d'utilisation maximal TUM [%]
1	2 000	2 800	14 000	75	90
2	1 980	2 720	12 000	82	90
3	1 960	2 640	12 000	79	90
4	1 940	2 560	9 000	68	90
5	1 920	2 480	9 000	80	90
6	1 900	2 400	14 000	69	90
7	1 880	2 320	10 000	71	90
8	1 860	2 240	11 000	69	90
9	1 840	2 160	10 000	84	90
10	1 820	2 080	11 000	70	90

Le tableau 7.6 présente l'information additionnelle sur le temps d'opération par type de machine et type de travailleur, de même que les taux de rejet.

Tableau 7.6

Temps d'opération et taux de rejet par type de machine et type de travailleur.

Saison	Produit	Opération	Machine	Travailleur			Taux de Rejet
s	i	j	N	Temps d'opération [sec]			
2	10	10	10	1	2	3	[%]
1	1	1	1	0,342	0,349	0,356	0,002
1	1	1	2	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1	1	3	0,354	0,361	0,369	0,002
1	1	1	4	0,360	0,367	0,375	0,007
1	1	1	5	0,360	0,367	0,375	0,007
1	1	1	6	0,365	0,373	0,380	0,005
1	1	1	7	0,374	0,382	0,389	0,002
1	1	1	8	0,387	0,395	0,403	0,004
1	1	1	9	0,390	0,398	0,406	0,006
1	1	1	10	0,398	0,406	0,414	0,003
1	1	2	1	0,177	0,181	0,185	0,010
1	1	2	2	0,187	0,191	0,195	0,003
1	1	2	3	0,190	0,194	0,198	0,005
1	1	2	4	0,194	0,198	0,202	0,009
1	1	2	5	0,205	0,209	0,214	0,003
1	1	2	6	0,215	0,220	0,224	0,009
1	1	2	7	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1	2	8	0,220	0,224	0,229	0,006
...
2	10	10	10	0,000	0,000	0,000	0,000

L'heuristique sélectionnera aussi les travailleurs pour chaque opération. Dans notre cas, il existe seulement trois (3) types de travailleurs, tous complètement versatiles:

- Travailleur type 1 : Il s'agit de travailleurs rapides, mais qui ont des coûts d'embauche, de licenciement et d'emploi plus élevés.
- Travailleur type 2 : Il a une performance moyenne et des coûts aussi moyens.
- Travailleur type 3 : Il est un travailleur moins rapide, mais avec bas coût.

L'information sur les coûts de chaque travailleur est présentée dans le tableau 7.7.

Tableau 7.7

Coûts des travailleurs candidats pour la formation de cellules.

Travailleur	Coûts		
	Emploi [\$saison]	Embauche [\$]	Licenciement [\$]
1	9 600	400	530
2	9 120	380	510
3	8 640	360	490

7.4.2 Résolution de l'heuristique et génération de scénarios

Les scénarios sont générés en modifiant la valeur des paramètres de conception :

NMINCell	Nombre minimal de cellules dans une saison
NXMach	Nombre maximal de machines par cellule
NXTrav	Nombre maximal de travailleurs par cellule
NXProd	Nombre maximal de produits par cellule
MINCSS	Coefficient de similarité minimal

La modification de ces paramètres produit une configuration de SMC avec différents nombres de cellules. Ainsi, en relaxant les valeurs de ces paramètres au maximum, c'est à dire NMINCell=1, NXMach=100, NXTrav=100, NXProd=100 et MINCSS=0, on obtient un SMC avec 3 et 4 cellules durant la saison 1 et 2 respectivement, 43 et 52 machines par saison et 18 et 22 travailleurs. On nomme cette configuration Scénario 0.

Tableau 7.8

Composition du SMC avec relaxation maximale de paramètres de conception - Scénario 0.

Nombre de	Saison 1	Saison 2
Cellules	3	4
Machines	43	52
Travailleurs		
1	15	16
2	1	3
3	2	3
Coût d'investissement et utilisation de machines	152 520 \$	
Coût d'emploi de travailleurs	385 900 \$	
Coût total	538 420 \$	

Dans la résolution de l'heuristique, on a utilisé un ordinateur avec un processeur de 2.4 GHz et 640 Mb de RAM. Le temps employé a été de 524 secs. L'information complète sur la solution du Scénario 0 se trouve à l'Annexe IV.

Pour la génération de scénarios, on a fixé différentes valeurs de paramètres afin de générer 5 scénarios avec un nombre différent de cellules. L'effet ainsi que les possibles raisons pour fixer une valeur à chacun des paramètres sont décrits de façon générale dans le tableau 2.1.

On génère 5 scénarios différents par rapport au nombre de cellules avec l'objectif de faire plus évident les différences entre les scénarios de SMC et de cette façon pouvoir réaliser la sélection d'un de ses scénarios qui représente la meilleure option.

Les valeurs des paramètres utilisés pour générer ces 5 scénarios et le nombre de cellules obtenu pour chaque scénario sont indiquées dans le tableau 7.9.

Pour le scénario 1, on a fixé le nombre minimal de cellules (NMINCell) à 5 et on a laissé les autres paramètres relaxés comme ceux du Scénario 0. Pour les autres scénarios on a agi sur les autres paramètres.

Tableau 7.9

Stratégie de génération de scénarios.

Paramètre		Scénarios					
		0	1	2	3	4	5
NMINCell		1	5	1	1	1	1
NXMach		100	100	13	100	100	100
NXTrav		100	100	100	6	100	100
NXProd		100	100	100	100	3	100
MINCSS		0	0	0	0	0	0,75
Nombre de cellules	Saison 1	3	5	5	4	4	3
	Saison 2	4	5	4	5	4	4

7.4.2.1 Scénario 1

NMINCell	Nombre minimal de cellules dans une saison = 5
-----------------	--

La limitation à la création d'un nombre supérieur ou égal à 5 cellules, a forcé l'heuristique à déterminer 5 cellules par saison (tableau 7.10). Son nécessaires pour la première et deuxième saison 20 et 23 travailleurs respectivement et 62 machines. En comparaison au Scénario 0, le Scénario 1 a choisi un nombre supérieur de travailleurs de types 2 et 3. Cette sélection est due au nombre supérieur de cellules, ce qui donne une marge de manœuvre pour l'élection des processeurs moins performants et moins chers.

Tableau 7.10

Composition du SMC – Scénario 1.

Nombre de	Saison 1	Saison 2
Cellules	5	5
Machines	62	62
Travailleurs		
Type 1	14	14
Type 2	2	4
Type 3	4	5
Coût d'investissement et utilisation de machines	178 280 \$	
Coût d'emploi de travailleurs	410 200 \$	
Coût total	588 480 \$	

L'information plus détaillée sur la composition de chaque cellule se trouve dans l'annexe IV. Les tables 7.11 et 7.12 montrent la matrice de regroupement des produits pour les deux (2) saisons et son assignation aux processeurs machine et travailleur. L'heuristique a choisi les machines et les travailleurs pour une cellule de façon à maximiser leur utilisation, mais cette sélection considère aussi que l'ensemble des processeurs machine et travailleurs seront utilisés dans les deux saisons. Donc, la sélection des processeurs ne considère pas uniquement les besoins d'une cellule et saison mais elle considère aussi une problématique plus ample et elle tient en compte les autres cellules et les autres saisons.

Un aspect qu'il est intéressant d'observer ici est la sous-utilisation des machines dans quelques produits de la cellule. Par exemple dans la saison 1 et dans la cellule 2 la machine M3 est utilisée pour traiter le produit 7 mais n'est pas utilisée pour le produit 2. Cette faible utilisation de la machine se justifie de deux (2) façons. Premièrement, la configuration a été conçue en priorisant la meilleure utilisation des travailleurs, donc une utilisation basse des machines n'est pas assez importante. Deuxièmement, la basse

utilisation d'une machine dans une cellule d'une saison est compensée par une meilleure utilisation dans une autre saison.

Tableau 7.11

Matrice de regroupement de Machines – Scénario 1.

OP\PROD	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	7	6
1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
2	1	2	4	1	6	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	2	1	1	1
3	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	8	1
4	4	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	7	1	1	2	1
5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	2	1	2	2	1	1
6	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	5	1	3	1	1	1	1	5	8	1	1	1	1	8	1	2	1	1	2	1
9	1	1	3	1	1	1	2	2	1	1	7	1	1	2	1	1	1	1	1	1
10	9	6	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	5	1	1	1	1

Tableau 7.12

Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 1.

OP\PROD	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	7	6
1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	3	1
3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	2
5	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	2	1
6	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	2	2
7	1	2	1	3	1	1	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
8	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	3	2
9	2	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	3
10	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	3	1	1	3	3	2

7.4.2.2 Scénario 2

NXMach	Nombre maximal de machines par cellule	=	13
---------------	--	---	----

Cette limitation à la formation de cellules fait que le nombre de cellules soit supérieur à celui du Scénario 0. De la même façon, le nombre de machines est supérieur avec des valeurs de 58 et 50 pour la première et deuxième saison respectivement. Dans la saison 2 il y aura 8 machines qui ne seront pas utilisées. Les coûts sont supérieurs à celui du Scénario 0 à cause du plus grand nombre de machines et travailleurs.

Les matrices de regroupement sont présentées dans les tables 7.14 et 7.15 le regroupement des produits et son assignation aux processeurs, machine et travailleur, pour les deux (2) saisons.

Tableau 7.13

Composition du SMC – Scénario 2.

Nombre de	Saison 1	Saison 2
Cellules	5	4
Machines	58	50
Travailleurs	14	17
Type 1	2	2
Type 2	3	3
Type 3		
Coût d'investissement et utilisation de machines	162 410 \$	
Coût d'emploi de travailleurs	394 560 \$	
Coût total	556 970 \$	

On peut observer que de la même façon, il existe une sous utilisation de quelques machines dans quelques cellules, sous-utilisation qui normalement est compensée par une meilleure utilisation durant l'autre saison de la période d'analyse.

Tableau 7.14

Matrice de regroupement de Machines – Scénario 2.

OP\PROD	SAISON 1										SAISON 2									
	1	10	2	3	7	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	4	6	7	5	9
1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1
2	1	5	2	1	4	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	8	1	1
4	3	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	2	7	1
5	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	2	2	1	1	1	2
6	1	3	8	1	1	1	1	8	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3
7	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	3	1	1	1	3	1	1	5	8	1	1	1	1	8	1	1	1	2	2	1
9	1	1	1	1	3	1	2	2	1	1	7	1	1	2	1	1	1	1	1	1
10	9	3	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	1

Tableau 7.15

Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 2.

OP\PROD	SAISON 1										SAISON 2									
	1	10	2	3	7	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	4	6	7	5	9
1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	3	1
3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
4	1	1	2	1	2	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	3	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1
6	1	1	3	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	3
8	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3
9	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1
10	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3	1	2	3	1	1	1	1	1	1

7.4.2.3 Scénario 3

$$\text{NXTrav Nombre maximal de travailleurs par cellule} = 6$$

De façon très semblable au scénario précédent, cette limitation oblige à avoir un nombre supérieur de cellules à celui du Scénario 0. On a déterminé que seront 4 et 5 cellules pour les deux (2) saisons. Les quatre (4) cellules de la première saison demandent la participation de 52 machines et 19 travailleurs, tandis que les cinq (5) cellules de la deuxième nécessitent 62 machines et 23 travailleurs. L'embauche de travailleurs dans les deux saisons est nécessaire et il n'y a aucun licenciement.

Le coût total est supérieur à celui du Scénario 0. Cette différence dans les coûts est due principalement au plus petit nombre de processeurs du Scénario 0.

Tableau 7.16

Composition du SMC – Scénario 3.

Nombre de	Saison 1	Saison 2
Cellules	4	5
Machines	52	62
Travailleurs		
Type 1	16	16
Type 2	1	2
Type 3	2	5
Coût d'investissement et utilisation de machines	172 570 \$	
Coût d'exploitation de travailleurs	404 000 \$	
Coût total	576 570 \$	

Les tables 7.17 et 7.18 montrent la matrice de regroupement des processeurs machine et travailleur et leur assignation à chaque cellule.

Tableau 7.17

Matrice de regroupement de Machines – Scénario 3.

OP.	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	7	6
1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
2	1	2	4	1	2	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	2	1	1	1
3	1	1	1	1	3	8	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	8	1
4	3	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	7	1	1	2	1
5	1	2	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	5	2	1	2	2	1	1
6	1	8	1	1	6	1	1	8	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1
7	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	3	1	3	1	8	1	1	5	8	1	1	1	1	8	1	2	1	1	2	1
9	1	1	3	1	9	1	2	2	1	1	7	1	1	2	1	1	1	1	1	1
10	9	6	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	5	1	1	1	1

Tableau 7.18

Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 3.

OP.	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	7	6
1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	1	3	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	2
5	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	2
7	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
8	2	1	2	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2
9	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	3	1	2

7.4.2.4 Scénario 4

NXProd	Nombre maximal de produits par cellule	=	3
---------------	--	---	---

En fixant une limite maximale de 3 produits par cellule, on oblige à la création de 4 cellules ou plus pour les 10 produits de chaque saison. L'heuristique détermine que le nombre de cellules le plus convenable du point de vue économique est de 4 cellules par saison.

Durant la saison 1, on aura besoin de 52 machines et 19 travailleurs. Durant la saison 2, 52 machines et 22 travailleurs seront nécessaires. Le coût total est supérieur à celui du Scénario 0.

Tableau 7.19

Composition du SMC – Scénario 4.

Nombre de	Saison 1	Saison 2
Cellules	4	4
Machines	52	52
Travailleurs	16	16
Type 1	0	3
Type 2	3	3
Type 3		
Coût d'investissement et utilisation de machines	152 580 \$	
Coût d'exploitation de travailleurs	395 020 \$	
Coût total	547 600 \$	

La matrice de regroupement de processeurs selon les opérations, produit et cellules, ainsi que l'assignation proposée par l'heuristique sont présentées dans les tableaux 7.20 et 7.21.

Tableau 7.20

Matrice de regroupement de Machines – Scénario 4.

O\OPER	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	6	7
1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1
2	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	2	1	1	1
3	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	8
4	3	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	7	1	1	1	2
5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	2	1	2	2	1	1
6	1	8	1	1	3	1	1	8	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	3	1	3	1	1	1	1	5	8	1	1	1	1	8	1	2	1	1	1	2
9	1	1	3	1	1	1	2	2	1	1	7	1	1	2	1	1	1	1	1	1
10	9	6	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	5	1	1	1	1

Tableau 7.21

Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 4.

O\OPER	SAISON 1										SAISON 2									
	1	2	7	3	10	4	5	9	6	8	1	8	2	10	3	5	9	4	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	3	1	3	3	1	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	2
6	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	2	1	1	1	3	1	1	1
7	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1
8	1	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	2	2	1
9	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	2	1	1

7.4.2.5 Scénario 5

MINCSS	Coefficient de similarité minimal	= 0,75
---------------	-----------------------------------	--------

L'agrégation de cellules est limitée par le coefficient de similarité de telle façon que l'heuristique détermine 3 et 4 cellules pour la saison 1 et 2 respectivement.

Pour les 3 cellules de la première saison on utilisera 43 machines et 18 travailleurs. Pour les 4 cellules de la deuxième saison on utilisera 52 machines et 22 travailleurs.

Tableau 7.22

Composition du SMC – Scénario 5.

Nombre de	Saison1	Saison 2
Cellules	3	4
Machines	43	52
Travailleurs		
Type 1	15	16
Type 2	1	3
Type 3	2	3
Coût d'investissement et utilisation de machines	152 520 \$	
Coût d'exploitation de travailleurs	538 420 \$	
Coût total	547 600 \$	

Le coût est supérieur à celui du Scénario 0 (avec relaxation maximale), pour le nombre supérieur de ressources choisies dans le Scénario 5. Les tableaux 7.23 et 7.24 montrent la matrice de regroupement des produits pour les deux saisons et leur assignation aux processeurs machine et travailleur.

Tableau 7.23

Matrice de regroupement de Machines – Scénario 5.

OP\OPER	SAISON 1									SAISON 2										
	1	2	7	3	6	8	10	4	5	9	1	8	2	10	3	5	9	4	6	7
1	1	9	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1
2	1	2	8	1	1	1	5	1	1	1	1	8	1	1	1	1	2	1	1	2
3	1	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	3
4	3	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	3	1	7	1	1	1	4
5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	2	1	2	2	1	5
6	1	8	1	1	1	1	3	1	1	8	1	2	1	1	1	1	3	1	1	6
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
8	3	1	4	1	8	1	1	1	1	5	1	1	1	8	1	2	1	1	1	8
9	1	1	3	1	1	1	1	1	2	2	7	1	1	2	1	1	1	1	1	9
10	9	9	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	5	1	1	1	10

Tableau 7.24

Matrice de regroupement de Travailleurs – Scénario 5.

O\OPER	SAISON 1									SAISON 2										
	1	2	7	3	6	8	10	4	5	9	1	8	2	10	3	5	9	4	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	3	1	1	1	2
6	1	3	3	2	2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	2	1	2	1	3	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1
9	3	1	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	2	1	1

7.5 Phase III : Simulation

7.5.1 Données d'entrée

L'information d'entrée, dans cette phase, fait référence principalement à l'introduction des aspects aléatoires et dynamiques de la simulation tels que les types de distribution de probabilité et ses paramètres pour l'arrivée des commandes, les temps de traitement, l'arrivée de pannes et le temps de réparation. Additionnement à l'information déjà présentée dans le chapitres précédents on ajoute le temps moyen d'inter-arrivé des commandes (tableau 7.25). Pour la génération de la taille des commandes et les pannes, on utilise la procédure indiquée dans la section 5.3.

Tableau 7.25

Temps moyen d'inter-arrivée des commandes [min].

Saison	Produits									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2 943	4 986	3 004	3 361	2 647	3 979	4 608	2 769	3 381	3 041
2	4 211	3 146	3 235	2 976	2 656	4 360	3 590	4 040	2 681	4 959

Par exemple dans le cas du produit 1 de la saison 1:

Du tableau 7.25	Temps moyen d'inter-arrivé des commandes du produit 1 en la saison 1 $TIACS_{11} = 2\,943$ [min]
Du tableau 7.1	Demande du produit 1 en la saison 1 $D_{11} = 65\,000$ [u/saison]
De la section 7.2	Durée de la saison 1 $DuréeSaison_1 = 115\,200$ [min]
De la section 5.3.3	Nombre des commandes du produit 1 en la saison 1

$$NCOM_{11} = \frac{DuréeSaison_1}{TIACS_{11}} = \frac{115200}{2943} = 39,14 [\text{commandes/saison}]$$

Taille de la commande du produit 1 en la saison 1

$$CM_{11} = \frac{D_{11}}{NCOM_{11}} = \frac{65000}{39,14} = 1660,55 [\text{u/commande}]$$

Avant de réaliser l'expérimentation, on doit générer trois (3) fichiers de type texte qui seront la base de données du modèle de simulation. Pour cela, on utilise l'information générée par l'heuristique, laquelle est éditée sur Excel. La composition de cette base des données est décrite au tableau 5.1. L'édition de l'information compte trois (3) étapes qui sont les suivantes :

1. On réalise la notation des machines et des travailleurs. Cette notation est formée par une lettre M suivie d'un chiffre qui indique le type de machine et un autre chiffre qu'indique le numéro de la machine. Par exemple : M103 est la machine 3 du type 1, M901 est la machine 1 du type 9, etc. Pour les travailleurs la notation utilisée est similaire à celle des machines. La lettre T désigne la ressource travailleur, le premier des deux chiffres indique le type de travailleur et le deuxième chiffre indique le numéro du travailleur. Par exemple T35 est le travailleur 5 de type 3. La notation indiquée ici est faite pour la taille spécifique de notre problème exemple. Pour des problèmes plus grands on suivra la même procédure pour réaliser la notation.
2. Une partie de l'édition de données pour la simulation consiste en la réassignation des opérations aux travailleurs dans chaque cellule. Cette réassignation est basée sur l'information générée par l'heuristique. Mais, la réassignation considère en plus l'aspect dynamique de la simulation puisque les travailleurs se déplacent entre les stations de travail selon les besoins de production. Une autre différence est que l'heuristique considère un seul travailleur par opération tandis que dans la simulation et dans la réalité, cette

limitation n'existe pas parce que quelques opérations doivent être assignées à deux travailleurs selon leur disponibilité afin d'avoir une ligne bien équilibrée.

Comme exemple de réassignation, on prend le cas de la cellule 1 du scénario 1, dans laquelle on traite le produit 1 qui est décrit dans le diagramme d'opérations figure 7.6.

La procédure pour faire cette réassignation est la suivante :

- Déterminer le contenu de travail ou temps total de traitement du produit. Dans l'exemple il est égal à 2,815 min.
- Déterminer la charge de travail pour chaque travailleur en divisant le temps total de traitement par le nombre de travailleurs dans la cellule (3). La charge de travail par travailleur est 0,938 min/pièce.
- Assigner les opérations aux travailleurs de façon à couvrir la charge par travailleur.

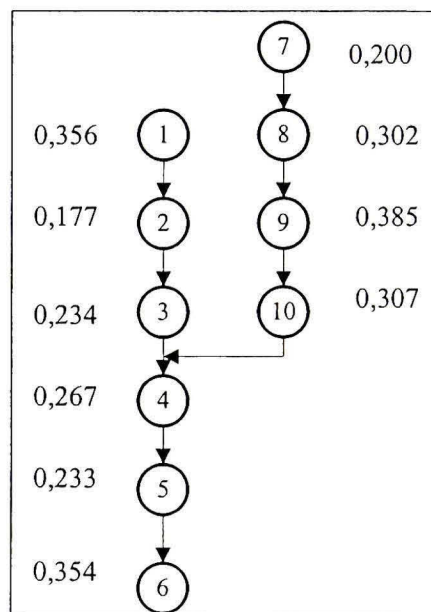


Figure 7.6 : Diagramme d'opérations du produit 1 et temps d'opération [min].

Le tableau 7.26 montre cette assignation aux travailleurs T31, T21 et T11. Les opérations 4 et 8 ont chacune été assignés à deux (2) travailleurs.

Tableau 7.26

Réassignation des opérations aux travailleurs dans la cellule du Scénario 1.

Opération	Temps	T31	T21	T11
1	0,356	0,356		
2	0,177	0,177		
3	0,234	0,234		
4	0,267	0,171	0,096	
5	0,233		0,233	
6	0,354		0,354	
7	0,200		0,200	
8	0,302		0,056	0,246
9	0,385			0,385
10	0,307			0,307
Total	2,815	0,938	0,938	0,938

Cette procédure est appliquée pour tous les produits de chaque cellule.

- En outre, on ajoute l'information déjà utilisée dans l'heuristique telle que la demande, le nombre de sous-ensembles, le nombre d'opérations dans chaque sous-ensemble, les points d'assemblage, le temps moyen d'arrivée de commandes et de pannes, le temps moyen de réparation et les rejets par opération.

7.5.2 Expérimentation

Pour la simulation, on considère deux (2) quarts de travail par jour de 8 heures chacun, 20 jours par mois et 6 mois par saison, ce qui donne 115 250 minutes par saison. Donc le temps de la simulation sera de 230 500 minutes pour les deux saisons. La simulation est

du type *terminate* c'est à dire que le système est vidé périodiquement (pour chaque commande), pour cette raison on ne considère pas un régime transitoire. On réalise 10 répliques par simulation.

Le tableau 7.27 présente les résultats de la simulation pour chaque Scénario.

- Les coûts d'investissement et d'opération, sont directement proportionnels au nombre de cellules. Un nombre de cellules supérieur implique normalement d'avoir plus de machines dans le système ainsi que plus de travailleurs. Le Scénario 1, qui a cinq (5) cellules dans chaque saison, présente le coût d'investissement le plus grand, et le Scénario 5 qui a trois (3) et quatre (4) cellules en chaque saison possède le coût le moins élevé.
- Le temps moyen dans le système est inférieur pour le Scénario 1 principalement à cause du plus grand nombre de processeurs dans son système, ce qui permet de réduire le temps total de traitement des pièces.
- Pour tous les scénarios le taux d'utilisation des machines est inférieur au taux d'emploi des travailleurs. Cela démontre que notre modèle (heuristique et simulation) priorise l'utilisation des travailleurs.
- Le nombre de déplacements est plus grand pour le scénario 1, parce que ce scénario a le plus petit nombre de travailleurs par cellule : 4 pour la première saison et 4,6 pour la deuxième saison (obtenus à partir du tableau 7.10). Un nombre inférieur de travailleurs par cellule implique que les travailleurs doivent se déplacer plus souvent entre les 10 postes de travail (machine-opération).

- Le nombre de mises en course est supérieur pour le scénario 5, parce que il possède le plus petit nombre de cellules, 3 pour la première saison et 4 pour la deuxième. Conséquemment il existe plus de types de produits par cellule (3,3 et 2,5 pour chaque saison). Donc, il existe plus de probabilité que les commandes qui arrivent soient de produits différents à celui qui est en train d'être traité dans la cellule. Ce qui demande une nouvelle mise en course.
- Les autres indices ont des valeurs très hétérogènes par rapport à chaque scénario et ils sont dus principalement à la différente composition des cellules.

Tableau 7.27

Résultats de la simulation.

		SCÉNARIO				
		1	2	3	4	5
Coût d'investissement	[\$/an]	138 060	122 280	132 480	112 500	112 440
Coût d'opération	[\$/an]	450 719	433 735	443 150	434 165	425 013
Temps moyen dans le système	[min]	954	1 594	1 278	2 137	1 187
Temps de cycle de production	[min]	2,166	2,138	2,155	2,166	2,143
Taux moyen d'utilisation des machines		0,224	0,261	0,248	0,274	0,299
Taux moyen d'emploi des travailleurs		0,680	0,682	0,703	0,730	0,754
Transport intracellulaire	[dépl.]	6891538	6151393	6091791	6186817	5681660
Reconfiguration de cellules						
	[mises en course]	577	613	610	639	648
Maintenance (temps total de						
réparation)	[min]	129 616	129 074	122 147	130 248	127 957
Rejets	[u]	47 506	47 455	44 593	47 374	47 201
Fatigue pour le transporte	[depl/trav]	323090	305730	294737	304684	286145
Responsabilité		0,215	0,205	0,210	0,205	0,200
Compétence		58,50	57,50	58,75	57,75	56,50

On présente dans l'annexe V le rapport sommaire de la simulation de la cellule 4 de la saison 1 du Scénario 1.

7.5.3 Validation du modèle de simulation

La validation du modèle de simulation se réalise en comparant les résultats obtenus par cette méthode avec les résultats estimés par l'heuristique de formation de cellules (HFC).

La comparaison plus pertinente à réaliser est celle du coût total obtenu par les deux méthodes. En réalité la vraie différence se trouve dans les différents coûts d'utilisation ou d'exploitation des machines, parce que les autres coûts, Investissement, main d'œuvre, embauche et licenciement, sont les mêmes pour les deux méthodes.

Le tableau 7.28 présente les différences de coûts d'utilisation des machines entre celui calculé par l'heuristique de formation de cellules et celui obtenu par la simulation.

Tableau 7.28

Comparaison des coûts d'utilisation de machines
de l'heuristique et la simulation.

		Coût d'utilisation des machines		Différence
		Heuristique	Simulation	
Scénario	1	40220	40519	0,74 %
Scénario	2	40130	39175	-2,38 %
Scénario	3	40090	39150	-2,34 %
Scénario	4	40080	39145	-2,33 %
Scénario	5	40080	39113	-2,41 %
		Moyenne		-1,75 %
		Écart-type		1,39 %

La différence des coûts est minime, mais pour accepter la validité du modèle de simulation on réalise une analyse plus détaillée de ces différences, on compare donc cette fois la valeur de l'utilisation de chaque type de machine estimée par les deux méthodes.

Tableau 7.29

Comparaison de l'utilisation de machines estimée par
l'heuristique et la simulation.

Machine	Sc. 2	Scénario 3			Scénario 4			Sc. 5	Différence	Écart- type	
	...	HFC	Sim.	Diff.	HFC	Sim.	Diff.	...	Moyenne		
1	...	0,252	0,246	-2,44%	0,315	0,307	-2,38%	...	-1,81%	1,50%	
2	...	0,173	0,168	-2,59%	0,201	0,196	-2,50%	...	-2,03%	0,51%	
3	...	0,150	0,149	-0,62%	0,150	0,147	-1,75%	...	-1,43%	0,78%	
4	...	0,130	0,127	-2,31%	0,130	0,129	-1,15%	...	-1,06%	1,74%	
5	...	0,127	0,127	-0,11%	0,127	0,125	-1,16%	...	-0,95%	1,31%	
6	...	0,072	0,070	-3,87%	0,072	0,070	-3,87%	...	-2,98%	1,96%	
7	...	0,073	0,071	-2,47%	0,073	0,071	-2,47%	...	-3,23%	1,38%	
8	...	0,175	0,170	-2,82%	0,176	0,171	-2,64%	...	-0,37%	5,62%	
9	...	0,145	0,145	-0,21%	0,145	0,148	1,86%	...	0,76%	2,25%	
...		Moyenne	-1,74%			-1,61%			...	-1,31%	
Écart-type									1,25%		

Le tableau 7.29 présente cette comparaison pour les scénarios 3 et 4. Dans presque tous les cas, l'utilisation de machines dans la simulation est inférieure à celle déterminée par l'heuristique. Rappelons que l'heuristique n'a pas considéré l'événement aléatoire d'arrivée et de durée des pannes de façon dynamique, mais elle fait une estimation de l'impact des pannes en fixant un pourcentage de disponibilité de machines qui a été calculé avec la relation 4.1.

En observant la différence moyenne de tous les scénarios, on peut conclure que cette différence est très petite et donc pas significative pour questionner la validité du modèle de simulation.

7.6 Phase IV : Sélection du meilleur scénario

7.6.1 Données d'entrée, pondération de critères, sous-critères et alternatives

L'analyse multicritère AHP nous permet de faire la sélection de la meilleure configuration ou scénario du SMC parmi les 5 scénarios générés dans les phases antérieures de l'approche.

L'information générée par la simulation (tableau 7.27) nous permet de définir la pondération des critères, des sous-critères et des alternatives par rapport aux treize sous-critères employés pour l'analyse hiérarchique de procédés, laquelle est réalisée de façon directe aux valeurs générées par la simulation. Cette pondération des critères, sous-critères et alternatives, ainsi que la synthèse des pondérations et l'analyse de sensibilité pour le cas exemplaire, ont déjà été présentées dans le Chapitre 6.

La figure 7.7 présente la structure hiérarchique du modèle de sélection de scénarios utilisé dans cette approche.

7.6.2 Pondération des alternatives

La pondération des alternatives, par rapport à chaque critère et sous critère, est faite par introduction directe de données quantitatives générées par la simulation (tableau 7.27).

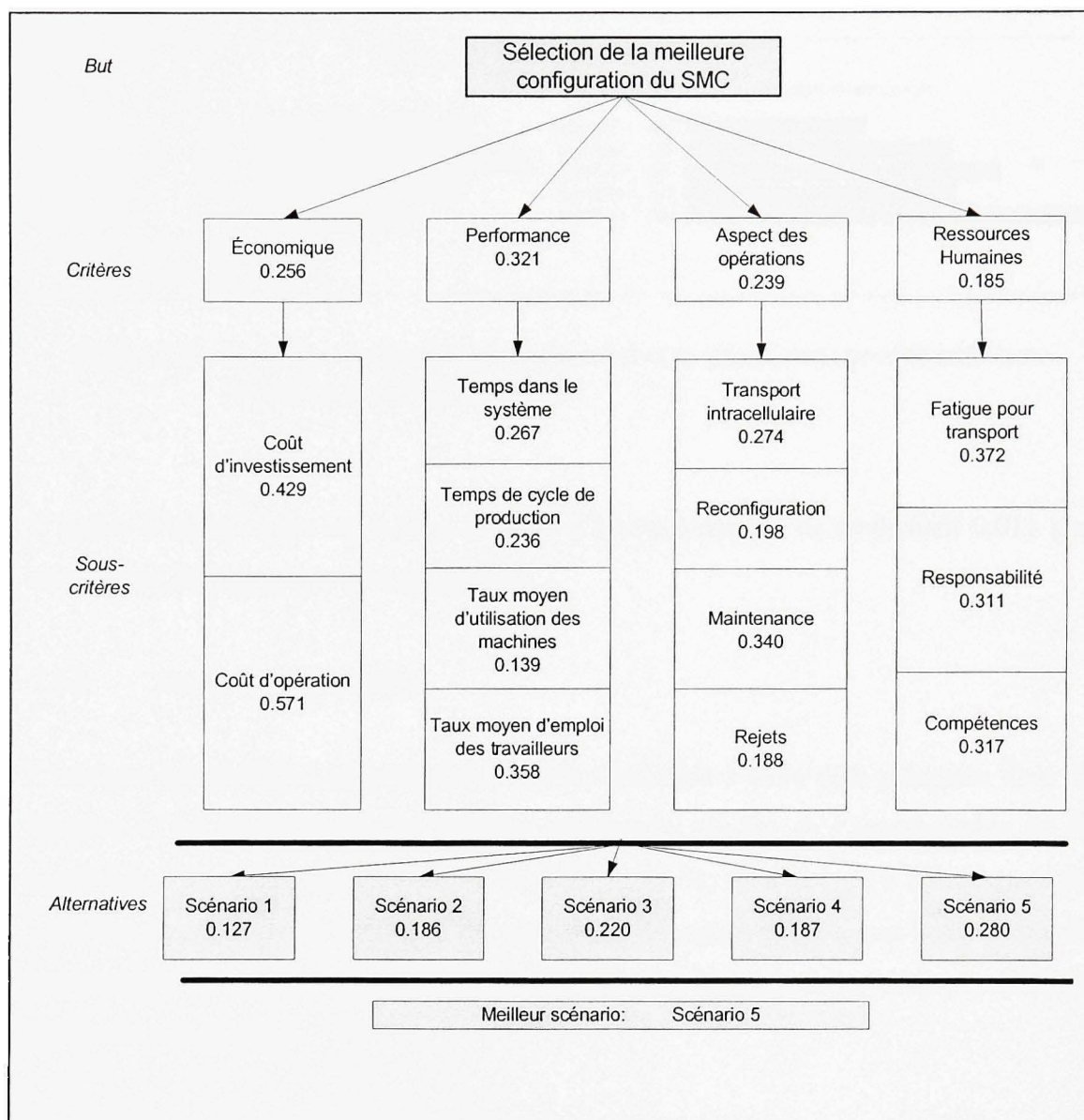


Figure 7.7 Hiérarchie du modèle de sélection de scénarios

La figure 7.8 montre la synthèse des pondérations des critères et alternatives. La classification des scénarios par ordre d'importance est la suivante: scénario 5, 3, 4, 2 et 1.

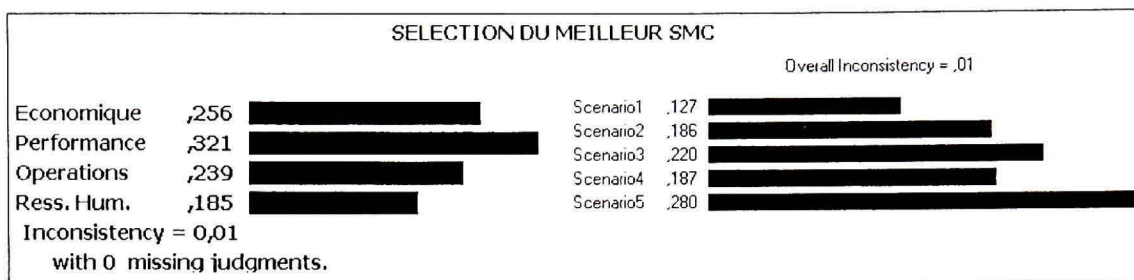


Figure 7.8 Synthèse des pondérations de critères et alternatives pour la sélection du meilleur scénario du SMC

L'indice d'incohérence est 0,01 et le ratio d'incohérence est de seulement 0,011 par conséquent les jugements sont acceptables.

7.6.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est réalisée de façon semblable à celle déjà présentée dans le chapitre 6. La figure 6.5 de ce chapitre présente le résultat de l'augmentation de la pondération du critère économique de 25,6 % à 77,5 %, selon lequel il n'existe pas de variation dans l'ordre de sélection des scénarios. On peut conclure que la sélection du meilleur scénario, pour notre exemple, est peu sensible à une variation de la pondération du facteur économique.

Afin de couvrir une marge plus ample des possibles variations dans la pondération de critères on a réalisé la variation de la pondération des critères par rapport à une augmentation et diminution petite ($\pm 15\%$), moyenne ($\pm 32,5\%$) et grande ($\pm 40\%$). Par exemple pour le critère économique (25,6 %) une augmentation petite sera calculé de la manière suivante : $25,6\% + 0,15 \times 25,6\% = 29,4\%$. Le tableau 7.30 montre le résultat de ces variations.

Selon cette analyse, on décide que le meilleur scénario est le scénario 5. Le fait d'avoir moins de cellules et plus de produits à traiter par cellule amène à une meilleure utilisation de ressources du point de vue économique et de la performance.

Tableau 7.30

Analyse de sensibilité
Résultat des variations de la pondération des critères.

Critère	Variation		Classification
	Augmentation à	Diminution à	
Économique 25,6 %	29,4 %		5 3 4 2 1
	33,9 %		5 3 4 2 1
	35,8 %		5 3 4 2 1
		21,8 %	5 3 4 2 1
		17,3 %	5 3 2 4 1
		15,4 %	5 3 2 4 1
Performance 32,1 %	36,9 %		5 3 4 2 1
	42,5 %		5 3 4 2 1
	44,9 %		5 3 4 2 1
		27,3 %	5 3 4 2 1
		21,7 %	5 3 4 2 1
		19,3 %	5 3 4 2 1
Opérations 23,9 %	27,5 %		5 3 2 4 1
	31,7 %		5 3 2 4 1
	33,5 %		5 3 2 4 1
		20,3 %	5 3 4 2 1
		16,1 %	5 3 4 2 1
		14,3 %	5 4 3 2 1
Ressources Humaines 18,5 %	21,3 %		5 3 4 2 1
	24,5 %		5 3 4 2 1
	25,9 %		5 3 4 2 1
		15,7 %	5 3 4 2 1
		12,5 %	5 3 4 2 1
		11,1 %	5 3 4 2 1

7.7 Conclusion

En utilisant la méthodologie en 4 phases proposée dans ce mémoire on a réalisé la modélisation d'un système manufacturier cellulaire (SMC) de l'industrie de la confection. Le cas exemple a utilisé dans la première phase l'analyse multicritère pour la présélection des machines. Dans la deuxième phase on a employé l'heuristique de formation de cellules (HFC), laquelle nous a permis de réaliser la formation des cellules pour les deux saisons en considérant deux types de processeurs, les machines et les travailleurs. Cette formation de cellules a été réalisée en visant 5 scénarios. La troisième phase a consisté en la simulation par événements discrets de notre système modélisé dans chaque scénario. La quatrième phase a consisté en la sélection du meilleur scénario, pour cela on a utilisé encore l'analyse multicritère. En général l'approche est assez claire et facile d'appliquer et le temps pour chacune des phases est assez court. La seule difficulté se trouve dans le traitement de la grande quantité d'information obtenue à partir de l'heuristique et la simulation. La préparation de l'information pour chacune des phases suivantes demande beaucoup de temps de la part du concepteur qui utilisera l'approche. Il faudrait éliminer cette difficulté afin de que l'approche soit applicable pour des problèmes plus grands.

CONCLUSION

L'approche développée dans ce mémoire a été réalisée pour la conception d'un SMC dans l'industrie de la confection de vêtements, laquelle possède des caractéristiques différentes des autres industries et pour cette raison il fallait développer une approche spécifique pour sa problématique particulière. De cette façon on a présenté une méthodologie composée de 4 phases : présélection de machines, formation de cellules, simulation et sélection du meilleur scénario. L'approche, dans chacune de ces phases, a considéré la demande saisonnière des produits, l'importance relative du coût de la ressource travailleur, la réalisation d'opérations d'assemblage dans les cellules, ainsi que la réduction globale des temps de mise en course. L'approche permet de réaliser la conception d'un système manufacturier cellulaire SMC multi saison (multi périodes), avec des cellules d'assemblage et l'assignation des opérations à deux types de processeurs : machines et travailleurs.

L'étape de présélection des machines a permis la réduction du nombre des machines candidates en éliminant les machines moins adéquates du point de vue des critères choisis dans le modèle de AHP. Cette étape a facilité le processus de formation de cellules en réduisant le nombre des variables que l'heuristique devait traiter dans le processus de formation de cellules. Même si l'heuristique est capable de résoudre des problèmes de formation plus grands que celui de l'exemple traité, la présélection est spécialement importante pour des problèmes de conception plus larges, où l'heuristique devra traiter avec un nombre plus grand de variables. L'heuristique considère des variables déterministes et elle donne des solutions faisables proches du résultat optimal, mais afin d'évaluer le SMC conçu par l'heuristique dans des conditions semblables à celles de la réalité, on a réalisé la simulation des scénarios de SMC en considérant des variables stochastiques telles que l'arrivée des commandes, les temps d'opération, les rejets et l'arrivée et la durée des pannes. Cette simulation nous a permis d'obtenir des mesures de performance du SMC qui ont été utilisées dans l'étape de sélection des

scénarios avec la méthode de AHP. À partir de ces mesures de performance, on remarque que le phénomène de pannes affecte de façon considérable le fonctionnement du SMC parce que chaque cellule doit arrêter à chaque occurrence de pannes. De plus, il existe un grand nombre de déplacements de travailleurs qui mérite d'être un sujet pour une recherche approfondie sur la fatigue et l'ergonomie. Le modèle de simulation conçu spécialement pour notre SMC peut traiter des systèmes plus larges avec plus de cellules, produits, sous-ensembles, machines, travailleurs et opérations. Il faudrait simplement ajouter plus de nœuds pour représenter les machines et travailleurs dans le sous-réseau.

Dans l'étape de sélection de scénarios, on a utilisé l'AHP en donnant plus d'importance au critère Performance qu'au critère Économique parce qu'un des avantages du SMC dont on voulait profiter est la rapidité de réponse à la demande, donc le critère Économique était moins important. La méthode AHP s'est avérée une méthode simple dans le traitement de plusieurs facteurs quantitatifs et qualitatifs afin de réaliser la sélection définitive du meilleur scénario du SMC de notre exemple.

Pour son développement, la recherche réalisée par l'auteur de ce mémoire s'est centrée principalement à :

- Définir clairement la problématique de l'industrie de la confection de vêtements pour les fins de notre approche.
- Développer une technique appropriée (soit analytique ou empirique) pour réaliser la formation de cellules et qui est capable de traiter la problématique imposée au début de la recherche, c'est-à-dire, l'assemblage, la multi périodicité, et l'assignation et sélection travailleurs et machines.
- Développer un modèle de simulation par événements discrets capable de simuler les scénarios générés par l'heuristique.
- Développer une méthodologie appropriée pour la sélection des machines et des scénarios qui considère l'existence d'un grand nombre de facteurs quantitatifs et qualitatifs.

L'avantage principal de cette approche est qu'elle considère de manière simultanée les aspects qui couvrent la multi-périodicité, l'assemblage et l'assignation des machines et travailleurs dans la conception du système manufacturier cellulaire.

Les outils employés par l'approche tels que les logiciels ExpertChoice, AweSim et le langage de programmation Matlab, sont connus du milieu de l'ingénierie, donc leur utilisation ne présente pas d'obstacles à ce niveau.

La conception du SMC implique l'existence d'une grande quantité d'information. Cet inconvénient n'est pas exclusif à l'approche développée dans ce mémoire, mais elle s'avère toujours un obstacle dans la conception du SMC.

L'approche demande que le concepteur ait une bonne connaissance de l'industrie de la confection ou qu'il compte avec l'assistance d'experts afin de réaliser la pondération et la valorisation des critères à des fins de sélection (des machines et des scénarios).

Les résultats de l'approche sont satisfaisants du point de vue de sa capacité pour la conception du SMC. Toutefois, elle mériterait quelques améliorations importantes avant son utilisation extensive (voir recommandations), parce que le temps de résolution de chaque modèle de chaque phase est acceptable, par contre le temps employé dans la préparation des données avant leur utilisation dans chaque modèle est considérable.

Sur l'implantation dans un contexte réel de travail en usine, il survient plusieurs inconvénients ou difficultés, principalement par rapport à la résistance dans l'implantation de la part des travailleurs parce que ce système implique que les travailleurs doivent gérer la production de chaque cellule, de travailler debout, d'être en déplacement continu, de réaliser des tâches additionnelles de contrôle de qualité, d'être

payé par production de l'équipe, etc. Enfin le changement implique pour les travailleurs des responsabilités majeures.

Mais les avantages plus importants de son implantation seront ceux que l'on attribue généralement aux SMC, tels que l'amélioration du taux de production, la réduction de temps dans le système, la réduction de temps de mise en course, la réduction de la taille des lots, la réduction des encours, l'augmentation de la productivité et de la qualité (section 1.3). De plus l'approche a pris en compte les principes de SMFC (section 1.4) afin de réduire les temps de terminaison, et de cellules virtuelles sur la reconfiguration de cellules (voir les sections 1.5, 2.31 et 4.3) (et qui plus est la reconfiguration est physique) afin que le système soit plus flexible dans le traitement des différents types de produits.

Finalement, l'approche présentée dans ce mémoire a été pensée pour être implantée dans l'industrie de la confection de vêtements de moyenne et haute de gamme comme celui de la province de Québec.

RECOMMANDATIONS

L'approche qu'on présente dans ce mémoire a été élaborée à la mesure de la problématique de l'industrie de la confection de vêtements. Afin de l'améliorer on peut :

Systematiser le transfert d'information obtenue dans chaque phase au moyen de l'utilisation d'un programme maître qui facilite le transfert d'information entre les différentes étapes de l'approche. C'est à dire un programme qui capture les résultats d'une étape et prépare les données pour la suivante.

Développer pour le modèle de simulation des sous routines pour définir d'autres politiques d'assignation des opérations aux travailleurs. Les sous routines peuvent être faites dans un langage de programmation tel que Visual C ou Visual Basic.

Étant donné que la simulation indique que les transports ou déplacements de travailleurs sont assez importants on devrait considérer cet aspect dans la conception de la cellule quant à l'emplacement des machines et l'assignation d'opérations aux travailleurs et machines.

À partir des résultats de la simulation, on voit que les pannes ont un impact négatif sur le temps dans le système et l'utilisation des machines et travailleurs. Donc, on devrait considérer un système différent de manutention. Par exemple en plus de faire la prévention et réparation des machines, on devrait considérer la possibilité d'avoir un groupe des machines de réserve, de telle façon à remplacer les machines en panne sans perte de temps à cause de l'arrêt, sauf le temps strictement nécessaire au transport de la machine de réserve et sa mise en course.

ANNEXE I

DONNÉES D'ENTRÉE DES PROBLÈMES

PROBLÈME A1

****Paramètres de conception****

NMINCell=1; Nombre minimal de cellules dans une saison

NXMach=100; Nombre maximal de machines par cellule

NXTrav=100; Nombre maximal de travailleurs par cellule

NXProd=100; Nombre maximal de produits par cellule

MINCSS=0.0; Coefficient de similarité minimal

NS=2;

NP=[2 2];

NO=[3 3; 3 3];

NM=3;

NT=3;

D=[320000 200000;300000 250000];

TDS=[69120 69120];

CFM=[1000 980 960];

CVM=[1300 1274 1248; 1300 1274 1248];

UTR=[0.997 0.992 0.990];

MUT=[0.9 0.9 0.9];

CMO= [13250 13000 12750;13250 13000 12750];

CE=[400 380 360];

CL=[530 510 490];

TUT=[0.95 0.95 0.95];

NOA=[2 2;2 2]; %# OPERATIONS DANS LE SE PRINCIPAL NOA(s,i)

NSE=[1 1;1 1]; %# DE SOUS ENSEMBLES NSE(s,i)

NOSE(:,1)=[1; 1]; %# OPERATIONS DANS LE SE SECONDAIRE NOSE(i,NSE,s)

NOSE(:,2)=[1; 1];

PE(:,1)=[2; 2]; %POINT DE ASSEMBLAGE PE(i,NSE,s)

PE(:,2)=[1; 2]; %

%T(s,i,j,n,t)

TEMPS=[0.126	0.140	0.154;	0.140	0.155	0.171;	0.149	0.166	0.183;	0.185	0.206
0.227;	0.190	0.211	0.233;	0.191	0.212	0.233;	0.126	0.140	0.154;	0.147
0.164	0.180;	0.153	0.170	0.187;	0.000	0.000	0.000;	0.179	0.199	0.219;
0.182	0.202	0.222;	0.222	0.247	0.272;	0.244	0.271	0.299;	0.269	0.299
0.329;	0.000	0.000	0.000;	0.276	0.307	0.338;	0.276	0.307	0.338;	0.192
0.213	0.234;	0.000	0.000	0.000;	0.212	0.236	0.259;	0.135	0.150	0.165;
0.000	0.000	0.000;	0.166	0.184	0.203;	0.000	0.000	0.000;	0.000	0.000
0.000;	0.103	...	0.141];							

%R(s,i,j)

REJET= [0.007 0.006 0.003 0.005 0.005 0.003 0.003 0.005 0.002 0.001 0.001
0.007];

PROBLÈME A2

```

D=[195000 255000;185000 110000];
NS=2;
NP=[2 2];
NO=[3 3; 3 3];
NM=3;
NT=3;
TDS=[69120 69120];
CFM=[1000    980    960];
CVM=[1300    1274    1248;1300    1274    1248];
UTR=[0.997    0.992    0.990];
MUT=[0.9 0.9 0.9];
CMO=[13250 13000 12750;13250 13000 12750];
CE=[400 380 360];
CL=[530 510 490];
TUT=[0.95 0.95 0.95];

NOA=[2 1;1 2];    %% DE OPERATIONS DANS LE SE PRINCIPAL    NOA(s,i)
NSE=[1 1;1 1];    %% DE SE                                NSE(s,i)
NOSE(:,1)=1; 2]; %%OPERATIONS DANS LE SE SEC    NOSE(i,NSE,s)
NOSE(:,2)=2; 1];
PE(:,1)=2;1]; %%POINT DE ASSEMBLAGE    PE(i,NSE,s)
PE(:,2)=1;2]; %

%T(s,i,j,n,t)
TEMPS=[0.000 0.000 0.000;0.000 0.000 0.000;0.094 0.104 0.114;0.133 0.148
        0.163;0.145 0.161 0.177;0.153 0.170 0.187;0.134 0.149 0.164;
        0.000 0.000 0.000;0.152 0.169 0.186;0.230 0.255 0.281;0.000 0.000
        0.000;0.254 0.282 0.310;0.225 0.250 0.275;0.232 0.258 0.284;
        0.000 0.000 0.000;0.060 0.067 0.074;0.076 0.085 0.093;0.101 0.113
        0.124;0.208 0.231 0.254;0.208 0.231 0.254;0.223 0.248 0.273;
        0.181 0.201 0.221;0.000 0.000 0.000;0.221 0.246 0.271;0.000 0.000
        0.000;0.000 ... 0.273];

%R(s,i,j)
REJET=[0.000 0.005 0.002 0.003 0.002 0.001 0.007 0.003 0.002 0.001 0.004 0.002];

```


PROBLÈME B

```

D=[100000 90000 130000 110000 90000;95000 105000 65000 80000 70000];
NS=2;
NP=[5 5];
NO=[5 5 5 5 5;5 5 5 5 5];
NM=5;
NT=3;
TDS=[69120 69120];
CFM=[1000 980 960 940 920];
CVM=[1300 1274 1248 1200 1100;1300 1274 1248 1200 1100];
UTR=[0.997 0.996 0.995 0.994 0.993];
MUT=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9];
CMO=[13250 13000 12750;13250 13000 12750];
CE=[400 380 360];
CL=[530 510 490];
TUT=[0.95 0.95 0.95];

```

```

NOA=[4 3 3 4 3;2 3 2 4 4];    %# DE OPERATIONS DANS LE SE PRINCIPAL    NOA(s,i)
NSE=[1 1 2 1 1;1 1 1 1 1];    %# DE SE                                NSE(s,i)
NOSE(:,1)=[1 0; 2 0; 1 1; 1 0; 2 0]; %#OPERATIONS DANS LE SE SEC    NOSE(i,NSE,s)
NOSE(:,2)=[3 0; 2 0; 3 0; 1 0; 1 0];
PE(:,1)=[2 0; 2 0; 2 3; 4 0; 3 0];    %POINT DE ASSEMBLAGE        PE(i,NSE,s)
PE(:,2)=[2 0; 3 0; 2 0; 2 0; 4 0];    %

```

```

%T(s,i,j,n,t)
TEMPS= [0      0      0; 0.175 0.194 0.213; 0.199 0.221 0.243; 0.224 0.249 0.274;
0.232 0.258 0.283; 0 0      0; 0.253 0.281 0.309; 0.256 0.285 0.313; 0.257 0.285
0.314; 0.278 0.309 0.34; 0.203 0.225 0.248; 0.228 0.253 0.278; 0.248
0.275 0.303; 0.254 0.283 0.311; 0 0      0; 0.143 0.159 0.175; 0.157 0.174
0.192; 0.182 0.203 0.223; 0.202 0.224 0.246; 0.215 0.239 0.263; 0.206
0.229 0.252; 0.216 0.24 0.264; 0.222 0.246 0.271; 0 0      0; 0.232 0.257
0.283; 0 0      0; 0      0; 0      0      0; 0.212 0.235 0.259; 0 0      0; 0.178
0.198 0.218; 0.189 0.21 0.231; 0.204 0.227 0.249; 0.22 0.244 0.268;
0.243 0.27 0.297; 0 0      0; 0      0      0; 0.193 0.214 0.236; 0 0      0; 0.213 0.236
0.26; 0.207 0.23 0.253; 0.215 0.239 0.263; 0.222 0.246 0.271; 0.224
0.249 0.274; 0.226 0.251 0.276; 0 0      0; 0.089 0.099 0.109; 0.089 0.099
0.109; 0.114 0.127 0.139; 0 0      0; 0      0      0; 0      0.236 0.262
0.288; 0.247 0.274 0.302; 0.257 0.285 0.314; 0 0      0; 0.182 0.202 0.222;
0.198 0.22 0.242; 0.21 0.234 0.257; 0.223 0.248 0.273; 0 0      0; 0.092 0.102
0.112; 0.099 0.11 0.121; 0.1 0.111 0.122; 0.115 0.128 0.141; 0.115
0.128 0.141; 0 0      0; 0.137 0.153 0.168; 0.151 0.168 0.184; 0.156 0.174
0.191; 0.126 0.14 ... 0];

```

```

%R(s,i,j)
REJET= [0.003 0.003 0.005 0.006 0.004 0.001 0.006 0.002 0.005 0.003 0.003 0.004 0.002 0.003 0.004
0.005 0.003 0.006 0.001 0.008 ... 0.004];

```

PROBLÈME C

```

D=[25000 65000 48000 12000 45000 35000 92000 45000 27000 52000;
  56000 13000 25000 63000 15000 42000 48000 56000 33000 85000;
  15000 36000 45000 45000 15000 48000 82000 12000 45000 65000;
  45000 15000 32000 12000 16000 45000 75000 25000 35000 95000];
NS=4;
NP=[10 10 10 10];
NO=[10 10 10 10 10 10 10 10 10;10 10 10 10 10 10 10 10 10;10 10 10 10 10 10 10 10 10;10 10
10 10 10 10 10 10 10];
NM=10;
NT=3;
TDS=[34560 34560 34560 34560];
CFM=[500 495 490 485 480 475 470 465 460 455];
CVM=[650 645 640 635 630 625 620 615 610 605; 650 645 640 635 630 625 620 615 610 605; 650 645
640 635 630 625 620 615 610 605; 650 645 640 635 630 625 620 615 610 605];
UTR=[0.997 0.996 0.995 0.994 0.993 0.992 0.991 0.990 0.989 0.988];
MUT=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9];
CMO=[6625 6500 6300;6625 6500 6300;6625 6500 6300;6625 6500 6300];
CE=[250 230 210];
CL=[350 330 310];
TUT=[0.95 0.95 0.95];

NOA=[8 7 9 6 8 7 5 9 7 6; 9 8 6 7 4 9 8 8 9 8; 8 9 7 4 5 6 8 7 7 9; 8 8 9 7 6 6 5 5 6 6];
NSE=[1 2 1 2 1 2 2 1 2 2; 1 2 2 2 2 1 1 1 1 2; 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1; 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2];
NOSE(:,1)=[2 0;1 2;1 0;2 2;2 0;1 2;3 2;1 0;2 1;2 2];
NOSE(:,2)=[1 0;1 1;2 2;2 1;3 3;1 0;2 0;2 0;1 0;1 1];
NOSE(:,3)=[1 1;1 0;2 1;3 3;2 3;2 2;2 0;3 0;3 0;1 0];
NOSE(:,4)=[2 0;2 0;1 0;2 1;2 2;2 2;2 3;3 2;2 2;3 1];
PE(:,1)=[6 0;3 6;4 0;4 6;6 0;5 7;3 5;8 0;4 6;4 5];
PE(:,2)=[8 0;6 7;4 5;3 7;2 3;9 0;7 0;6 0;5 0;4 6];
PE(:,3)=[6 7;8 0;5 6;2 3;4 5;4 5;4 0;6 0;5 0;3 0];
PE(:,4)=[4 0;5 0;8 0;4 6;4 5;4 6;2 4;2 5;3 6;5 5];

%T(s,i,j,n,t)
TEMPS ... ~12000 temps d'opération

%R(s,i,j)
REJET ... ~400 taux de rejet;

```

PROBLÈME D

D=[170000 90000 170000 90000;170000 95000 170000 95000];

NS=2;

NP=[4 4];

NO=[10 10 10 10;10 10 10 10];

NM=3;

NT=3;

TDS=[69120 69120];

CFM=[1100 960 940];

CVM=[1400 1254 1100;1400 1254 1100];

UTR=[0.997 0.996 0.996];

MUT=[0.9 0.9 0.9];

CMO=[13250 12750 12500;13250 12750 12500];

CE=[400 380 360];

CL=[530 510 490];

TUT=[0.95 0.95 0.95];

NOA=[6 7 5 4;4 5 6 8];

NSE=[1 1 2 3; 2 2 2 1];

NOSE(:,1)=[4 0 0; 3 0 0; 2 3 0; 2 2 2];

NOSE(:,2)=[3 3 0; 3 2 0; 3 1 0; 2 0 0];

PE(:,1)=[4 0 0; 4 0 0; 3 5 0; 2 3 4];

PE(:,2)=[3 4 0; 2 4 0; 3 5 0; 3 0 0];

%T(s,i,j,n,t)

TEMPS=[0.079 0.081 0.083; 0.083 0.084 0.086; 0.101 0.104 0.106; 0.143 0.146
0.149;0.155 0.159 0.162;0.163 0.166 0.169;0.000 0.000 0;0.000 0.000
0;0.182 0.186 0.19;0.047 0.048 0.049;0.051 0.052 0.053;0.077 0.079
0.08;0.124 0.127 0.13;0.143 0.146 0.149;0.145 0.148 0.151;0.177
0.181 0.185;0.197 0.201 0.205;0.218 0.222 0.227;0.074 0.075 0.077;
0.077 0.079 0.08;0.090 .. 0.149];

%R(s,i,j)

REJET= [0.004 0.004 0.003 0.007 0.004 0.005 0.002 0.005 0.004 0.000 0.008 0.002 0.004 0.005 0.001
0.002 0.004 0.006 0.003 0.003 0.006 0.003 0.000 0.001 0.003 0.001 0.002 0.004 0.005 0.002 0.004 0.008
0.003 0.005 0.003 0.004 0.004 0... 0.005];

ANNEXE II

RÉSULTATS DE LA HFC POUR LES PROBLÈMES EXEMPLES

PROBLÈME A1

SOLUTION FINALE

Machines:

n1	n2	n3
4	2	2

Travailleurs/saison:

t1	t2	t3
2	0	4
2	0	2

TEMPS_DE_PROCES = 8.1250

TCY = 1.0e+004 *

5.9737	5.6093
5.8238	4.8743

RÉSULTAT DE LA FORMATION DE CELLU

Coût total d'exploitation des machines et travailleurs:

AC = 1.511 9e+005

Coût total d'exploitation des machines:

MC = 1.847 0e+004

Coût total d'exploitation des travailleurs:

TRC = 132 720

SAISON CELLULE

1	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.7701
2	0	0
3	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	1.0000	0.8642
2	0	0
3.0000	2.0000	0.7230

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
1	1	1	3
1	2	1	1
1	3	1	3

SAISON CELLULE

1	2
---	---

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	1.0000	0.7934
2.0000	2.0000	0.7284
3	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ
1.0000	1.0000
2	0
3.0000	2.0000

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
2	1	2	3
2	2	1	3
2	3	2	1

SAISON CELLULE

2 1

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE QUANTITÉ OCUPATION

1.0000 2.0000 0.7166

2 0 0

3.0000 1.0000 0.4561

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR QUANTITÉ
OCUPATION

1.0000 2.0000 0.9447

2 0 0

3 0 0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

1 1 1 1

1 2 1 1

1 3 3 1

Nombre de machines et utilisation par cellule

S	C	M	NM	UTM
1.0000	1.0000	1.0000	3.0000	0.7701
1.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.7934
1.0000	2.0000	2.0000	2.0000	0.7284
2.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.7166
2.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.4561
2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.6209
2.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.5230

Nombre de travailleurs et utilisation par cellule

S	C	T	NT	UTT
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.8642
1.0000	1.0000	3.0000	2.0000	0.7230
1.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.8115
1.0000	2.0000	3.0000	2.0000	0.7193
2.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.9447
2.0000	2.0000	3.0000	2.0000	0.8824

SAISON CELLULE

2 2

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE QUANTITÉ OCUPATION

1.0000 2.0000 0.6209

2 0 0

3.0000 1.0000 0.5230

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR QUANTITÉ
OCUPATION

1 0 0

2 0 0

3.0000 2.0000 0.8824

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

2 1 1 3

2 2 3 3

2 3 1 3

PROBLÈME A2**SOLUTION FINALE**

Machines:

n1	n2	n3
5	0	1

Travailleurs/saison:

t1	t2	t3
2	0	3
2	0	1

TEMPS_DE_PROCES = 9.7340

TCY = 1.0e+004 *

3.2302	5.9003
6.7669	0

RÉSULTAT DE LA FORMATION DE CELLULES

Coût total d'exploitation des machines et travailleurs:

AC = 1.2010e+005

Coût total d'exploitation des machines:

MC = 1.3240e+004

Coût total d'exploitation des travailleurs:

TRC = 106860

SAISON CELLULE

1	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	2.0000	0.4654
2	0	0
3.0000	1.0000	0.3265

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1	0	0
2	0	0
3.0000	2.0000	0.6287

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
1	1	3	3
1	2	1	3
1	3	1	3

SAISON CELLULE

1	2
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.6554
2	0	0
3	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	2.0000	0.8456
2	0	0
3.0000	1.0000	0.2749

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
2	1	1	1
2	2	1	1
2	3	1	3

SAISON CELLULE

2	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	2.0000	0.9095
2	0	0
3.0000	1.0000	0.5941

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	2.0000	0.9165
2	0	0
3.0000	1.0000	0.5800

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

1	1	1	1
1	2	1	1
1	3	3	3
2	1	1	3
2	2	1	1
2	3	3	1

Nombre de machines et utilisation par cellule

S	C	M	NM	UTM
1.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.4654
1.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.3265
1.0000	2.0000	1.0000	3.0000	0.6554
2.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.9095
2.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.5941

Nombre de travailleurs et utilisation par cellule

S	C	T	NT	UTT
1.0000	1.0000	3.0000	2.0000	0.6287
1.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.8456
1.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.2749
2.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.9165
2.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.5800

PROBLÈME B**SOLUTION FINALE**

Machines:

n1	n2	n3	n4	n5
9	3	2	1	0

Travailleurs/saison:

t1	t2	t3
3	3	3
3	3	0

TEMPS_DE_PROCES = 63.65

TCY = 1.0e+004 *

6.3153 6.8750

5.0757 6.0924

RÉSULTAT DE LA FORMATION DE CELLULES

Coût total d'exploitation des machines et travailleurs:

AC = 2.3202e+005

Coût total d'exploitation des machines:

MC = 3.1378e+004

Coût total d'exploitation des travailleurs:

TRC = 200640

SAISON CELLULE

1	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.4926
2.0000	2.0000	0.6812
3.0000	1.0000	0.4997
4	0	0
5	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1	0	0
2.0000	2.0000	0.8276
3.0000	2.0000	0.8423

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

1	1	2	3
1	2	2	2
1	3	1	3
1	4	1	2
1	5	1	3
3	1	3	2
3	2	2	3
3	3	2	3
3	4	1	2
3	5	1	2

SAISON CELLULE

1	2
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	5.0000	0.6163
2.0000	1.0000	0.1309
3.0000	1.0000	0.6149
4.0000	1.0000	0.2802
5	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.9168
2.0000	1.0000	0.4183
3.0000	1.0000	0.9386

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

2	1	4	1
2	2	1	1
2	3	3	1
2	4	1	1
2	5	2	2
4	1	1	3
4	2	1	1
4	3	1	1
4	4	3	3
4	5	1	1
5	1	1	3
5	2	1	2
5	3	1	3
5	4	1	1
5	5	1	1

SAISON CELLULE

2 1

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE QUANTITÉ OCUPATION

1.0000	5.0000	0.4764
2.0000	1.0000	0.2748
3	0	0
4	0	0
5	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR QUANTITÉ
OCUPATION

1.0000	3.0000	0.8856
2	0	0
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

1	1	1	1
1	2	1	1
1	3	1	1
1	4	1	1
1	5	1	1
2	1	1	1
2	2	1	1
2	3	1	1
2	4	2	1
2	5	1	1

SAISON CELLULE

2 2

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE QUANTITÉ OCUPATION

1.0000	4.0000	0.4825
2.0000	2.0000	0.4185
3	0	0
4	0	0
5	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR QUANTITÉ OCUPATION

1	0	0
2.0000	3.0000	0.9224
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

3	1	1	2
3	2	1	2
3	3	1	2
3	4	2	2
3	5	1	2
4	1	1	2
4	2	1	2
4	3	1	2
4	4	2	2
4	5	1	2
5	1	1	2
5	2	2	2
5	3	2	2
5	4	1	2
5	5	1	2

Nombre de machines et utilisation par cellule

S	C	M	NM	UTM	
1.0000	1.0000	1.0000	3.0000	0.4926	
1.0000	1.0000	2.0000	2.0000	0.6812	
1.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.4997	
1.0000	2.0000	1.0000	5.0000	0.6163	
1.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.1309	
1.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.6149	
1.0000	2.0000	4.0000	1.0000	0.2802	
2.0000	1.0000	1.0000	5.0000	0.4764	
2.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.2748	
2.0000	2.0000	1.0000	4.0000	0.4825	
2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	0.4185	

Nombre de travailleurs et utilisation par cellule

S	C	T	NT	UTT	
1.0000	1.0000	2.0000	2.0000	0.8276	
1.0000	1.0000	3.0000	2.0000	0.8423	
1.0000	2.0000	1.0000	3.0000	0.9168	
1.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.4183	
1.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.9386	
2.0000	1.0000	1.0000	3.0000	0.8856	
2.0000	2.0000	2.0000	3.0000	0.9224	

PROBLEME D**SOLUTION FINALE**

Machines:

n1	n2	n3
25	5	6

Travailleurs/saison:

t1	t2	t3
9	2	1
9	1	1

TEMPS_DE_PROCES = 107.2340

TCY = 1.0e+004 *

3.8272	3.3710	4.2323
3.7464	6.5015	0

RÉSULTAT DE LA FORMATION DE CELLULES

Coût total d'exploitation des machines et travailleurs:

AC = 3.7209e+005

Coût total d'exploitation des machines:

MC = 6.5115e+004

Coût total d'exploitation des travailleurs:

TRC = 306980

SAISON CELLULE

1	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
---------	----------	-----------

1.0000	9.0000	0.3147
2	0	0
3.0000	1.0000	0.4681

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
-------------	----------	-----------

1.0000	2.0000	0.7307
2.0000	2.0000	0.9196
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
------	-----	------	------

1	1	1	1
1	2	1	2
1	3	3	2
1	4	1	1
1	5	1	1
1	6	1	2
1	7	1	1
1	8	1	1
1	9	1	2
1	10	1	1

SAISON CELLULE

1	2
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
---------	----------	-----------

1.0000	6.0000	0.2254
2.0000	2.0000	0.3023
3.0000	5.0000	0.1730

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
-------------	----------	-----------

1.0000	3.0000	0.9407
2	0	0
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
------	-----	------	------

2	1	1	1
2	2	2	1
2	3	1	1
2	4	1	1
2	5	1	1
2	6	2	1
2	7	3	1
2	8	1	1
2	9	1	1
2	10	3	1
4	1	1	1
4	2	1	1
4	3	1	1
4	4	3	1
4	5	3	1
4	6	1	1
4	7	3	1
4	8	3	1
4	9	1	1
4	10	3	1

SAISON CELLULE

1	3
---	---

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
---------	----------	-----------

1.0000	10.0000	0.4323
2	0	0
3	0	0

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
-------------	----------	-----------

1.0000	4.0000	0.9276
2	0	0
3.0000	1.0000	0.6123

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV
------	-----	------	------

3	1	1	3
3	2	1	1
3	3	1	1
3	4	1	1
3	5	1	1
3	6	1	1
3	7	1	1
3	8	1	1
3	9	1	1
3	10	1	1

SAISON CELLULE

2	1
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
---------	----------	-----------

1.0000	6.0000	0.3806
2.0000	2.0000	0.2913
3.0000	2.0000	0.2908

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
-------------	----------	-----------

1.0000	4.0000	0.8620
2	0	0
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

1	1	1	1
1	2	1	1
1	3	2	1
1	4	1	1
1	5	1	1
1	6	1	1
1	7	3	1
1	8	3	1
1	9	1	1
1	10	2	1

SAISON CELLULE

2	2
---	---

SÉLECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
---------	----------	-----------

1.0000	9.0000	0.5255
2.0000	3.0000	0.2911
3.0000	3.0000	0.2290

SÉLECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
-------------	----------	-----------

1.0000	5.0000	0.9231
2.0000	1.0000	0.8626
3.0000	1.0000	0.8115

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD OPE MACH TRAV

2	1	1	1
2	2	1	1
2	3	1	1
2	4	3	1
2	5	2	1
2	6	2	1
2	7	1	1
2	8	1	1
2	9	1	1
2	10	2	1
3	1	1	1
3	2	1	1
3	3	1	2
3	4	1	2
3	5	2	3
3	6	1	1
3	7	1	1
3	8	1	1
3	9	1	3

3	10	1	1
4	1	3	1
4	2	1	1
4	3	1	1
4	4	1	1
4	5	1	1
4	6	1	1
4	7	2	1
4	8	3	1
4	9	1	1
4	10	3	1

Nombre de machines et utilisation par cellule

S	C	M	NM	UTM
1.0000	1.0000	1.0000	9.0000	0.3147
1.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.4681
1.0000	2.0000	1.0000	6.0000	0.2254
1.0000	2.0000	2.0000	2.0000	0.3023
1.0000	2.0000	3.0000	5.0000	0.1730
1.0000	3.0000	1.0000	10.0000	0.4323
2.0000	1.0000	1.0000	6.0000	0.3806
2.0000	1.0000	2.0000	2.0000	0.2913
2.0000	1.0000	3.0000	2.0000	0.2908
2.0000	2.0000	1.0000	9.0000	0.5255
2.0000	2.0000	2.0000	3.0000	0.2911
2.0000	2.0000	3.0000	3.0000	0.2290

Nombre de travailleurs et utilisation par cellule

S	C	T	NT	UTT
1.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.7307
1.0000	1.0000	2.0000	2.0000	0.9196
1.0000	2.0000	1.0000	3.0000	0.9407
1.0000	3.0000	1.0000	4.0000	0.9276
1.0000	3.0000	3.0000	1.0000	0.6123
2.0000	1.0000	1.0000	4.0000	0.8620
2.0000	2.0000	1.0000	5.0000	0.9231
2.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.8626
2.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.8115

ANNEXE III

DESCRIPTION DU MODÈLE DE SIMULATION

L'implantation du modèle de simulation a été réalisée en utilisant le logiciel de simulation AweSim. Dans ce qui suit, on présente sa description.

Fichier de contrôle :

Le fichier de contrôle administre le modèle de simulation. Dans ce fichier, on définit la durée de la simulation, le nombre de réplifications, l'assignation des variables et on indique la génération de rapports sur les statistiques générées dans l'expérience de simulation.

Réseau Principal : Lecture de données

L'information d'entrée du modèle est utilisée en instances différentes.

L'information primaire importante pour le modèle comprend les paramètres de la simulation. Cette information est introduite dans le fichier de contrôle par le concepteur et elle comprend :

- La durée de la simulation
- Le nombre de réplifications
- La spécification de variables selon le tableau 5.1.

Les données générées par l'heuristique constituent un autre groupe d'information. Elles sont introduites dans le modèle au moyen d'archives « *.dat » lesquelles sont lues dans le réseau principal.

Une des entités revient au nœud de lecture de durée de saison en un temps égal à la durée de la saison. L'autre entité entre à une des branches correspondantes à chaque saison. L'entité déclenche la lecture de données des archives *SIA.DAT*, *SIB.DAT* et *SIB.DAT* qui contient l'information décrite dans le tableau 5.1 et assigne cette information aux variables décrites dans le même tableau.

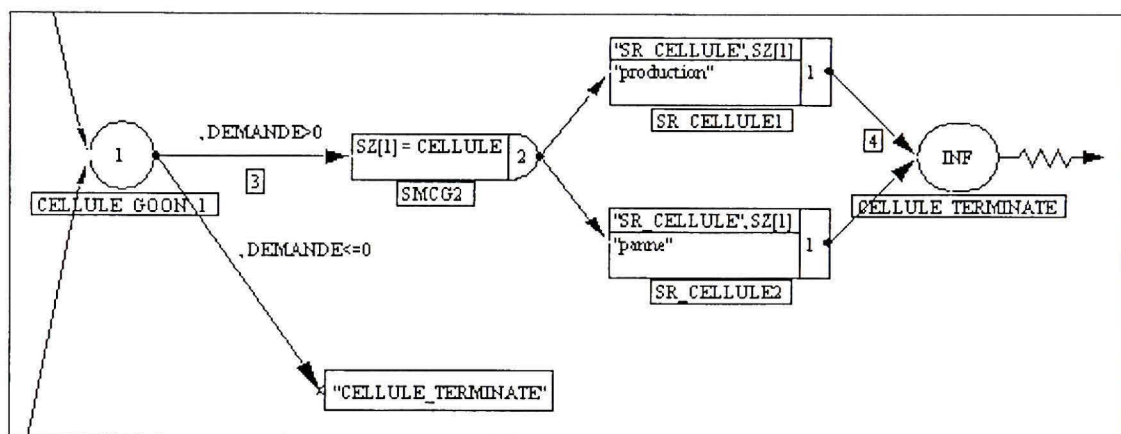


Figure A.3 Introduction des entités au sous-réseau

Après la lecture de données, et si la demande du produit est supérieure à 0, on assigne le nom de la cellule à la variable $SZ[1]$, qui est à la fois l'instance du sous réseau. L'entité et son clone entrent dans le sous-réseau, et déclenchent la production et les pannes respectivement.

Sous-réseau cellule: Génération de commandes

Le sous-réseau consiste en l'étape opérationnelle ou de production. Il est unique pour représenter toutes les cellules, mais en instances différentes.

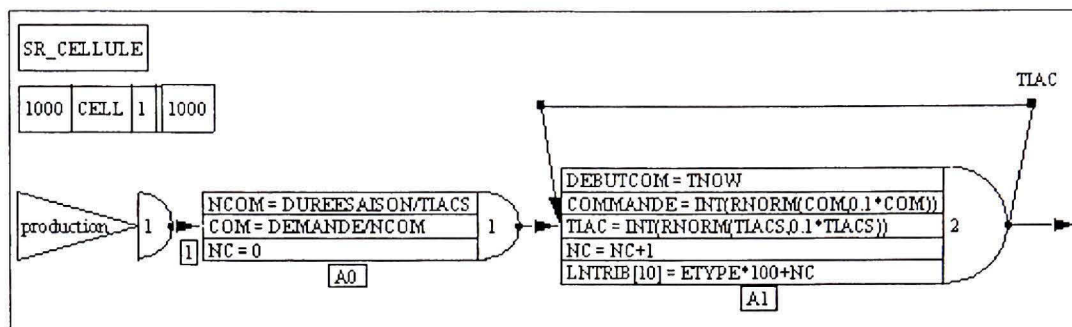


Figure A.4 Génération de commandes

L'entité entre au sous réseau par le nœud ENTER (*production*). Dans le nœud ASSIGN on calcule le nombre moyen de commandes NCOM et la taille moyenne des commandes COM. Le deuxième nœud ASSIGN sert à générer les commandes. Initialement, on enregistre l'arrivée de la commande dans la variable DEBUTCOM et on détermine la taille de la COMMANDE et le temps d'inter-arrivé des commandes TIAC comme une distribution de probabilité normale avec écart type de 10 % de la moyenne. L'entité est clonée en deux. Un des clones sert à générer les commandes, tandis que l'autre entre dans la file d'attente de la cellule.

Sous-réseau cellule: Production

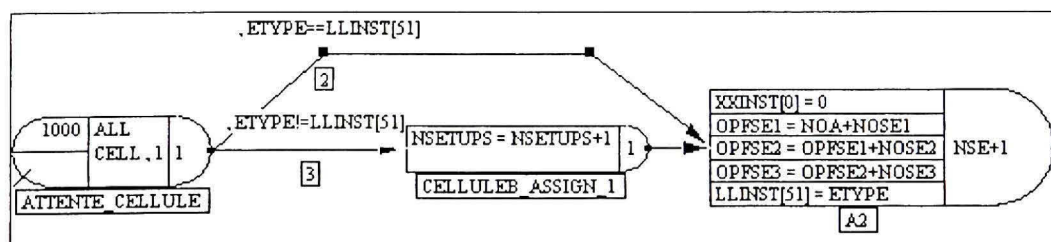


Figure A.5 Introduction de la commande dans la cellule

La commande, représentée par l'entité, attend dans la file 1000 pour la ressource CELL (cellule) si la cellule est libre, elle est prise par la commande. Si la commande antérieure était du même type de produit, donc il n'y a pas de mise en course à réaliser, dans le cas

contraire, on comptabilise la mise en course (NSETUPS), on initialise la variable XXINST[0] qui contrôle la quantité produite de la commande et on détermine quelle est l'opération finale de chaque branche ou sous ensemble (OPFSE1,2,...3). Après, on clone l'entité en un nombre égal au nombre de sous-ensembles plus la pièce principale, et chaque entité est acheminée à la station de travail qui est destinée à réaliser la première opération de chaque sous-ensemble.

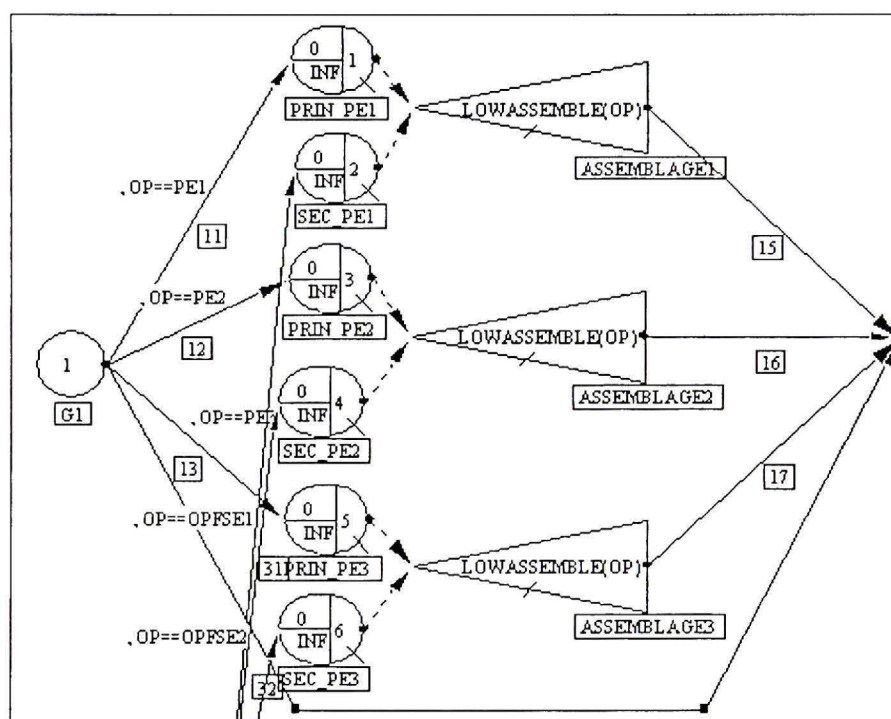


Figure A.6 Assemblage des pièces

Si l'opération courante est celle d'assemblage, les entités sont acheminées à une file d'attente de sous-ensembles (1, 2, 3, 4, 5 ou 6). Dans cette file, elle attend l'arrivée d'un autre sous-ensemble. Quand la paire de sous-ensembles est complète, les deux entités sont fusionnées dans une seule entité dans le nœud SELECT. Cette fusion représente l'assemblage. Si l'opération courante n'est pas une opération d'assemblage, l'entité est acheminée à la file d'attente des travailleurs et des machines.

Sous réseau cellule: Pannes

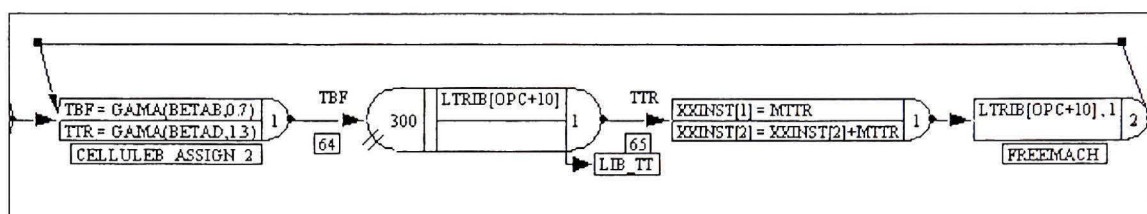


Figure A.9 Génération de pannes

Le processus de pannes est généré aussitôt se produit l'arrivée des entités au sous-réseau production. Dans un nœud ASSIGN, on calcule le temps entre pannes TBF et le temps pour la réparation TTR de chaque machine. Après une durée égale à TBF, l'entité entre dans le nœud PREEMPT pour demander la ressource machine qui est exprimée par la variable LTRIB[OPC+10]. Cet appel est suivi par la réparation de la machine dans un temps égal à TTR. Finalement on libère la machine pour retourner à la cellule afin de continuer avec la production.

ANNEXE IV

RÉSULTATS DE LA HFC

SCÉNARIO 0 (avec relaxation maximale de paramètres)

NMINCell	Nombre minimal de cellules dans une saison	=	1
NXMach	Nombre maximal de machines par cellule	=	100
NXTrav	Nombre maximal de travailleurs par cellule	=	100
NXProd	Nombre maximal de produits par cellule	=	100
MINCSS	Coefficient de similarité minimal	=	0

SOLUTION FINALE

Nombre de cellules : NC = 3 4

Machines:

n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10
36	6	4	1	3	0	2	3	2	0

Travailleurs/saison:

t1	t2	t3
15	1	2
16	3	3

TEMPS_DE_PROCES = 561.4690

TCY = 1.0e+005 *

0.8664	1.0983	0.7086	0
0.6092	0.5734	0.8135	0.8117

RESULTAT DE LA FORMATION DE CELLULES

Coût total d'exploitation des machines et travailleurs: AC = 5.3842e+005

Coût total d'exploitation des machines:
MC = 1.5252e+005

Coût total d'exploitation des travailleurs:
TRC = 385900

SAISON CELLULE

1 1

SELECTION DE MACHINES

MACHINE QUANTITÉ OCUPATION

1.0000	7.0000	0.3969
2.0000	2.0000	0.0974
3.0000	2.0000	0.2091
4.0000	1.0000	0.1395
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8.0000	1.0000	0.2528
9.0000	2.0000	0.2194
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR QUANTITÉ OCUPATION

1.0000	5.0000	0.7961
2	0	0
3.0000	1.0000	0.2420

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3420
1.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.1770
1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2340
1.0000	4.0000	3.0000	1.0000	0.2460
1.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.2330
1.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3400
1.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.2000
1.0000	8.0000	3.0000	1.0000	0.2750
1.0000	9.0000	1.0000	3.0000	0.3930
1.0000	10.0000	9.0000	1.0000	0.3070
2.0000	1.0000	9.0000	1.0000	0.2550
2.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.1670

2.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3630
2.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3230
2.0000	5.0000	2.0000	1.0000	0.3240
2.0000	6.0000	8.0000	1.0000	0.2770
2.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3410
2.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.2080
2.0000	9.0000	1.0000	3.0000	0.3560
2.0000	10.0000	9.0000	1.0000	0.3730
7.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2650
7.0000	2.0000	8.0000	1.0000	0.2510
7.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.1850
7.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.1760
7.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.2320
7.0000	6.0000	1.0000	3.0000	0.2410
7.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3910
7.0000	8.0000	4.0000	1.0000	0.2450
7.0000	9.0000	3.0000	1.0000	0.1720
7.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.2160

SAISON CELLULE

1 2

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	10.0000	0.4700
2.0000	1.0000	0.2264
3.0000	2.0000	0.1253
4	0	0
5.0000	2.0000	0.1216
6	0	0
7	0	0
8.0000	1.0000	0.1544
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	6.0000	0.7977
2.0000	1.0000	0.7879
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2270
3.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.3280
3.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2850
3.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.2850
3.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.2990
3.0000	6.0000	1.0000	2.0000	0.1940
3.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3440

3.0000	8.0000	1.0000	2.0000	0.1880
3.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.2980
3.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.2230
6.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3640
6.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.2350
6.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2120
6.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3420
6.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.3060
6.0000	6.0000	1.0000	2.0000	0.2060
6.0000	7.0000	1.0000	2.0000	0.1960
6.0000	8.0000	8.0000	1.0000	0.3090
6.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3620
6.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.2170
8.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.3970
8.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.2840
8.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3060
8.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3370
8.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.2210
8.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.2260
8.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.2150
8.0000	8.0000	1.0000	2.0000	0.1660
8.0000	9.0000	1.0000	2.0000	0.2160
8.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3000
10.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3540
10.0000	2.0000	5.0000	1.0000	0.2670
10.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3260
10.0000	4.0000	5.0000	1.0000	0.1900
10.0000	5.0000	1.0000	2.0000	0.1740
10.0000	6.0000	3.0000	1.0000	0.2230
10.0000	7.0000	1.0000	2.0000	0.1720
10.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.2730
10.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3440
10.0000	10.0000	3.0000	1.0000	0.2540

SAISON CELLULE

1 3

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	9.0000	0.3179
2.0000	1.0000	0.3202
3	0	0
4	0	0
5.0000	1.0000	0.1330
6	0	0
7	0	0
8.0000	1.0000	0.2029
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	4.0000	0.8083
2	0	0
3.0000	1.0000	0.2836

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
4.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2570
4.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.1590
4.0000	3.0000	8.0000	1.0000	0.3540
4.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.2460
4.0000	5.0000	1.0000	3.0000	0.1830
4.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.2110
4.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.2460
4.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.3580
4.0000	9.0000	1.0000	3.0000	0.1850
4.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3220
5.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3200
5.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.2100
5.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.1590
5.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.2400
5.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.3650
5.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3410
5.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.1640
5.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.1580
5.0000	9.0000	2.0000	1.0000	0.3540
5.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.1950
9.0000	1.0000	1.0000	3.0000	0.2090
9.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.3250
9.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2330
9.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.2230
9.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.3250
9.0000	6.0000	8.0000	3.0000	0.1760
9.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.2740
9.0000	8.0000	5.0000	1.0000	0.3810
9.0000	9.0000	2.0000	1.0000	0.3050
9.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3770

SAISON CELLULE

2 1

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	9.0000	0.3258
2.0000	1.0000	0.1477
3	0	0
4.0000	1.0000	0.1320
5	0	0
6	0	0

7.0000	1.0000	0.1734
8.0000	1.0000	0.2121
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.7740
2.0000	1.0000	0.7024
3.0000	1.0000	0.5726

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
1.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.3220
1.0000	2.0000	1.0000	3.0000	0.2680
1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3650
1.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3790
1.0000	5.0000	1.0000	2.0000	0.3310
1.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3280
1.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3760
1.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.3530
1.0000	9.0000	7.0000	1.0000	0.3130
1.0000	10.0000	1.0000	3.0000	0.2870
8.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.2840
8.0000	2.0000	8.0000	1.0000	0.3740
8.0000	3.0000	4.0000	1.0000	0.2330
8.0000	4.0000	1.0000	3.0000	0.2080
8.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.3900
8.0000	6.0000	2.0000	3.0000	0.2640
8.0000	7.0000	1.0000	2.0000	0.3070
8.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.3360
8.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3790
8.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3190

SAISON CELLULE

2 2

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	9.0000	0.2676
2.0000	1.0000	0.1514
3.0000	1.0000	0.3228
4	0	0
5.0000	1.0000	0.2007
6	0	0
7	0	0
8.0000	1.0000	0.2042
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	3.0000	0.7860
2.0000	1.0000	0.7622
3.0000	1.0000	0.1671

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
2.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3520
2.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.3890
2.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3330
2.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3580
2.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.2310
2.0000	6.0000	1.0000	2.0000	0.2690
2.0000	7.0000	1.0000	2.0000	0.2030
2.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.3660
2.0000	9.0000	1.0000	3.0000	0.3270
2.0000	10.0000	3.0000	1.0000	0.3280
10.0000	1.0000	1.0000	2.0000	0.1790
10.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.2400
10.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3740
10.0000	4.0000	3.0000	1.0000	0.2880
10.0000	5.0000	5.0000	1.0000	0.3650
10.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3240
10.0000	7.0000	1.0000	2.0000	0.3160
10.0000	8.0000	8.0000	1.0000	0.3750
10.0000	9.0000	2.0000	3.0000	0.2770
10.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3290

SAISON CELLULE

2 3

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	9.0000	0.3481
2.0000	2.0000	0.3625
3.0000	1.0000	0.0710
4	0	0
5.0000	1.0000	0.1838
6	0	0
7.0000	1.0000	0.1179
8	0	0
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	5.0000	0.8095
2	0	0
3.0000	1.0000	0.1835

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3450
3.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.2970
3.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2530
3.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.2440
3.0000	5.0000	2.0000	1.0000	0.3840
3.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3990
3.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3870
3.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.2930
3.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3740
3.0000	10.0000	1.0000	3.0000	0.3150
5.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.2450
5.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.1570
5.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2080
5.0000	4.0000	7.0000	1.0000	0.2330
5.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.1800
5.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.2630
5.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3960
5.0000	8.0000	2.0000	3.0000	0.2900
5.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.1960
5.0000	10.0000	5.0000	1.0000	0.3630
9.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.1850
9.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.3740
9.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3070
9.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3600
9.0000	5.0000	2.0000	1.0000	0.2740
9.0000	6.0000	3.0000	1.0000	0.2040
9.0000	7.0000	1.0000	3.0000	0.1790
9.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.2280
9.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3740
9.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3980

SAISON CELLULE

2 4

SELECTION DE MACHINES

MACHINE	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	9.0000	0.4280
2.0000	2.0000	0.3246
3	0	0
4	0	0
5	0	0

6	0	0
7	0	0
8.0000	1.0000	0.1680
9	0	0
10	0	0

SELECTION DE TRAVAILLEURS

TRAVAILLEUR	QUANTITÉ	OCUPATION
1.0000	5.0000	0.7998
2.0000	1.0000	0.6698
3	0	0

AFFECTATION DE PRODUIT/OPERATIONS

PROD	OPE	MACH	TRAV	temps
4.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2680
4.0000	2.0000	1.0000	1.0000	0.2630
4.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.2940
4.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3370
4.0000	5.0000	2.0000	1.0000	0.3100
4.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.2440
4.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.2790
4.0000	8.0000	1.0000	2.0000	0.2510
4.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.2680
4.0000	10.0000	1.0000	2.0000	0.2250
6.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.3590
6.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.2600
6.0000	3.0000	1.0000	1.0000	0.3240
6.0000	4.0000	1.0000	1.0000	0.3650
6.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.3970
6.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.3560
6.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3800
6.0000	8.0000	1.0000	2.0000	0.1970
6.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3630
6.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3580
7.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3450
7.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.1810
7.0000	3.0000	8.0000	1.0000	0.3970
7.0000	4.0000	2.0000	1.0000	0.3910
7.0000	5.0000	1.0000	2.0000	0.2010
7.0000	6.0000	1.0000	1.0000	0.2980
7.0000	7.0000	1.0000	1.0000	0.3710
7.0000	8.0000	2.0000	1.0000	0.2660
7.0000	9.0000	1.0000	1.0000	0.3100
7.0000	10.0000	1.0000	1.0000	0.3290

Nombre de machines et utilisation par cellule

S	C	M	NM	UTM
1.0000	1.0000	1.0000	7.0000	0.3969
1.0000	1.0000	2.0000	2.0000	0.0974

1.0000	1.0000	3.0000	2.0000	0.2091
1.0000	1.0000	4.0000	1.0000	0.1395
1.0000	1.0000	8.0000	1.0000	0.2528
1.0000	1.0000	9.0000	2.0000	0.2194
1.0000	2.0000	1.0000	10.0000	0.4700
1.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.2264
1.0000	2.0000	3.0000	2.0000	0.1253
1.0000	2.0000	5.0000	2.0000	0.1216
1.0000	2.0000	8.0000	1.0000	0.1544
1.0000	3.0000	1.0000	9.0000	0.3179
1.0000	3.0000	2.0000	1.0000	0.3202
1.0000	3.0000	5.0000	1.0000	0.1330
1.0000	3.0000	8.0000	1.0000	0.2029
2.0000	1.0000	1.0000	9.0000	0.3258
2.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.1477
2.0000	1.0000	4.0000	1.0000	0.1320
2.0000	1.0000	7.0000	1.0000	0.1734
2.0000	1.0000	8.0000	1.0000	0.2121
2.0000	2.0000	1.0000	9.0000	0.2676
2.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.1514
2.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.3228
2.0000	2.0000	5.0000	1.0000	0.2007
2.0000	2.0000	8.0000	1.0000	0.2042
2.0000	3.0000	1.0000	9.0000	0.3481
2.0000	3.0000	2.0000	2.0000	0.3625
2.0000	3.0000	3.0000	1.0000	0.0710
2.0000	3.0000	5.0000	1.0000	0.1838
2.0000	3.0000	7.0000	1.0000	0.1179
2.0000	4.0000	1.0000	9.0000	0.4280
2.0000	4.0000	2.0000	2.0000	0.3246
2.0000	4.0000	8.0000	1.0000	0.1680

Nombre de travailleurs et utilisation par cellule

S	C	T	NT	UTT
1.0000	1.0000	1.0000	5.0000	0.7961
1.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.7420
1.0000	2.0000	1.0000	6.0000	0.7977
1.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.7879
1.0000	3.0000	1.0000	4.0000	0.8083
1.0000	3.0000	3.0000	1.0000	0.7836
2.0000	1.0000	1.0000	3.0000	0.7740
2.0000	1.0000	2.0000	1.0000	0.7024
2.0000	1.0000	3.0000	1.0000	0.5726
2.0000	2.0000	1.0000	3.0000	0.7860
2.0000	2.0000	2.0000	1.0000	0.7622
2.0000	2.0000	3.0000	1.0000	0.6671
2.0000	3.0000	1.0000	5.0000	0.8095
2.0000	3.0000	3.0000	1.0000	0.7835
2.0000	4.0000	1.0000	5.0000	0.7998
2.0000	4.0000	2.0000	1.0000	0.6698

ANNEXE V

RÉSULTATS DE LA SIMULATION

** AweSim SUMMARY REPORT **
Wed Jan 17 13:25:16 2007

Simulation Project : CELLULE
Modeler : JORGE CALIZAYA
Date : 04/01/2007
Scenario : 1

Run number 1 of 10
Current simulation time : 115200.000000
Statistics cleared at time : 0.000000

** FILE STATISTICS REPORT for scenario MEMOETS **

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
0	Event Calendar	40.284	2.211	127	34	1.403

** ACTIVITY STATISTICS REPORT for scenario MEMOETS **

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization	Current Utilization
1	SAISON1	0.000	0.000	1	1	0
3	PROD S1	0.000	0.000	3	3	0
4	TOT PRODUITS	0.000	0.000	3	1	0
111	Line 20	0.000	0.000	0	0	0

** AweSim SUMMARY REPORT **
Subnetwork : SR_CELLULE
Instance : S1C4

** OBSERVED STATISTICS REPORT for SR_CELLULE S1C4 **

Label	Mean Value	Standard Deviation	Number of Observations	Minimum Value	Maximum Value
TSYSTEM_P_4	874.704	550.474	43000	1.497	2592.746
TSYSTEM_P_5	785.920	451.870	63432	4.488	2054.879
TSYSTEM_P_9	748.906	451.394	36175	1.669	2220.304
T_CYCLE_P_4	2.635	75.345	42999	0.010	4372.342
T_CYCLE_P_5	1.777	48.978	63431	0.000	3244.534
T_CYCLE_P_9	3.181	83.140	36174	0.002	3614.676
TS_COM_P_4	1238.278	545.411	35	195.219	2592.746
TS_COM_P_5	1212.724	378.356	43	686.555	2054.879
TS_COM_P_9	1138.214	413.896	34	570.808	2220.304
TSYSTEM_P_401	2164.170	236.790	1431	1766.779	2592.746
TSYSTEM_P_402	1065.880	230.509	1292	678.579	1475.849
TSYSTEM_P_403	534.538	288.953	1676	1.887	1006.802
TSYSTEM_P_404	364.453	207.455	1345	2.056	723.409
TSYSTEM_P_405	663.288	212.778	1371	291.376	1031.955
TSYSTEM_P_406	387.721	206.610	1331	29.418	745.345
TSYSTEM_P_407	918.339	184.428	1189	596.709	1237.441
TSYSTEM_P_408	1265.078	222.888	1399	876.585	1644.102
TSYSTEM_P_409	1679.448	256.706	1297	1280.673	2109.004
TSYSTEM_P_410	711.874	291.015	1220	246.468	1141.143
TSYSTEM_P_411	1119.125	219.672	1104	754.565	1493.216

TSYSTEM_P_412	768.539	179.890	1157	453.523	1080.118
TSYSTEM_P_413	371.744	208.736	1340	2.299	731.588
TSYSTEM_P_414	938.579	182.297	1157	602.870	1251.484
TSYSTEM_P_415	1573.002	302.070	1250	1073.867	2252.469
TSYSTEM_P_416	763.684	172.622	1112	461.867	1063.548
TSYSTEM_P_417	815.823	216.329	1293	453.816	1231.081
TSYSTEM_P_418	1590.508	216.130	1387	1208.993	1964.000
TSYSTEM_P_419	365.908	234.943	1250	2.097	824.211
TSYSTEM_P_420	2030.989	232.803	1148	1623.552	2382.084
TSYSTEM_P_421	418.741	239.448	1552	1.769	832.104
TSYSTEM_P_422	1045.361	210.956	1272	661.887	1394.834
TSYSTEM_P_423	1271.098	277.684	1308	851.608	1759.666
TSYSTEM_P_424	1064.693	128.821	828	840.502	1287.828
TSYSTEM_P_425	319.451	182.270	1161	1.497	634.408
TSYSTEM_P_426	388.858	240.237	1308	1.957	807.320
TSYSTEM_P_427	319.835	182.471	1171	1.826	635.897
TSYSTEM_P_428	334.275	189.243	1218	1.516	661.164
TSYSTEM_P_429	598.210	208.087	1211	1.876	933.642
TSYSTEM_P_430	1225.146	222.601	1082	781.332	1550.634
TSYSTEM_P_431	481.720	269.098	1391	53.014	946.732
TSYSTEM_P_432	592.507	258.135	1301	190.909	1270.472
TSYSTEM_P_433	1219.650	185.376	1191	893.336	1539.666
TSYSTEM_P_434	573.279	193.921	1244	234.773	908.546
TSYSTEM_P_435	191.759	2.443	13	188.303	195.219
T_CYCLE_P_401	0.578	1.271	1430	0.069	46.452
T_CYCLE_P_402	0.618	2.137	1291	0.064	66.474
T_CYCLE_P_403	0.600	1.796	1675	0.010	65.106
T_CYCLE_P_404	0.537	0.360	1344	0.071	1.595
T_CYCLE_P_405	0.541	0.364	1370	0.062	1.996
T_CYCLE_P_406	0.538	0.375	1330	0.043	1.907
T_CYCLE_P_407	0.539	0.363	1188	0.049	2.384
T_CYCLE_P_408	0.549	0.531	1398	0.036	15.030
T_CYCLE_P_409	0.639	3.712	1296	0.065	133.543
T_CYCLE_P_410	0.734	5.278	1219	0.079	172.577
T_CYCLE_P_411	0.670	3.316	1103	0.052	96.216
T_CYCLE_P_412	0.542	0.361	1156	0.098	1.855
T_CYCLE_P_413	0.545	0.461	1339	0.061	11.203
T_CYCLE_P_414	0.561	0.920	1156	0.065	29.424
T_CYCLE_P_415	0.944	10.672	1249	0.058	366.272
T_CYCLE_P_416	0.542	0.357	1111	0.071	1.850
T_CYCLE_P_417	0.602	2.268	1292	0.033	81.034
T_CYCLE_P_418	0.545	0.402	1386	0.075	7.804
T_CYCLE_P_419	0.658	4.260	1249	0.037	150.535
T_CYCLE_P_420	0.661	4.068	1147	0.081	137.759
T_CYCLE_P_421	0.535	0.359	1551	0.053	1.630
T_CYCLE_P_422	0.577	1.353	1271	0.060	47.149
T_CYCLE_P_423	0.695	3.720	1307	0.045	121.197
T_CYCLE_P_424	0.541	0.362	827	0.047	1.639
T_CYCLE_P_425	0.546	0.361	1160	0.042	1.822
T_CYCLE_P_426	0.616	2.196	1307	0.058	74.752
T_CYCLE_P_427	0.542	0.355	1170	0.066	1.693
T_CYCLE_P_428	0.542	0.365	1217	0.074	2.057
T_CYCLE_P_429	0.770	6.817	1210	0.028	232.925
T_CYCLE_P_430	0.712	5.532	1081	0.068	182.015
T_CYCLE_P_431	0.643	3.041	1390	0.068	110.516
T_CYCLE_P_432	0.830	8.000	1300	0.077	268.827
T_CYCLE_P_433	0.543	0.361	1190	0.030	1.587
T_CYCLE_P_434	0.542	0.361	1243	0.023	3.639
T_CYCLE_P_435	0.576	0.415	12	0.184	1.596
TSYSTEM_P_501	1288.313	283.483	1418	833.584	1763.932
TSYSTEM_P_502	1086.205	232.772	1516	680.282	1490.087
TSYSTEM_P_503	423.190	211.420	1372	55.579	789.843
TSYSTEM_P_504	1002.814	255.540	1498	575.731	1431.176
TSYSTEM_P_505	668.477	238.937	1552	252.835	1082.112
TSYSTEM_P_506	434.019	253.166	1563	4.931	874.584
TSYSTEM_P_507	423.854	203.504	1203	5.313	757.294
TSYSTEM_P_508	1147.434	244.793	1502	645.803	1555.258

TSYSTEM_P_509	396.081	225.286	1460	5.047	785.997
TSYSTEM_P_510	1437.798	253.008	1634	1001.531	1874.613
TSYSTEM_P_511	709.876	250.833	1458	300.156	1198.157
TSYSTEM_P_512	785.416	243.461	1579	363.429	1208.309
TSYSTEM_P_513	895.829	226.163	1313	470.606	1262.938
TSYSTEM_P_514	427.981	251.690	1396	5.298	863.278
TSYSTEM_P_515	657.503	401.693	1586	5.464	1215.884
TSYSTEM_P_516	789.564	252.270	1374	379.392	1232.654
TSYSTEM_P_517	1424.609	214.128	1390	1051.969	1795.806
TSYSTEM_P_518	499.272	268.485	1498	63.411	952.209
TSYSTEM_P_519	725.151	229.867	1397	339.064	1125.267
TSYSTEM_P_520	372.770	214.054	1368	5.288	837.710
TSYSTEM_P_521	1040.242	226.270	1464	648.411	1430.721
TSYSTEM_P_522	560.420	306.071	1928	4.862	1078.174
TSYSTEM_P_523	861.583	228.803	1458	466.252	1257.672
TSYSTEM_P_524	1339.860	268.993	1694	872.823	1800.712
TSYSTEM_P_525	1355.332	240.769	1427	940.106	1759.474
TSYSTEM_P_526	346.225	196.539	1273	4.934	686.555
TSYSTEM_P_527	621.418	236.814	1536	211.859	1031.045
TSYSTEM_P_528	444.456	246.510	1512	4.502	857.195
TSYSTEM_P_529	859.613	191.925	1243	525.586	1190.294
TSYSTEM_P_530	403.069	229.664	1485	5.202	801.145
TSYSTEM_P_531	393.786	226.360	1444	5.394	827.322
TSYSTEM_P_532	968.997	319.644	1346	357.374	1456.173
TSYSTEM_P_533	1326.269	249.273	1553	900.444	1762.446
TSYSTEM_P_534	1155.089	206.702	1339	796.470	1512.286
TSYSTEM_P_535	762.755	275.748	1355	307.339	1185.126
TSYSTEM_P_536	1380.838	267.361	1526	908.316	1812.838
TSYSTEM_P_537	435.392	237.401	1375	4.814	846.775
TSYSTEM_P_538	478.891	302.764	1613	4.982	1276.268
TSYSTEM_P_539	466.484	256.774	1660	5.300	911.434
TSYSTEM_P_540	1660.877	228.820	1489	1261.842	2054.879
TSYSTEM_P_541	453.698	257.599	1660	5.295	900.686
TSYSTEM_P_542	417.619	238.683	1538	4.488	829.068
TSYSTEM_P_543	389.739	221.713	1437	5.704	781.744
T_CYCLE_P_501	0.657	4.064	1417	0.025	149.915
T_CYCLE_P_502	0.535	0.354	1515	0.070	2.081
T_CYCLE_P_503	0.536	0.354	1371	0.026	1.928
T_CYCLE_P_504	0.571	1.327	1497	0.028	45.876
T_CYCLE_P_505	0.535	0.347	1551	0.000	1.722
T_CYCLE_P_506	0.557	0.892	1562	0.072	33.043
T_CYCLE_P_507	0.626	3.113	1202	0.016	107.771
T_CYCLE_P_508	0.606	2.975	1501	0.000	115.028
T_CYCLE_P_509	0.535	0.336	1459	0.068	1.930
T_CYCLE_P_510	0.535	0.351	1633	0.044	1.792
T_CYCLE_P_511	0.616	1.980	1457	0.086	58.643
T_CYCLE_P_512	0.535	0.349	1578	0.065	1.927
T_CYCLE_P_513	0.604	2.222	1312	0.006	77.518
T_CYCLE_P_514	0.615	1.907	1395	0.068	61.855
T_CYCLE_P_515	0.764	7.314	1585	0.018	280.480
T_CYCLE_P_516	0.621	2.380	1373	0.054	67.066
T_CYCLE_P_517	0.536	0.345	1389	0.070	1.645
T_CYCLE_P_518	0.594	2.167	1497	0.070	80.747
T_CYCLE_P_519	0.563	0.940	1396	0.060	26.358
T_CYCLE_P_520	0.609	2.868	1367	0.040	105.759
T_CYCLE_P_521	0.535	0.344	1463	0.004	1.839
T_CYCLE_P_522	0.557	1.036	1927	0.000	43.423
T_CYCLE_P_523	0.543	0.529	1457	0.041	15.669
T_CYCLE_P_524	0.548	0.630	1693	0.065	22.226
T_CYCLE_P_525	0.575	1.299	1426	0.039	45.647
T_CYCLE_P_526	0.536	0.348	1272	0.053	1.904
T_CYCLE_P_527	0.534	0.353	1535	0.020	1.785
T_CYCLE_P_528	0.564	0.918	1511	0.056	33.114
T_CYCLE_P_529	0.535	0.342	1242	0.049	2.152
T_CYCLE_P_530	0.536	0.340	1484	0.053	1.631
T_CYCLE_P_531	0.570	1.553	1443	0.027	58.011
T_CYCLE_P_532	0.817	7.198	1345	0.075	244.192

T_CYCLE_P_533	0.555	0.806	1552	0.033	29.205
T_CYCLE_P_534	0.535	0.345	1338	0.080	1.783
T_CYCLE_P_535	0.648	4.265	1354	0.040	156.927
T_CYCLE_P_536	0.593	2.423	1525	0.030	94.203
T_CYCLE_P_537	0.613	2.179	1374	0.055	67.872
T_CYCLE_P_538	0.789	8.485	1612	0.053	337.544
T_CYCLE_P_539	0.546	0.664	1659	0.071	23.537
T_CYCLE_P_540	0.533	0.346	1488	0.014	1.786
T_CYCLE_P_541	0.540	0.358	1659	0.057	2.682
T_CYCLE_P_542	0.536	0.348	1537	0.070	1.712
T_CYCLE_P_543	0.540	0.446	1436	0.039	11.142
TSYSTEM_P_901	451.536	241.007	1066	1.710	827.434
TSYSTEM_P_902	1016.228	183.979	1033	697.485	1336.241
TSYSTEM_P_903	1369.984	211.034	1015	986.960	1702.147
TSYSTEM_P_904	1259.986	191.395	1095	923.832	1623.504
TSYSTEM_P_905	353.309	194.413	1011	27.717	697.144
TSYSTEM_P_906	425.275	242.618	1159	1.836	853.040
TSYSTEM_P_907	851.540	172.918	892	458.107	1160.643
TSYSTEM_P_908	632.974	197.319	1109	2.233	970.230
TSYSTEM_P_909	714.222	231.230	1066	319.965	1080.954
TSYSTEM_P_910	493.323	163.160	938	210.463	774.661
TSYSTEM_P_911	417.884	166.921	760	141.668	705.629
TSYSTEM_P_912	1154.489	268.128	1125	675.502	1557.908
TSYSTEM_P_913	358.407	201.789	1141	1.977	705.570
TSYSTEM_P_914	1514.088	274.020	1287	913.108	1929.550
TSYSTEM_P_915	851.121	174.834	976	548.942	1173.115
TSYSTEM_P_916	341.492	194.141	1098	2.246	683.291
TSYSTEM_P_917	900.592	245.347	1015	511.967	1322.489
TSYSTEM_P_918	1252.154	275.188	1020	754.187	1657.789
TSYSTEM_P_919	395.114	268.445	1142	1.669	1029.901
TSYSTEM_P_920	479.574	300.768	1115	1.925	918.700
TSYSTEM_P_921	289.968	162.534	930	2.069	570.808
TSYSTEM_P_922	342.141	192.496	1094	2.087	673.270
TSYSTEM_P_923	469.233	261.900	1025	1.940	839.560
TSYSTEM_P_924	933.966	212.281	957	609.481	1352.660
TSYSTEM_P_925	1259.030	313.355	1228	745.143	1748.707
TSYSTEM_P_926	807.569	193.262	1016	486.029	1178.643
TSYSTEM_P_927	1217.830	177.486	1020	904.019	1524.320
TSYSTEM_P_928	1543.615	284.995	1057	1127.871	2220.304
TSYSTEM_P_929	486.911	241.010	1129	97.894	900.014
TSYSTEM_P_930	420.217	231.130	1137	2.239	787.408
TSYSTEM_P_931	422.168	251.091	1321	2.022	906.870
TSYSTEM_P_932	1014.108	236.682	949	547.703	1424.595
TSYSTEM_P_933	550.421	312.610	1112	2.124	987.725
TSYSTEM_P_934	421.296	270.350	1137	2.402	874.462
T_CYCLE_P_901	0.775	4.450	1065	0.066	132.527
T_CYCLE_P_902	0.619	0.587	1032	0.065	14.482
T_CYCLE_P_903	0.705	2.457	1014	0.048	70.847
T_CYCLE_P_904	0.640	1.212	1094	0.052	38.394
T_CYCLE_P_905	0.663	1.682	1010	0.063	52.389
T_CYCLE_P_906	0.735	2.590	1158	0.048	67.765
T_CYCLE_P_907	0.788	3.862	891	0.042	103.637
T_CYCLE_P_908	0.874	8.948	1108	0.034	298.153
T_CYCLE_P_909	0.715	2.570	1065	0.049	61.647
T_CYCLE_P_910	0.602	0.403	937	0.067	2.152
T_CYCLE_P_911	0.743	2.845	759	0.048	73.443
T_CYCLE_P_912	0.785	3.155	1124	0.037	78.401
T_CYCLE_P_913	0.617	0.412	1140	0.039	3.035
T_CYCLE_P_914	0.790	5.675	1286	0.032	195.545
T_CYCLE_P_915	0.640	1.141	975	0.033	33.792
T_CYCLE_P_916	0.621	0.535	1097	0.048	11.621
T_CYCLE_P_917	0.799	3.884	1014	0.048	95.289
T_CYCLE_P_918	0.887	6.636	1019	0.022	196.321
T_CYCLE_P_919	0.901	9.290	1141	0.040	313.197
T_CYCLE_P_920	0.823	5.160	1114	0.027	138.201
T_CYCLE_P_921	0.612	0.390	929	0.064	2.142
T_CYCLE_P_922	0.614	0.423	1093	0.023	2.169

T_CYCLE_P_923	0.818	6.766	1024	0.041	216.732
T_CYCLE_P_924	0.777	5.206	956	0.058	161.074
T_CYCLE_P_925	0.818	6.237	1227	0.060	212.545
T_CYCLE_P_926	0.682	2.395	1015	0.021	75.849
T_CYCLE_P_927	0.609	0.408	1019	0.030	1.907
T_CYCLE_P_928	1.035	8.645	1056	0.032	215.269
T_CYCLE_P_929	0.711	2.835	1128	0.024	92.830
T_CYCLE_P_930	0.691	2.767	1136	0.053	92.880
T_CYCLE_P_931	0.685	2.736	1320	0.046	96.861
T_CYCLE_P_932	0.925	7.322	948	0.045	191.494
T_CYCLE_P_933	0.887	7.093	1111	0.058	219.170
T_CYCLE_P_934	0.768	4.428	1136	0.002	145.337
P_REJETES_401	2115.627	230.416	59	1772.995	2577.088
P_REJETES_402	3820.065	233.851	56	3430.305	4208.121
P_REJETES_403	7108.350	265.722	59	6485.002	7484.017
P_REJETES_404	10009.365	200.982	55	9664.788	10381.957
P_REJETES_405	12312.698	225.279	59	11933.430	12655.948
P_REJETES_406	15193.649	187.722	52	14883.858	15513.078
P_REJETES_407	18779.286	202.673	36	18484.262	19109.192
P_REJETES_408	22739.588	233.603	64	22389.103	23139.807
P_REJETES_409	26189.578	264.935	46	25785.446	26586.261
P_REJETES_410	28790.616	271.805	45	28282.627	29160.135
P_REJETES_411	32869.275	223.669	36	32537.962	33267.100
P_REJETES_412	35846.847	199.250	47	35543.845	36164.490
P_REJETES_413	38789.814	207.966	41	38411.040	39124.883
P_REJETES_414	43118.186	206.873	32	42769.984	43378.499
P_REJETES_415	47899.577	346.859	51	47320.548	48484.860
P_REJETES_416	50250.963	179.928	37	49915.822	50507.065
P_REJETES_417	53535.740	216.254	63	53218.870	53986.215
P_REJETES_418	58058.177	211.125	53	57637.643	58390.065
P_REJETES_419	60146.512	270.641	50	59772.750	60592.494
P_REJETES_420	65426.515	224.193	38	64963.764	65710.292
P_REJETES_421	68071.038	234.765	59	67651.815	68457.712
P_REJETES_422	72316.414	198.447	47	72025.517	72712.405
P_REJETES_423	75296.171	272.693	40	74965.789	75813.241
P_REJETES_424	78480.874	124.750	31	78222.872	78666.343
P_REJETES_425	81438.537	160.123	62	81121.500	81725.500
P_REJETES_426	84491.445	230.219	59	84104.597	84887.750
P_REJETES_427	87554.305	197.741	44	87220.352	87854.754
P_REJETES_428	90357.186	204.475	50	90057.042	90703.882
P_REJETES_429	93618.272	224.644	52	93046.155	93948.692
P_REJETES_430	98204.965	243.695	44	97814.606	98567.318
P_REJETES_431	101197.999	254.597	43	100854.119	101720.170
P_REJETES_432	105004.698	263.361	50	104657.679	105708.388
P_REJETES_433	109034.694	171.441	47	108793.880	109402.688
P_REJETES_434	112114.523	187.286	49	111760.733	112421.861
P_REJETES_435	115076.195	2.830	2	115074.194	115078.197
P_REJETES_501	1270.633	286.710	58	835.125	1757.110
P_REJETES_502	3022.337	240.941	64	2611.703	3396.916
P_REJETES_503	5220.325	217.670	75	4860.421	5556.319
P_REJETES_504	8613.655	248.699	56	8236.812	9066.774
P_REJETES_505	10803.679	256.957	75	10391.283	11212.969
P_REJETES_506	13418.154	245.869	63	12995.373	13782.668
P_REJETES_507	16125.198	210.995	57	15669.196	16421.786
P_REJETES_508	19667.711	245.602	64	19154.441	20034.486
P_REJETES_509	21301.588	198.397	60	20886.285	21631.830
P_REJETES_510	25326.458	227.065	74	24950.006	25766.695
P_REJETES_511	26974.797	210.804	69	26617.872	27466.682
P_REJETES_512	29568.816	264.891	68	29170.966	30004.921
P_REJETES_513	32219.090	210.087	59	31742.519	32533.967
P_REJETES_514	34501.040	265.676	63	34111.256	34947.474
P_REJETES_515	37419.682	383.172	88	36731.779	37942.393
P_REJETES_516	40490.157	283.903	62	40034.392	40876.327
P_REJETES_517	43758.264	205.666	65	43401.706	44128.057
P_REJETES_518	45762.476	261.544	71	45291.107	46222.071
P_REJETES_519	48884.780	200.598	57	48500.636	49237.551
P_REJETES_520	51083.859	217.106	61	50733.977	51450.395

P_REJETES_521	54393.352	223.213	53	53994.227	54764.983
P_REJETES_522	56303.328	310.733	93	55756.508	56817.778
P_REJETES_523	58747.947	242.466	52	58394.850	59178.063
P_REJETES_524	61966.971	292.248	68	61512.854	62407.117
P_REJETES_525	64509.536	200.519	54	64185.751	64927.807
P_REJETES_526	66088.463	176.268	59	65786.043	66429.501
P_REJETES_527	68939.417	229.407	63	68529.900	69328.450
P_REJETES_528	71565.672	229.137	80	71184.052	71993.056
P_REJETES_529	74576.704	177.751	54	74266.333	74896.430
P_REJETES_530	76940.279	220.851	76	76506.333	77270.779
P_REJETES_531	79733.138	224.151	54	79321.564	80122.779
P_REJETES_532	83164.065	311.506	60	82496.844	83592.690
P_REJETES_533	86341.465	260.837	68	85924.905	86778.702
P_REJETES_534	88948.306	216.784	66	88564.560	89271.188
P_REJETES_535	91139.093	277.123	57	90728.521	91587.297
P_REJETES_536	94430.432	251.051	57	94025.098	94866.515
P_REJETES_537	96640.716	250.996	54	96156.189	96997.851
P_REJETES_538	99236.627	281.994	69	98763.665	100017.444
P_REJETES_539	102537.146	283.058	66	102068.847	102941.155
P_REJETES_540	106078.806	236.947	63	105731.895	106500.472
P_REJETES_541	107406.338	265.313	74	107014.795	107906.513
P_REJETES_542	110287.332	217.380	76	109857.044	110645.603
P_REJETES_543	113135.371	224.294	66	112751.822	113507.030
P_REJETES_901	414.777	207.976	30	71.099	758.647
P_REJETES_902	4539.005	186.202	43	4225.395	4827.908
P_REJETES_903	7878.617	204.100	40	7515.196	8204.027
P_REJETES_904	11554.426	203.072	50	11226.970	11922.569
P_REJETES_905	14175.817	204.043	41	13857.643	14508.045
P_REJETES_906	18063.092	221.276	51	17626.006	18464.682
P_REJETES_907	22038.441	183.702	30	21657.494	22305.036
P_REJETES_908	24467.471	250.458	50	23878.822	24842.542
P_REJETES_909	27874.638	224.487	57	27515.702	28228.532
P_REJETES_910	31438.657	160.888	49	30966.323	31726.062
P_REJETES_911	35227.613	174.053	42	34980.635	35522.678
P_REJETES_912	39578.043	267.890	43	39140.691	40008.987
P_REJETES_913	42374.867	195.474	68	42039.420	42720.376
P_REJETES_914	46868.964	292.647	55	46241.575	47282.657
P_REJETES_915	49591.221	167.286	47	49306.049	49896.880
P_REJETES_916	52899.181	190.413	55	52543.120	53177.649
P_REJETES_917	57259.593	241.414	47	56867.871	57613.565
P_REJETES_918	61022.415	288.006	43	60602.831	61498.167
P_REJETES_919	63397.045	223.486	41	63125.211	64113.348
P_REJETES_920	67114.031	296.993	50	66680.922	67585.928
P_REJETES_921	69846.177	169.238	45	69606.388	70147.044
P_REJETES_922	73888.291	185.013	58	73586.539	74240.525
P_REJETES_923	77835.837	261.210	53	77402.511	78210.722
P_REJETES_924	82025.888	215.974	41	81765.522	82463.756
P_REJETES_925	85488.572	332.790	54	84918.072	85913.949
P_REJETES_926	88181.506	205.267	40	87862.750	88542.019
P_REJETES_927	91884.898	196.975	56	91591.390	92210.761
P_REJETES_928	95196.259	223.821	36	94886.972	95934.564
P_REJETES_929	97388.049	258.373	46	97010.127	97806.269
P_REJETES_930	100458.869	239.798	56	100059.934	100836.955
P_REJETES_931	104147.173	239.302	61	103734.626	104636.109
P_REJETES_932	108312.093	266.783	36	107918.821	108766.273
P_REJETES_933	111245.240	321.411	45	110783.752	111745.949
P_REJETES_934	114592.380	258.484	47	114236.314	115065.577
P_PAS_TER_4	57646.529	34428.120	2459	2592.746	115079.514
P_PAS_TER_5	56613.622	32639.078	2553	1763.932	113520.924
P_PAS_TER_9	58648.693	33982.504	1793	827.434	115069.841

** FILE STATISTICS REPORT for SR_CELLULE S1C4 **

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
1	QUEUE PRIN_PE	0.599	2.261	25	0	0.471
2	QUEUE SEC_PE1	1.969	4.643	25	0	1.547

3	QUEUE	PRIN_PE	6.377	6.876	25	0	5.048
4	QUEUE	SEC_PE2	1.360	5.011	25	0	1.083
5	QUEUE	PRIN_PE	3.362	6.201	25	0	3.598
6	QUEUE	SEC_PE3	4.969	8.507	25	0	5.309
11	RES.	TRAV11	3.080	3.445	24	0	1.151
12	RES.	TRAV12	2.929	3.662	25	0	1.211
13	RES.	TRAV13	7.994	8.335	49	0	3.119
14	RES.	TRAV14	10.907	9.980	24	0	4.578
31	RES.	TRAV31	3.604	4.655	24	0	1.351
125	RES.	MACH125	0.011	0.102	1	0	0.008
126	RES.	MACH126	0.028	0.174	2	0	0.022
127	RES.	MACH127	0.028	0.207	2	0	0.023
128	RES.	MACH128	0.008	0.091	1	0	0.007
129	RES.	MACH129	0.054	0.260	2	0	0.042
130	RES.	MACH130	0.079	0.314	2	0	0.062
131	RES.	MACH131	0.007	0.086	1	0	0.006
132	RES.	MACH132	0.002	0.040	1	0	0.002
133	RES.	MACH133	0.011	0.104	1	0	0.012
203	RES.	MACH203	0.038	0.211	2	0	0.043
300	RES.	MACH125	0.002	0.041	1	0	39.675
503	RES.	MACH503	0.000	0.019	1	0	0.001
803	RES.	MACH803	0.024	0.165	2	0	0.034
1000	RES.	CELL	0.376	0.547	2	0	386.741

** ACTIVITY STATISTICS REPORT for SR_CELLULE S1C4 **

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization	Current Utilization
1	Line 59	0.000	0.000	3	1	0
2	Line 71	0.000	0.000	4	1	0
3	Line 72	0.000	0.000	108	1	0
4	Line 81	0.000	0.000	10350	25	0
11	Line 93	0.000	0.000	146444	1	0
12	Line 94	0.000	0.000	145527	1	0
13	Line 95	0.000	0.000	107631	1	0
14	Line 96	0.000	0.000	1065792	1	0
21	Line 102	0.000	0.000	877519	1	0
22	Line 132	0.000	0.000	252575	1	0
23	Line 133	0.000	0.000	333927	1	0
24	OPER	3.285	2.209	1460098	5	0
25	Rejets	0.000	0.000	6055	1	0
26	Line 111	0.000	0.000	1459561	1	0
31	Line 148	0.000	0.000	146621	1	0
32	Line 149	0.000	0.000	144678	1	0
33	Line 150	0.000	0.000	107825	1	0
41	Production	0.000	0.000	142607	1	0
42	Line 168	0.000	0.000	142495	1	0
43	Command	0.000	0.000	112	1	0
51	Prod pas termine	0.000	0.000	6805	1	0
61	Line 220	0.000	0.000	3	1	0
62	Line 223	0.000	0.000	30	10	0
63	Line 229	0.000	0.000	30	1	0
64	TBFAILURES	29.845	0.396	252	30	30
65	TTREPAIR	0.153	0.390	252	3	0
71	Line 245	3.000	0.000	3	3	0
254	Line 200	0.000	0.000	112	1	0
666	Line 66	0.000	0.000	0	0	0

** SERVICE ACTIVITY STATISTICS REPORT for SR_CELLULE S1C4 **

Activity Number	Label or Input Location	Server Capacity	Entity Count	Average Utilization	Standard Deviation	Current Utilization	Average Blockage	Maximum IdleTime orServers	Maximum BusyTime orServers
15	Line100	1	146404	0.000	0.000	0	0.000	1200.452	0.000
16	Line 139	1	144630	0.000	0.000	0	0.000	1200.206	0.000
17	Line143	1	107118	0.000	0.000	0	0.000	2054.697	0.000

** RESOURCE STATISTICS REPORT for SR_CELLULE S1C4 **

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.	Current Capacity	Average Available	Current Available	Minimum Available	Maximum Available
11	TRAV11	0.713	0.452	0	1	1	0.287	1	0	1
12	TRAV12	0.718	0.450	0	1	1	0.282	1	0	1
13	TRAV13	0.715	0.452	0	1	1	0.285	1	0	1
14	TRAV14	0.706	0.456	0	1	1	0.294	1	0	1
31	TRAV31	0.723	0.448	0	1	1	0.277	1	0	1
99	TRAVIRTUEL	0.000	0.000	0	0	0	0.000	0	0	0
125	MACH125	0.364	0.481	0	1	1	0.636	1	0	1
126	MACH126	0.311	0.463	0	1	1	0.689	1	0	1
127	MACH127	0.271	0.444	0	1	1	0.729	1	0	1
128	MACH128	0.288	0.453	0	1	1	0.712	1	0	1
129	MACH129	0.404	0.491	0	1	1	0.596	1	0	1
130	MACH130	0.392	0.488	0	1	1	0.608	1	0	1
131	MACH131	0.360	0.480	0	1	1	0.640	1	0	1
132	MACH132	0.170	0.376	0	1	1	0.830	1	0	1
133	MACH133	0.246	0.431	0	1	1	0.754	1	0	1
203	MACH203	0.305	0.460	0	1	1	0.695	1	0	1
503	MACH503	0.129	0.335	0	1	1	0.871	1	0	1
803	MACH803	0.199	0.399	0	1	1	0.801	1	0	1
1000	CELL	0.790	0.407	0	1	1	0.210	1	0	1

BIBLIOGRAPHIE

- Agarwal, D., S. Sahu, P. K. Ray (2003). *"Cell formation in cellular manufacturing: ANAHP-based framework for evaluation of various techniques."* International Journal of Manufacturing Technology and Management 5(5-6): 521-535.
- Al-Mubarak, F., B. M. Khumawala, C. Canel (2003). *"Focused cellular manufacturing: an alternative to cellular manufacturing."* International Journal of Operations & Production Management 23(3): 277-99.
- Baykasoglu, A. (2003). *"Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells."* International Journal of Production Research 41(11): 2597-2618.
- Bazargan-Lari, M., H. Kaebernick, A. Harraf (2000). *"Cell formation and layout designs in a cellular manufacturing environment - A case study."* International Journal of Production Research 38(7): 1689-1709.
- Burbidge, J. L. (1971). *"Production Flow Analysis."* 50(4-5): 139-52.
- Beaulieu, A., A. Gharbi, Ait-Kadi D. (1997). *"An algorithm for the cell formation and the machine selection problems in the design of a cellular manufacturing system."* International Journal of Production Research 35(7): 1857-74.
- Bedworth, D. D., M. R. Henderson, P. Wolfe (1991). *"Computer-integrated design and manufacturing."*
- Black, J. T. (1991). *"The design of the factory with a future"*. New York, McGraw-Hill.
- Black, J. T. and J. C. Chen (1995). *"The role of decouplers in JIT pull apparel cells."* International Journal of Clothing Science and Technology 7(1): 17-35.
- Chan, F. T. S. and K. Abhary (1996). *"Design and evaluation of automated cellular manufacturing systems with simulation modelling and AHP approach: a case study."* Integrated Manufacturing Systems 7(6): 39-52.
- Chen, F. F. (1998). *"Communication Flexible production systems for the apparel and metal-working industries: a contrast study on technologies and contributions."* International Journal of Clothing Science and Technology 10, no 1: 11.

- Cole, W. (1988). *"Equipping the revolution."* Flexible Apparel Manufacturing: 11-22.
- Cooklin, G. (1991). *"Introduction to Clothing Manufacturing."*
- ExpertChoice (1993). *"ExpertChoice: Decision support software, User manual."*
- Gagne, R. (2002). *"Outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes manufacturiers cellulaires."* Mémoire de Maitrise, Ecole de Technologie Supérieure, Qc.
- Gharbi, A. (2002). *"Modélisation et simulation de systèmes de production."* Notes de Cours GPA 662, École de Technologie Supérieure.
- Garey, M. R. and D. S. Johnson (1979). *"Computers and Intractability."*
- Gilbert, C. (1990). *"Modular manufacturing sizzle or steak?"* Apparel manufacturer: 44, 46-48, 50-52.
- Gilbert, C. (1991). *"Bundle's waning heyday."* Apparel Industry Magazine: 50-52.
- Im, J. H. and R. J. Schonberger (1988). *"The pull of kanban."* Production and inventory management Journal 29(4): 54-58.
- Irizarry, M. d. I. A., J. R. Wilson, J. Trevino (2001). *"A flexible simulation tool for manufacturing-cell design, I: model structure, operation, and case study."* IIE Transactions 33: 827-836.
- Jeon, G., H. R. Leep, H. R. Parsaei (1998). *"Cellular manufacturing system based on new similarity coefficient which considers alternative routes during machine failure."* Computers & Industrial Engineering 34(1): 21-36.
- Khan, M. R. R. (1999). *"Simulation modeling of a garment production system using a spreadsheet to minimize production cost."* International Journal of Clothing Science and Technology 11(5): 287-299.
- Ko, K.-C. and P. J. Egbelu (2003). *"Virtual cell formation."* International Journal of Production Research 41(11): 2365-2389.
- Kochikar, V. P. and T. T. Narendran (1998). *"Logical cell formation in FMS, using flexibility-based criteria."* International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10(2): 163-181.

- Kotabe, M. (1992). *"Global sourcing strategy : R&D, manufacturing, and marketing interfaces"*. New York, Quorum Books.
- Kusiak, A. (1992). *"Intelligent design and manufacturing"*. New York, Wiley.
- Lin, S., D. H. Kincade, C. Warfield (1995). *"An analysis of sewing systems with a focus on alabama apparel producers."* Clothing and Textiles Research Journal 3: 30-7.
- Lin, S.-H., M. A. Moore, D. Kincade, C. Avery (2002). *"Dimensions of apparel manufacturing strategy and production management."* International Journal of Clothing Science and Technology 14(1): 46-60.
- MacDuffie, J. P., K. Sethuraman, M. L. Fisher (1993). *"Product variety and manufacturing performance : evidence from the international automotive assembly plant study."* Cambridge, Mass., International Motor Vehicle Program Massachusetts Institute of Technology.
- Mak, K. L. and X. X. Wang (2002). *"Production scheduling and cell formation for virtual cellular manufacturing systems."* International Journal of Advanced Manufacturing Technology 20(2): 144-152.
- Masson-Jones, R., J. Naylor, D. Towil (2000). *"Engineering the agile supply chain."* International journal of agile manufacturing systems.
- McAuley, J. (1972). *"Machine grouping for efficient production."* Production Engineer 51: 53-57.
- Naylor, J. B., N. M. Naim, D. Berry (1999). *"Leagility : Integrating the lean and agile manufacturing paradigmes in the total supply chain."* Internationa Journal of Productions economics 62: 107-18.
- Prabhakaran, G., T. N. Janakiraman, M. Satchitanandam (2002). *"Manufacturing data-based combined dissimilarity coefficient for machine cell formation."* International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19(12): 889-897.
- R.S. Russell, P. Y. H., Y.Y. Leu (1991). *"A study of labor allocation strategies in cellular manufacturing."* Decision Sciences 22: 594-611.
- Rollins, R. P., K. Porter, D. Little (2003). *"Modelling the changing apparel supply chain."* Emerald 15(2): 140-156.

- Saaty, T. (1982). *"The Analytic Hierarchy process."* McGraw-Hill, New York.
- Sarker, B. R. and S. Mondal (1999). *"Grouping efficiency measures in cellular manufacturing: a survey and critical review."* International Journal of Production Research 37(2): 285-314.
- Sarker, B. R. and X. Yi (2000). *"Designing multi-product lines: job routing in cellular manufacturing systems."* IIE Transactions 32: 219-235.
- Schaller, J. E., S. S. Erenguec, A. J. Vakharia (1998). *"A methodology for integrating cell formation and production planning in cellular manufacturing."* Annals of Operations Research(77): 1.
- Schriber, T. J. (1987). *"The nature and role of simulation in the design of manufacturing systems, Simulation in CIM and artificial intelligence techniques."* Society for computing simulation: 5-18.
- Schroer, B. J., P. A. Farrington, J. J. Swain, D. R. Utley (1996). *"A generic simulator for modeling manufacturing modules."* Simulation Conference Proceedings, 1996. Winter.
- Selim, H. M., R. G. Askin, A. J. Vakharia (1998). *"Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research."* Computers & Industrial Engineering 34(1): 3-20.
- Solinger, L. (1988). *"Apparel Manufacturing Handbook, analysis, principles and Practice."* Columbia S. C.: Bobbin Media Corp.
- Su, C.-T. and C.-M. Hsu (1998). *"Multiobjective machine-part cell formation through parallel simulated annealing."* International Journal of Production Research 36(8): 2185-207.
- Suresh, N. L. and J. R. Meredith (1994). *"Coping with the loss of pooling synergy in Cellular Manufacturing Systems."* Management Science 40(4): 466-483.
- Suri, J. and S. De Treville (1986). *"Getting from 'Just-in-case' to 'Just-in-time': Insights from a simple model."* Journal of operations management 6: 295-304.

- Tatikonda, M. V. a. W., U. (1992). "*Adoption and implementation of group technology classification and coding systems: insights from seven case studies.*" International Journal of Production Research (IJPR) 30(9): 2087-2110.
- The [TC]2 Manufacturing, T. (1995). "*Workplace teams: What's in it for you.*" Bobbin 36(6): 48-52.
- Tunali, S. and S. Ozmehmet (2003). "*A decision support system for cell formation.*" International Journal of Manufacturing Technology and Management 17(2): 1001-9.
- Vakharia, A. J. and U. Wemmerlov (1990). "*Designing a Cellular Manufacturing System: A Materials Flow Approach Based on Operation Sequences.*" IIE transactions 22(1): 84.
- Vought, K. D. (1990). "*Total Productivity.*" Apparel manufacturer 2: 74-81.
- Wang, J., B. J. Schroer, M. C. Ziemke (1991). "*Understanding modular manufacturing in the apparel industry using simulation.*" Simulation Conference, 1991. Proceedings., Winter.
- Wei, J. C. and G. M. Kern (1989). "*Commonality analysis: a linear cell clustering algorithm for group technology.*" International Journal of Production Research 27(12): 2053-62.
- Wemmerlov, U. and N. L. Hyer (1989). "*Cellular manufacturing in the US.: A survey of users.*" International Journal of Production Research 27: 1511-1530.
- Wemmerlov, U. and D. J. Johnson (2000). "*Empirical findings on manufacturing cell design.*" International Journal of Production Research 38(3): 481-507.
- Wicks, E. M. and R. J. Reasor (1999). "*Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations.*" IIE Transactions 31(1): 11-20.
- Yasuda, K. and Y. Yin (2001). "*Dissimilarity measure for solving the cell formation problem in cellular manufacturing.*" Computers and Industrial Engineering 39(1-2): 1-17.