

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE
Laboratoire de Commande des Processus

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **Automatique**

Option : **Systèmes Intelligents de Commande et Robotique**

Présenté par

GHAZI Nawal

Ingénieur d'Etat en Automatique de l'UMMTO

Thème

Problème d'ordonnancement Open Shop dans un environnement d'atelier d'assemblage cyclique

Soutenu publiquement le 18/ 06/ 2007 devant le jury composé de :

M.S. BOUHRIT
M. BAKALEM
M. TADJINE
F. Boudjema
H. SAARI
D. BOUKHTALA

Professeur à l'ENP
Docteur à l'ENP
Professeur à l'ENP
Professeur à l'ENP
Maître de conférence à l'INSM, Bousmail
Maître de conférence à l'ENP

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

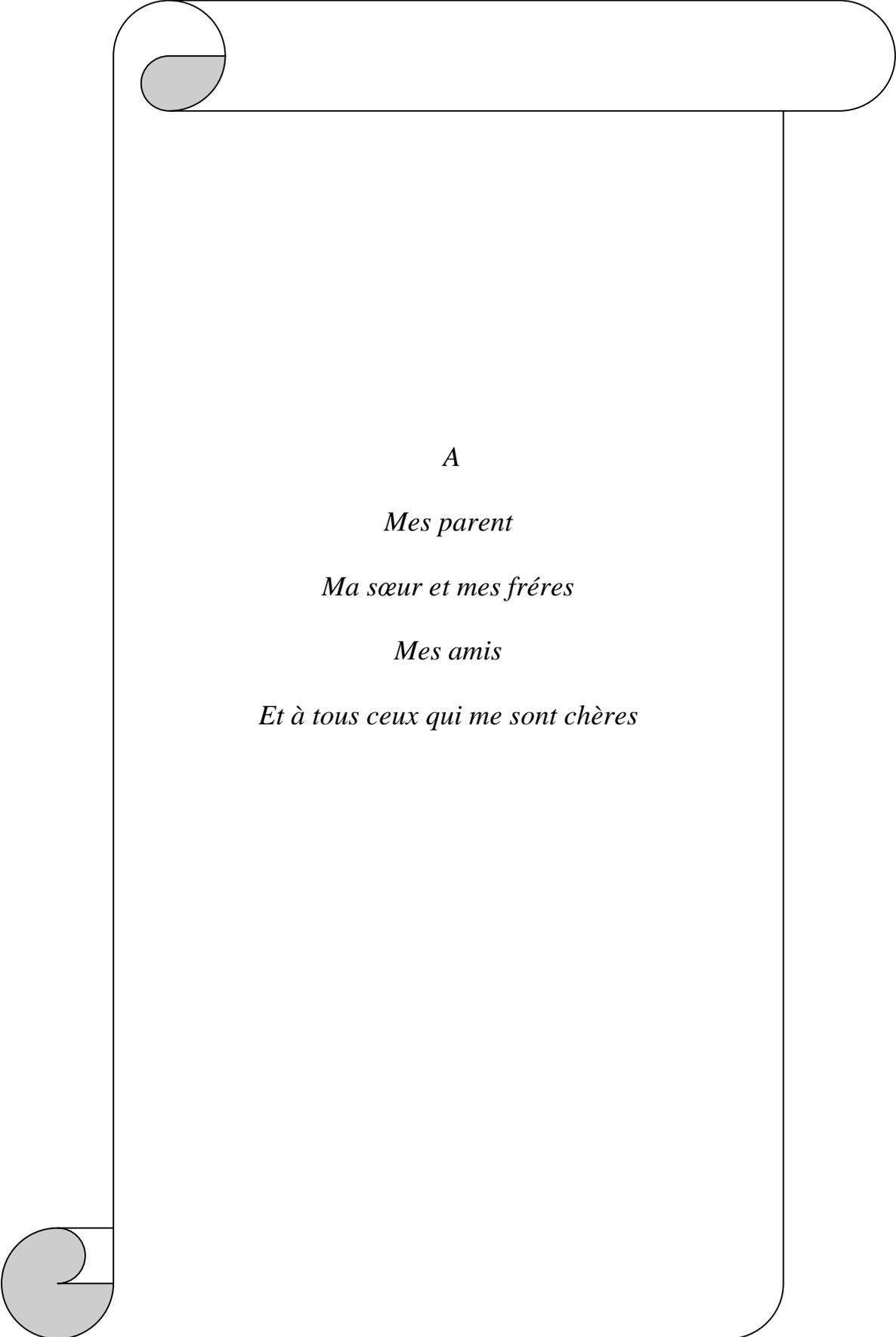
Je tiens à remercier mes promoteurs Mr M. BAKALEM et Mr M. TADJINE, pour leur disponibilité tout au long de mon travail, pour leurs précieux conseils et orientations ainsi que la mise en ma disposition documents et moyens.

J'exprime aussi ma profonde gratitude à Mr M.S. BOUCHRIT pour ses conseils et son aide précieuse durant l'élaboration de ce mémoire.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à Mr Z. SARI et Melle N. GAOUARE de l'université ABOUBAKAR BELKAID de TLEMCEM Pour avoir mis à ma disposition toute la documentation nécessaire.

Je remercie tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté de juger mon travail ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, Je remercie aussi tous mes amis et collègues qui m'ont soutenu et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.



A

Mes parent

Ma sœur et mes frères

Mes amis

Et à tous ceux qui me sont chères

Table des matières

TABLES DES MATIERES

Introduction générale et problématique.....	1
---	---

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes flexibles de production

1.1 – Introduction.....	7
1.2 – La production et le système de production.....	8
1.2.1 – La production.....	8
1.2.2 – Le système de production.....	8
1.2.3 – Décomposition du système de production.....	9
1.2.4 – Les caractéristiques des systèmes de production.....	10
1.2.4.1 – La Flexibilité.....	10
1.2.4.2 – La Réactivité.....	11
1.2.4.3 – La Proactivité.....	12
1.2.4.4 – La Robustesse.....	12
1.2.5 – L'évaluation des performances des systèmes de production.....	12
1.2.5.1 – Les mesures directes.....	14
1.2.5.2 – Les méthodes analytiques.....	14
1.2.5.3 – La simulation informatique.....	15
1.3 – Les Système Flexible de Production (SFP).....	16
1.3.1 – Les éléments des systèmes flexibles de production (SFP).....	17
1.3.1.1 – Les stations de travail.....	17
1.3.1.1.1 – Les machines.....	17
1.3.1.1.2 – Les palettes et supports.....	18
1.3.1.1.3 – Changeur automatique d'outil.....	18
1.3.1.1.4 – Magasin et chargement/déchargement des palettes.....	18
1.3.1.1.5 – Système automatique d'inspection.....	18
1.3.1.1.6 – Système de contrôle.....	18
1.3.1.2 – Les équipements de transport.....	19
1.3.1.2.1 – Les convoyeurs.....	20
1.3.1.2.2 – Les grues et palans.....	20
1.3.1.2.3 – Les véhicules industriels.....	20
1.3.1.2.4 – Les véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicles).....	20
1.3.1.2.5 – Les robots industriels.....	21
1.3.1.3 – Les systèmes de stockage.....	21
1.3.1.4 – Les systèmes de contrôle.....	22
1.3.1.5 – Les systèmes de communication.....	23
1.3.2 – Typologie de systèmes flexibles de production.....	24
1.3.2.1 – Un SFM.....	24
1.3.2.2 – Un FMC.....	24
1.3.2.3 – Un MMFMS.....	24
1.3.3 – Les différentes topologies des SFP.....	24
1.4 – Typologie des processus d'assemblage.....	26
1.4.1 – Assemblage par kits.....	27
1.4.2 – Assemblage par <i>Rendez-vous</i>	27
1.4.3 – Assemblage par <i>Pièce maîtresse</i>	27
1.5 – Analyse fonctionnelle et description technologique des lignes d'assemblages multiproduits à transfert asynchrone automatisé.....	28
1.5.1 – Fonction ransfert.....	29
1.5.1 – Description des solutions technologiques utilisées pour cette fonction.....	29
1.5.1.1 – Palette.....	29
1.5.1.1.1 – Les palettes motorisées.....	30
1.5.1.1.2 – Les palettes libres.....	30
1.5.1.2 – les butées.....	33
1.5.1.3 – les indexages.....	33

1.5.1.4 – les aiguillages et dérivations	34
1.5.2 – Fonction <i>Assembler</i>	34
1.5.2.1 – Description de la sous-fonction <i>stocker</i>	35
1.5.2.2 – Description de la sous-fonction <i>Alimenter</i>	36
1.5.2.3 – Description de la sous-fonction <i>Manipuler</i>	37
1.5.3 – Fonction <i>Charger/Décharger</i>	38
1.6 – Conception et remodelage d’ateliers	39
1.6.1 – Formulation classique du problème de conception.....	40
1.6.2 – Méthodes de résolution des problèmes de conception.....	41
1.6.2.1 – Approches classiques de résolution monocritère du problème de conception d’ateliers.....	41
1.6.2.1.1 – Approches déterministes.....	41
1.6.2.1.2 – Approches stochastiques.....	42
1.6.3.2 – Méthodes d’optimisation multiobjectifs.....	43
1.6 – Conclusion.....	44

Chapitre 2 : Généralités sur le pilotage des SFP et sur l’Ordonnancement Open Shop

2.1 – Introduction.....	45
2.2 – Pilotage des systèmes de production.....	45
2.3 – Décomposition de la fonction de pilotage.....	47
2.4 – La conduite des systèmes de production	47
2.5 – Les problèmes d’ordonnancement	49
2.5.1 – Définitions.....	50
2.5.2 – Problématique de l’ordonnancement.....	51
2.5.3 – Objectifs de l’ordonnancement.....	51
2.5.4 – Éléments fondamentaux d’un problème d’ordonnancement d’ateliers.....	53
2.5.4.1 – Les tâches.....	53
2.5.4.2 – Les opérations.....	53
2.5.4.3 – Les ressources.....	53
2.5.4.4 – Les contraintes.....	54
2.5.5 – Propriétés des ordonnancements.....	54
2.5.6 – Les critères de performances et leur évaluation.....	55
2.5.6.1 – Définitions	55
2.5.6.2 – Classification des critères de performance.....	56
2.5.6.2.1 – Les critères basés sur la date d’achèvement.....	56
2.5.6.2.2 – Les critères basés sur la date de livraison.....	56
2.5.6.2.3 – Les critères basés sur les volumes des en-cours.....	57
2.5.6.2.4 – Les critères basés sur l’utilisation des ressources.....	58
2.5.6.3 – Propriétés des critères.....	58
2.5.6.4 – Relation entre les critères	59
2.5.7 – Classification des problèmes d’ordonnancement.....	60
2.5.8 – Les approches de résolution.....	61
2.5.8.1 – Ordonnancement statique	61
2.5.8.1.1 – Les méthodes exactes.....	62
2.5.8.1.1.1 – Les méthodes de potentiels	62
2.5.8.1.1.2 – Les procédures par séparation et évaluation (Branch & Bound).....	62
2.5.8.1.1.3 – La programmation dynamique.....	63
2.5.8.1.1.4 – La programmation linéaire.....	64
2.5.8.1.2 – Les méthodes heuristiques ou méthodes approchées.....	64
2.5.8.1.2.1 – Génération d’ordonnancement par règles de priorité (Les algorithmes de liste ou aussi règles d’ordonnancement)	65
2.5.8.1.2.2 – Les approches constructives.....	66
2.5.8.1.2.3 – Les approches de recherche locale.....	67
2.5.8.1.2.4 – Les approches par décomposition.....	67
2.5.8.1.2.5 – Les approches par relaxation et changement de modèle.....	68
2.5.8.1.2.6 – Les approches évolutives.....	68
2.5.8.2 – Contexte dynamique.....	69
2.6 – Les organisations d’ateliers	69
2.6.1 – Relations entre organisations.....	70
2.7 – Les ateliers Open Shop.....	71

2.7.1 – Définition	71
2.7.2 – Méthodes de résolution existantes	72
2.7.3 – Quelques méthodes de résolution existantes	73
2.7.3.1 – Heuristiques de liste classiques	73
2.7.3.1.1 – LPT (Longest Processing Time)	75
2.7.3.1.2 – SPT (Shortest Processing Time)	75
2.7.3.2 – LAPT (Longest Alternate Processing Time first).....	75
2.7.4 – Résultats de complexité	76
2.8 – Conclusion.....	78

Chapitre 3 : Modélisation du système d'assemblage

3.1 – Introduction.....	81
3.2 – Simulation des systèmes de production.....	82
3.2.1 – Définitions et concepts de la simulation	82
3.2.2 – La modélisation des systèmes de production pour la simulation.....	84
3.2.3 – Avantages et limites de la simulation.....	86
3.2.3.1. – Avantages de la simulation.....	86
3.2.3.2– Limites de la simulation.....	87
3.2.3.2.1 – Limites liées à la modélisation.....	87
3.2.3.2.2 – Limites liées à l’outil informatique.....	89
3.2.4 – Les étapes d’un processus de simulation	90
3.3 – La modélisation par approche processus (Process Interaction).....	94
3.4 – Le modèle Arena pour un atelier de production	97
3.4.1 – Structure du logiciel ARENA 7.1.....	98
3.4.2 – Modéliser avec Arena 7.1	99
3.4.2.1 – Modélisation statique des systèmes de production	99
3.4.2.2 – Modélisation dynamique des systèmes de production (Animation du modèle).....	100
3.5 – Rappel du problème étudié	101
3.6 – Mise en œuvre du processus de simulation.....	102
3.6.1 – Formulation du problème	102
3.6.2 – Identification et collecte de données.....	103
3.6.3 – La construction du modèle (la modélisation).....	103
3.6.3.1 – Analyse du système d’assemblage (présentation de la cellule de production)	103
3.6.3.2 – Modélisation logicomathématique	105
3.6.3.3 – Modélisation de l’évolution de la cellule.....	105
3.6.3.4 – Modélisation par l’approche processus du système de production.....	107
3.6.3.4.1 – Identification des entités	107
3.6.3.4.2 – Identification des processus	107
3.6.3.4.3 – Identification des ressources.....	107
3.6.3.4.4 – Identification des variables	107
3.6.4 – La transcription informatique du modèle par ARENA 7.1.....	108
3.6.4.1 – Modélisation statique de l’atelier d’assemblage.....	109
3.6.4.1.1 – Modélisation de l’entrée du système : Création des pièces et leurs entrées.....	109
3.6.4.1.2 – Modélisation d’une station	110
3.6.4.1.3 – Modélisation de la sortie de la cellule d’assemblage.....	112
3.6.4.2 – Modélisation Dynamique de la cellule d’assemblage.....	112
3.6.5 – Vérification du modèle.....	115
3.7– Conclusion.....	115

Chapitre 4 : Simulation et tests des différentes stratégies d’ordonnancement proposées

4.1 – Introduction.....	117
4.2 – La planification stratégique et tactique de la simulation.....	117
4.2.1 – Le choix d’une configuration	119
4.2.2 – Le plan d’expérimentation	119
4.2.3 – Les indicateurs de performance à analyser	122
4.3 – Analyse et interprétation des résultats.....	124
4.3.1 – Analyse des temps d’assemblage d’une commande de pièces : minimisation du Cmax.....	125
4.3.2 – Analyse des temps de séjour moyens des pièces dans la cellule d’assemblage.....	128
4.3.2.1 – Taux d’amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT.....	128

4.3.2.2 – Taux d’amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LPT.....	130
4.3.2.3 – Taux d’amélioration des temps de séjour des pièces par la règle LWKR1.....	132
4.3.2.4 – Taux d’amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR2.....	133
4.3.2.5 – Taux d’amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR1.....	135
4.3.2.6 – Taux d’amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR2.....	136
4.3.2.7 – Etude de la phase de démarrage.....	139
4.3.3 – Analyse des temps de transfert moyen des pièces dans la cellule d’assemblage.....	140
4.3.3.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3	140
4.3.3.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	141
4.3.3.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	141
4.3.3.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	142
4.3.3.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	142
4.3.4 – Analyse du nombre de cycles des pièces dans la cellule.....	143
4.3.5 – Analyse des temps d’attente moyens des pièces dans les files d’attente d’entrée.....	144
4.3.5.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	144
4.3.5.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	145
4.3.5.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	145
4.3.5.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	146
4.3.5.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	147
4.3.6 – Nombre moyen des pièces en attente dans les files d’attente d’entrée.....	148
4.3.6.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3	148
4.3.6.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	149
4.3.6.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	149
4.3.6.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10	150
4.3.6.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	151
4.3.7 – Comparaison entre les taux d’amélioration des temps d’attente et des temps de transfert par rapport aux taux d’amélioration des temps de séjour.....	152
4.3.7.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	153
4.3.7.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	153
4.3.7.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5	153
4.3.7.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	154
4.3.7.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	154
4.3.8 – Taux d’amélioration des taux d’utilisation des robots.....	155
4.3.8.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	155
4.3.8.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	155
4.3.8.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	156
4.3.8.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	156
4.3.8.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	157
4.4 – Conclusion.....	157
Conclusion générale	159
Références bibliographiques	162
Annexes	168
Annexe 1 : Glossaire.....	169
Annexe 2 : Approche de modélisation.....	177
Annexe 3 : Les Fonctions RockWell Arena 7.1.....	180
Annexe 4 : Le programme.....	187
Annexe 5 : Le plan d’expérimentation.....	192

FIGURES

Figure 1.1 : Représentation d'un système de production [Bak96].....	10
Figure 1.2 : Topologie circulaire (en boucle).....	25
Figure 1.3 : Un réseau circulaire unidirectionnel.....	25
Figure 1.4 : Topologie en plusieurs lignes et colonnes.....	25
Figure 1.5 : Topologie linéaire.....	26
Figure 1.6 : Topologie linéaire en deux lignes.....	26
Figure 1.7 : Fonctions générales d'une ligne d'assemblage [Fon99].....	29
Figure 1.8 : Fonction TRANSFERER d'une ligne d'assemblage.....	29
Figure 1.9 : Exemple de palette avec un posage.....	29
Figure 1.10 : Exemple d'entraînement à palette motorisée [Fon99].....	30
Figure 1.11 : Exemple d'entraînement par palette libres.....	30
Figure 1.12 : Exemple d'architecture de ligne ouverte.....	31
Figure 1.13 : Exemple d'architecture de ligne fermée.....	31
Figure 1.14 : Exemple d'architecture de ligne à une piste avec postes en série.....	32
Figure 1.15 : Exemple d'architecture à une seule piste et postes en dérivation.....	32
Figure 1.16 : Exemple d'architecture à deux pistes et postes en dérivation.....	33
Figure 1.17 : Exemple de butée.....	33
Figure 1.18 : Exemple d'indexage.....	34
Figure 1.19 : Exemple de poste en dérivation (Fon99).....	34
Figure 1.20 : Fonction <i>Assembler</i>	34
Figure 1.21 : Analyse détaillée de la fonction <i>Assembler</i> [Fon99].....	35
Figure 1.22 : La fonction <i>stocker</i>	35
Figure 1.23 : Exemple de distributeur flexible assisté par vision.....	36
Figure 1.24 : La fonction <i>Alimenter</i>	36
Figure 1.25 : La fonction <i>Manipuler</i>	37
Figure 1.26 : La fonction <i>Charger/Décharger</i>	38
Figure 1.27 : Approche décisionnelle multiniveaux en conception et ordonnancement de procédés [Die04].....	39
Figure 1.28 : Approche classique pour la conception d'ateliers [Ded01].....	41
Figure 2.1 : les fonctions de pilotage.....	47
Figure 2.2 : Le modèle conceptuel du système de décision [Dra98].....	48
Figure 2.3 : Structure d'objectifs [Gra98].....	52
Figure 2.4 : Typologie par les ressources des problèmes d'ordonnancement.....	54
Figure 2.5 : Diagramme de Venn [Our01].....	55
Figure 2.6 : Les relations entre les critères d'optimisation.....	59
Figure 2.7 : Algorithme évolutionnistes selon [Bac97].....	69
Figure 2.8 : Schéma montrant les liens entre diverses organisation.....	71
Figure 2.9 : Algorithme 1 (Structure générale d'un algorithme de liste (cas sans retard) [Gue97].....	73
Figure 2.10 : Algorithme 2 (Algorithme de liste LPT) [Gue79].....	75
Figure 3.1 : Le processus classique de conception de système automatisé de production en utilisant la simulation [Cas04].....	84
Figure 3.2 : Processus simplifié de simulation.....	90
Figure 3.3 : Processus de simulation selon Pritsker [Hab01].....	92
Figure 3.4 : Le cheminement d'une palette à travers la cellule d'assemblage.....	104
Figure 3.5 : Modélisation du système cyclique d'assemblage.....	105
Figure 3.6 : Entrée des pièces dans la cellule.....	109
Figure 3.7 : Modélisation de l'entrée d'une station.....	110
Figure 3.8 : Modélisation de la station (FAE, Robot, FAS).....	111
Figure 3.9 : Modélisation de la sortie d'une station.....	112
Figure 3.10 : Sortie de l'atelier.....	112
Figure 3.11 : La représentation graphique de la cellule par Arena.....	113
Figure 3.12 : a. Station, b. file d'attente d'entrée des stations : Queue, c. file d'attente de sortie des stations : Storage.....	113
Figure 3.13 : La représentation graphique des robots.....	113
Figure 3.14 : modélisation des Palettes par des transporteurs.....	114
Figure 3.15 : modélisation d'un tronçon du circuit par <i>Distances</i>	114
Figure 3.16 : le système en plein évolution.....	114

Figure 4.1 : Lecture des graphes.....	124
Figure 4.2 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle SPT.....	125
Figure 4.3 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LPT.....	125
Figure 4.4 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LWKR1.....	125
Figure 4.5 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LWKR2.....	126
Figure 4.6 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle MWKR1.....	126
Figure 4.7 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle MWKR2.....	126
Figure 4.8 : Moyenne des taux de séjours d'une commande dans la cellule.....	127
Figure 4.9 : Les taux de nombre des cas améliorés	128
Figure 4.10 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	129
Figure 4.11 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4	129
Figure 4.12 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	129
Figure 4.13 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	129
Figure 4.14 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	129
Figure 4.15 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours Moyens des pièces par la règle SPT.....	130
Figure 4.16 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	130
Figure 4.17 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	130
Figure 4.18 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5	131
Figure 4.19 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10	131
Figure 4.20 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	131
Figure 4.21 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT.....	131
Figure 4.22 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	132
Figure 4.23 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	132
Figure 4.24 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	132
Figure 4.25 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	132
Figure 4.26 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	133
Figure 4.27 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR1 par rapport à la capacité des FAEs.....	133
Figure 4.28 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	133
Figure 4.29 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	134
Figure 4.30 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	134
Figure 4.31 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	134
Figure 4.32 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	134
Figure 4.33 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2.....	135
Figure 4.34 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 3.....	135
Figure 4.35 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 4.....	135

Figure 4.36 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 5.....	135
Figure 4.37 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 10.....	136
Figure 4.38 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 20.....	136
Figure 4.39 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR1.....	136
Figure 4.40 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	137
Figure 4.41 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4.....	137
Figure 4.42 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	137
Figure 4.43 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10.....	137
Figure 4.44 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20.....	137
Figure 4.45 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR2.....	138
Figure 4.46 : Moyennes et écart type des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces dans la cellule par les règles d'ordonnancement (pour les quatre types de pièces confondus).....	138
Figure 4.47 : Moyenne et écart type des taux d'amélioration des temps de séjours des premières pièces sorties de la cellule	139
Figure 4.48 : Moyenne des moyennes des taux d'amélioration des temps de séjours des premières et dernières pièces sorties de la cellule	140
Figure 4.49 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est 3.....	141
Figure 4.50 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4	141
Figure 4.51 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 5.....	141
Figure 4.52 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 10	142
Figure 4.53 : Moyenne des moyennes des taux d'amélioration des temps de transferts moyens.....	143
Figure 4.54 : la moyenne du nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule.....	143
Figure 4.55 : La moyenne des taux d'amélioration du nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule...143	143
Figure 4.56 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 3.....	144
Figure 4.57 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnancement.....	144
Figure 4.58 : Moyenne des taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 4.....	145
Figure 4.59 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnancement.....	145
Figure 4.60 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 5.....	144
Figure 4.61 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAE dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnancement.....	146
Figure 4.62 : Moyenne des temps d'attente moyens des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 10.....	146
Figure 4.63 : Taux d'amélioration (en moyenne) des temps d'attente moyens des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 10.....	146
Figure 4.64 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 20.....	147
Figure 4.65 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 20.....	147
Figure 4.66 : Moyenne des taux d'amélioration des temps moyens d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement	148
Figure 4.67 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnancement	148

Figure 4.68 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnancement.....	148
Figure 4.69 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnancement.....	149
Figure 4.70 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnancement.....	149
Figure 4.71 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnancement.....	149
Figure 4.72 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnancement.....	150
Figure 4.73 : Moyenne des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 10 par les règles d'ordonnancement.....	150
Figure 4.74 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 10 par les règles d'ordonnancement.....	150
Figure 4.75 : Moyenne des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 20 par les règles d'ordonnancement.....	151
Figure 4.76 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 20 par les règles d'ordonnancement.....	151
Figure 4.77 : Moyenne des Moyennes des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs	152
Figure 4.78 : taux d'amélioration des Moyennes des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs ...	152
Figure 4.79 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 3 par les règles d'ordonnancement.....	153
Figure 4.80 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 4 par les règles d'ordonnancement.....	153
Figure 4.81 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 5 par les règles d'ordonnancement.....	154
Figure 4.82 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 10 par les règles d'ordonnancement.....	154
Figure 4.83 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 20 par les règles d'ordonnancement.....	154
Figure 4.84 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement de dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3.....	155
Figure 4.85 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAE est de 4.....	156
Figure 4.86 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAE est de 5.....	156
Figure 4.87 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAE est de 10.....	156
Figure 4.88 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAE est de 20.....	157

TABLEAUX

Tableau 4.1 : Les distances entre stations.....	119
Tableau 4.2 : résumé du plan d'expérimentation contenu dans l'annexe 5.....	121
Tableau A3.1 : Les Modules SIMAN (Blok et Elements).....	180
Tableau A3.2 : Les Modules d'ARENA 7.1.....	183
Tableau A5.1 : Le plan d'expérimentation.....	192
Tableau A5.2 : Les durées opératoires.....	206

Introduction générale

L'évolution du monde industriel est continue. Elle est fonction des besoins croissants et variés des clients, et doit répondre à l'augmentation de la compétitivité inhérente à la mise en œuvre de l'économie. Désormais, le modèle des Systèmes de Production (SP) centralisés n'a plus la place stratégique qu'il occupait dans les anciens contextes industriels car il doit pouvoir supporter un processus de fabrication flexible, réactif et économique. La flexibilité dont il est question ici, se traduit par une facilité de réadaptation et de réaffectation des fabrications variant dans le temps, et ceci de manière compétitive. Ainsi, les systèmes de production correspondants doivent être associés à des systèmes de pilotage adaptables et autonomes. Ces derniers doivent rester ouverts, c'est-à-dire évolutifs et capables de supporter de manière dynamique une reconfiguration ou un réajustement des paramètres opérationnels tant au niveau du produit, du procédé que du marché.

Les entreprises industrielles sont des systèmes complexes, décomposables en plusieurs fonctions essentielles, toutes interdépendantes. Parmi toutes ces fonctions, la fonction production occupe, du moins dans les entreprises de transformation, une place essentielle. C'est en effet la fonction générant le plus directement la valeur ajoutée par transformation de matière et/ou assemblage de composants. Elle conduit ainsi à la création du produit fini propre à la distribution vers le (les) client(s) de l'entreprise.

De manière générale, on peut décomposer un système flexible de production en deux parties complémentaires : la partie opérative qui désigne le flux matériel et la partie pilotage qui traite le flux informationnel.

Le développement des systèmes de production automatisés, associés à des outils de supervision (C'est-à-dire les systèmes flexibles de production) a conduit à l'émergence de la fonction pilotage de l'unité de production. Piloter l'unité, c'est d'une part communiquer au système de commande un ensemble de paramètres lui permettant de fonctionner et d'autre part réagir à la réponse du système ainsi qu'aux aléas. Le réglage des valeurs de ces paramètres résulte d'un ensemble de décisions. Ce réglage va souvent avoir des conséquences importantes sur l'efficacité du comportement de l'unité.

Un processus de production peut être vu comme une alternance d'opérations de production, effectuées sur des postes de travail et d'opérations de transport des produits entre ces postes de travail. Ces opérations de transport sont importantes. Elles sont souvent déterminantes pour la qualité de fonctionnement du système. L'étude des systèmes de transfert automatisés s'est beaucoup développée avec l'apparition des Systèmes Flexibles de Production (SFP). Dans ce présent travail on se propose d'étudier un problème d'ordonnancement du type Open Shop dans un environnement d'un système de production flexible dont le moyen

de transport est un convoyeur en boucle. Nous nous intéresserons aux interactions entre les différentes palettes circulant sur le convoyeur à accumulation en essayant d'optimiser leurs parcours à travers le système sans ignorer les temps de transport des pièces entre machines. Cette étude est basée essentiellement sur la minimisation des temps de séjour des pièces dans le système.

Une pièce est obtenue par transformations successives sur un sous-ensemble des stations du système. L'ordre dans lequel les stations sont visitées par une pièce est appelé routage. Dans la pratique, les routages sont choisis de façon à équilibrer les charges des stations, et ce choix est fait avant de résoudre le problème d'ordonnancement que nous posons ici. Si l'on ajoute au routage les temps de passage des pièces sur les machines, on dit que l'on connaît la gamme de fabrication des pièces. Lorsque le routage est le même pour toutes les pièces à fabriquer, on dit que l'on a affaire à une production linéaire, ou Flow Shop. Dans le cas contraire, on parle de production non linéaire, ou Job Shop, et si en plus il n'est pas connu on parle alors d'Open shop. C'est à ce dernier type de production auquel nous nous intéressons dans le cadre de ce mémoire.

Historiquement, la structure des ateliers (lignes d'assemblage) a imposé des contraintes de précedence dues au flux des produits entre les machines, ce qui a favorisé les recherches sur le Flow Shop et le Job Shop. En fait, avec le développement des cellules flexibles de nombreuses contraintes de précedence disparaissent d'une part parce que le produit n'est plus déplacé d'un poste à l'autre et d'autre part parce que des opérations deviennent exécutables sans ordre précis, voire en parallèle. Ainsi, les problèmes d'Open Shop existent bien, et ils ont même tendance à être de plus en plus répandus.

Une étude sur l'apport d'un arrangement circulaire aux performances des lignes d'assemblage linéaires a été effectuée par Finke et Dupont [Fin93]. Ils ont conclu que les performances d'un système d'assemblage cyclique sont conditionnées par le robot goulot et que son pilotage par des plans non linéaires (Job Shop) n'apportait aucune amélioration aux performances du système, mais que l'intérêt est dans la manipulation des plans d'assemblage ouverts d'où l'acquisition d'une flexibilité dans l'ordre de passage des tâches (l'*Open Shop*) où chaque ordre des opérations d'assemblage est possible. Ils ont montré que l'apport d'une combinaison plans non linéaire-pilotage FIFO à la performance du système est insignifiant (inférieur à 5%).

A partir de ces constats, on se propose d'étudier le comportement d'un tel système géré par des plans non linéaires et non prédéterminés combinés à un ordonnancement par règle de priorité. Dans ce cas, en plus de la détermination de l'ordre de passage des travaux sur chaque

machine (ce qui constitue un problème d'ordonnancement) nous devons aussi déterminer l'ordre de passage sur les machines pour chaque travail c'est-à-dire les routages. L'objectif est de trouver différentes stratégies d'ordonnancement et d'analyser leurs impacts sur les performances du système.

Le système étudié est une cellule flexible d'assemblage dont les stations sont conçues autour d'un convoyeur en boucle avec accumulation. Nous voulons tester si un ordonnancement plus judicieux (basé sur des règles de priorité) au niveau des postes nous permettra de réduire le temps de séjours ou le cycle d'un produit dans la cellule. Voir même, si la capacité des files d'attente peut influencer sur ces temps de séjour.

Le problème d'ordonnancement que nous nous proposons d'étudier est du type Open Shop ou à cheminements libre et notre fonction objectif est la minimisation du temps total de séjours $O|\tau_j|F$.

Vu la complexité des problèmes Open Shop, notre approche de résolution est une approche purement empirique. C'est-à-dire, notre étude est établie sur un programme expérimental pré-généré. Pour ce faire nous avons optés pour un outil d'aide à la décision à savoir la simulation.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres. Dans les deux premiers chapitres, nous aborderons toutes les notions élémentaires nécessaires à notre étude. Les deux derniers chapitres sont consacrés à la partie pratique de ce mémoire.

Le premier chapitre est consacré à la partie physique du système de production et plus précisément aux systèmes flexibles de production (SFP). Dans la première section, nous présentons la production et le système de production ainsi que les différentes représentations de ce dernier et ces caractéristiques. La dernière sous-section est consacrée à l'évaluation des performances d'un système de production et aux méthodes utilisées. La seconde section est consacrée à la description détaillée des SFP : leurs différentes composantes ainsi que leurs différentes typologies et topologies tel c'est proposée par N. Brauner et al. [Bra05]. Dans les deux sections suivantes, l'étude est recentrée sur les processus d'assemblage et sur les systèmes physiques permettant de les mettre en œuvre et notamment les lignes d'assemblage multiproduits à transfert asynchrone automatisé (au quels le système étudiée appartient). Dans la troisième section, nous présenterons une typologie des processus d'assemblage basée sur le mode d'approvisionnement ou de synchronisation des composants. Dans la quatrième section, nous développons un modèle d'analyse fonctionnelle d'une ligne d'assemblage multiproduit à transfert asynchrone. Parallèlement à l'analyse fonctionnelle, des exemples de solutions technologiques correspondant à ces fonctions sont présentés afin d'illustrer plus clairement la

structure physique d'un tel système. La cinquième et dernière section, est consacrée à la conception et remodelage d'ateliers car pour mieux gérer et faire des profits il faut d'abord bien concevoir ou remodeler dans le cas des systèmes existant déjà.

Le deuxième chapitre est consacré à la partie pilotage des systèmes de production et plus précisément à l'ordonnancement. Dans ce chapitre, nous visons à situer la fonction pilotage et ses sous-fonctions dans le contexte des fonctions de production tout en respectant le lien hiérarchique entre elles. La première section est consacrée à la fonction pilotage. Dans la seconde section, nous nous intéressons de plus près à l'une des sous-fonctions du pilotage c'est la fonction conduite du système afin d'introduire la fonction ordonnancement qui représente l'un des points essentiels de notre étude. Sachant qu'elle permet à la fois l'optimisation de l'utilisation des ressources et la réactivité de l'atelier, elle est l'un des points clés de la rentabilité du système manufacturier. La troisième section, est dédiée aux généralités sur l'ordonnancement en l'entamant par certains concepts et définitions. La problématique de l'ordonnancement sera ainsi abordée. Nous nous sommes intéressés par la suite aux différentes classes d'ordonnancement, les éléments fondamentaux d'un problème d'ordonnancement, ses objectifs, ses différentes classifications et en fin, ses différentes méthodes de résolution. Dans la quatrième et dernière section, nous abordons les différentes organisations d'ateliers afin d'introduire le cas qui nous intéresse : l'Open Shop. La quatrième section est consacrée aux ateliers Open Shop, ou nous aborderons quelques méthodes de résolutions basées sur les algorithmes de liste et la complexité des problèmes Open Shop. Ce dernier point, nous a incité à aborder notre problème par une approche empirique moyennant la simulation.

Les deux derniers chapitres sont consacrés à l'étude et la modélisation du problème déjà énoncée c'est-à-dire à la partie pratique de ce mémoire. Le processus de simulation suivit est celui de Pritsker [Pri86]. Pour ce faire, nous commencerons par la construction du modèle représentatif de la cellule et de son fonctionnement ; Ainsi le troisième chapitre lui est consacré.

Dans le souci de garder un déroulement logique, nous aborderons le troisième chapitre par une introduction à la simulation des systèmes de production. Nous y abordons, dans la première section, la définition et le concept de la simulation, son application au domaine de la production, ses objectifs, apports et limites, modélisation et les étapes d'un processus de simulation telles présentées par Pritsker [Pri86]. La seconde section est consacrée à la modélisation des systèmes de production par l'approche privilégiée par le logiciel retenu pour

cette étude (ARENA 7.1), c'est l'approche par processus (Process Interactions). La troisième section est consacrée à la présentation du logiciel utilisé RockWell ARENA 7.1. La quatrième section est un rappel du problème étudié. La dernière section de ce chapitre est consacrée à la description de la mise en œuvre des cinq premières étapes du processus de simulation. La première sous-section est consacrée à la position des hypothèses de simulation. Dans la deuxième sous-section, nous aborderons la construction du modèle. La troisième sous-section est consacrée à la phase de transcription informatique du modèle (statique et dynamique). La dernière sous-section est consacrée à la vérification du modèle. Sachant que les étapes du processus de simulation ne sont pas rigoureusement séquentielles, l'étape d'identification et de collecte des données s'est faite au fur et à mesure que nous détaillions l'analyse de la cellule d'assemblage et de son fonctionnement.

Dans le quatrième chapitre, nous procédons à l'application des étapes restantes du processus de simulation c'est-à-dire la planification stratégique et tactique de la simulation, son exécution selon l'étape précédente et en fin l'analyse et l'interprétation des résultats. Selon ces étapes, La première section du chapitre est consacrée à l'élaboration d'un plan de simulation. La seconde section est consacrée à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. La troisième et dernière section est une conclusion générale sur l'apport de cette étude.

Ce mémoire est accompagné de cinq annexes : La première est un glossaire, la seconde est un résumé de quelques approches de simulation (citées dans le chapitre 3), la troisième est une présentation des modules RockWell ARENA 7.1, la quatrième contient le programme de simulation et en fin, la cinquième contient le plan d'expérimentation et les durées opératoires utilisées.

Nous concluons ce mémoire par une conclusion générale, dans laquelle nous développons des perspectives selon les résultats obtenus par notre travail.

Chapitre 1 :

Généralités sur les systèmes flexibles de production

1.1 – Introduction

La globalisation des marchés et la compétition portée au niveau mondial ont imposé aux entreprises de miser de plus en plus sur la souplesse de leur fonction de production pour se démarquer de la concurrence par une réactivité de plus en plus accrue. Les pressions toujours grandissantes de réduction des délais de livraison et de la taille des lots de livraison obligent ces dernières à opter pour de nouveaux systèmes de production, tels que les systèmes flexibles de production. Ce type de système permet d'améliorer la productivité et d'accroître la rentabilité dans des conditions de production plus diversifiées et en petites séries.

Ce chapitre est consacré à la partie physique du système de production et plus précisément aux systèmes flexibles de production (SFP).

Dans la première section, nous présentons la production et le système de production ainsi que les différentes représentations de ce dernier et ces caractéristiques. La dernière sous-section est consacrée à l'évaluation des performances d'un système de production et aux méthodes utilisées. La seconde section est consacrée à la description détaillée des FMS : leurs différentes composantes ainsi que leurs différentes typologies et topologies.

Dans les deux prochaines sections, nous recentrons l'étude sur les processus d'assemblage et sur les systèmes physiques permettant de les mettre en œuvre et notamment les lignes d'assemblage multiproduits à transfert asynchrone automatisé (dont fait partie le système étudiée). Dans la troisième section, nous présenterons une typologie des processus d'assemblage basés sur le mode d'approvisionnement ou de synchronisation des composants. Dans la quatrième section, nous présenterons un modèle d'analyse fonctionnelle d'une ligne d'assemblage multiproduits à transfert asynchrone. Parallèlement à l'analyse fonctionnelle, des exemples de solutions technologiques correspondant à ces fonctions sont présentés afin d'illustrer plus clairement la structure physique d'un tel système.

La cinquième section est consacrée à la conception et remodelage d'ateliers car pour mieux gérer et faire des profits il faut d'abord bien concevoir ou remodeler dans le cas des systèmes existant déjà.

1.2 – La production et le système de production

1.2.1 – La production

La *production* est la transformation de ressources (matières) conduisant à la création de biens ou de services [Gia88].

La transformation s'effectue par une succession d'opérations qui utilisent des ressources (machines et opérateurs) et modifient les matières premières ou composants entrant dans le système de production afin de créer les produits finis sortant de ce système et destinés à être consommés par des clients. Les modifications peuvent porter sur la forme du produit, sa structure, son apparence, etc. La transformation subie par les produits leur procure de la valeur ajoutée. Les ressources appartenant au système de production mobilisées pour réaliser l'activité de production peuvent être des machines, des opérateurs, de l'énergie, des informations, des outillages...

Une des fonctions importantes du système de production est la fabrication elle-même du produit fini, mais son bon déroulement nécessite la mise en œuvre de fonctions additionnelles telles que les achats des composants et matières premières, la distribution du produit fini, la gestion de la qualité des composants et du produit ou la maintenance des différentes ressources interviennent aussi de manière importante.

Il existe plusieurs types des systèmes de production, utilisant des critères divers, comme par exemple :

- La nature de la production : elle peut être une production de service, d'usinage de montage,...
- le mode de production : il existe principalement trois modes discret, continu et hybride.
- le type de la production : elle peut être de trois types, par lot, unitaire ou en masse.
- la nature de la demande : elle peut être soit sur demande ou bien sur stock.

1.2.2 – Le système de production

Un système de production est un ensemble de ressources réalisant une activité de production [Gia88].

Sous ce terme, on distingue le dispositif physique utilisé pour fabriquer l'ensemble des produits proposés par l'entreprise. Il regroupe généralement de nombreux éléments [Hax83].

1.2.3 – Décomposition du système de production

Les systèmes de production peuvent être des systèmes très complexes et difficiles à gérer au vu de toutes leurs composantes fonctionnelles (fabrication, achat, distribution, maintenance...). De ce fait, ils sont beaucoup étudiés, et ce depuis longtemps. Plusieurs approches ont été envisagées dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement et de mieux les appréhender.

D'une manière classique, tout système de production est décomposé selon une approche systémique en plusieurs sous systèmes afin de faciliter la maîtrise de la complexité associée à la fonction production. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposés différentes décompositions.

D'un point de vue systémique [Bra94], [Lem90], le système de production représente le système opérant du système « entreprise manufacturière ». Selon ce point de vue [Lem90], il est classique de décomposer le système *entreprise* en trois sous-systèmes qui coopèrent :

- § *Le système physique* représente le système opérant du système de production ;
- § *Le système d'information* permet l'acquisition, le traitement et la gestion des données du système de production et ses environnements interne et externe. Ces données permettent de connaître la situation du système à tout instant ;
- § *Le système de décision* identifie, analyse et corrige les dérives du système physique, il le pilote .Ses interventions se font en fonction des objectifs assignés qui constituent une contrainte dont il doit tenir compte.

Si cette décomposition est valable pour le système *entreprise*, et permet son analyse, elle est beaucoup moins adaptée pour les systèmes de production et sa modélisation. En effet, dans le système de production, les sous-systèmes d'information et de décision n'ont pas d'existence propre, l'un sans l'autre. Ils constituent ensemble ce que nous appelons le système de pilotage ou le système d'information et de décision (SID) (figure 1.1) ou encore le système directeur [Rod91] ou la partie conduite [Dra98]. Ainsi, il est plus conforme à la réalité de considérer le système de production comme l'association d'un système physique et d'un système de pilotage [Bak96] ou encore d'une partie opérative et d'une partie commande (figure 1.1).

L'association des parties des systèmes de décision et d'information concernant uniquement la production constitue le système de gestion de production [Let01].

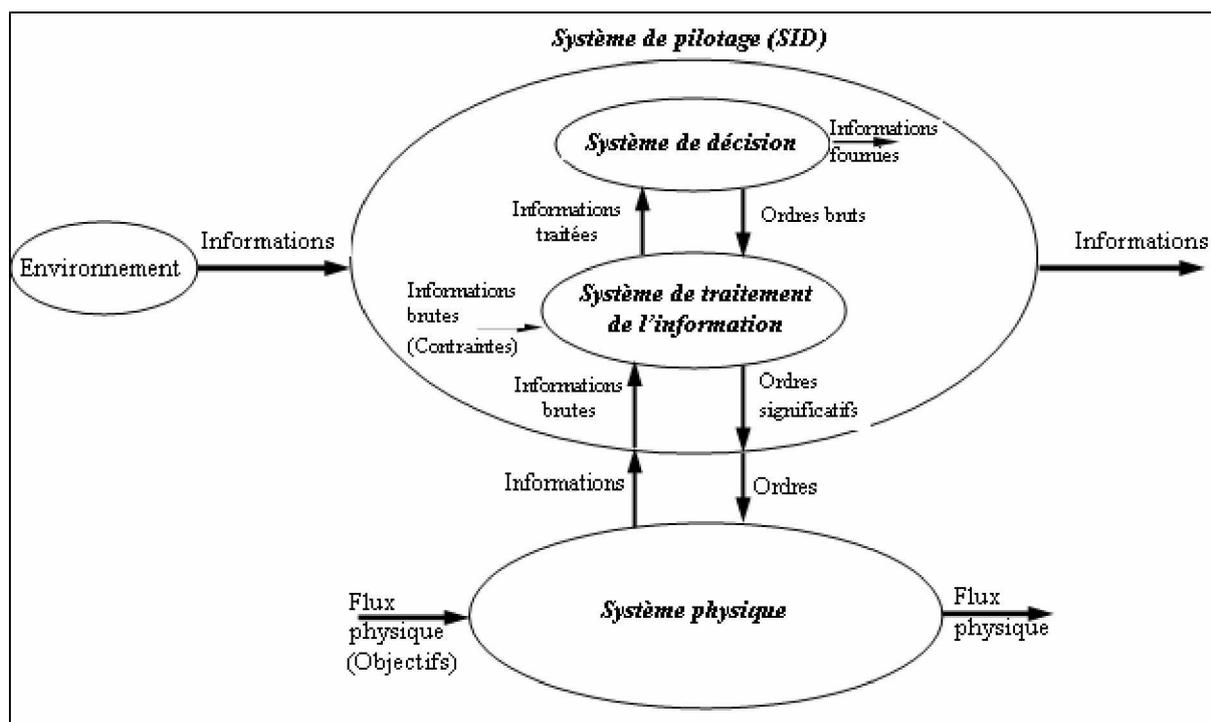


Figure 1.1 : Représentation d'un système de production [Bak96]

1.2.4 – Les caractéristiques des systèmes de production

Le contexte économique dans lequel les entreprises évoluent aujourd'hui ne permet plus de produire efficacement à partir des systèmes de production basés sur les principes du Taylorisme, qui ont fait largement leurs preuves. Il nécessite des systèmes de production basés sur d'autres principes, ayant de nouvelles caractéristiques, telles que la flexibilité, la réactivité, la proactivité et la robustesse [Dra98].

1.2.4.1 – La Flexibilité

L'évolution croissante des besoins d'une entreprise fait que la conception du système de production est de plus en plus orientée vers des familles de produits et non vers un seul type de produit. Les systèmes correspondants à une telle exigence doivent se révéler flexibles.

La flexibilité d'un système de production se caractérise par sa capacité d'adaptation à la production des nouveaux produits pour lesquels le système n'a pas été étudié. Cela suppose une adaptation totale du système de production au produit courant (de la distribution des flux discrets de composants aux opérations qu'effectuent les moyens de production sur le produit).

Plusieurs types de flexibilité ont été mis en évidence suivant leurs incidences sur l'objectif qui est le produit fini et sur les moyens de production permettant la réalisation de ce produit.

§ *flexibilité de produits* : offre la possibilité d'une reconfiguration du système pour la prise en compte d'un nouveau produit ou famille de produits permettant ainsi un gain de productivité ;

§ *flexibilité de mélange* : c'est la possibilité de produire simultanément un ensemble de produits ayant des caractéristiques de base communes ; cette flexibilité peut être mesurée par le nombre de produits différents qui peuvent être fabriqués simultanément ;

§ *flexibilité de quantité* : il s'agit de la capacité du système à faire face aux fluctuations de la quantité des produits à fabriquer en modifiant les rythmes, ainsi que les temps de passage et d'engagement des outils ;

§ *flexibilité de routage* : offre au système les moyens d'un aiguillage plus souple, de façon à servir les différents segments de procédés libres ou sous - engagés ;

§ *flexibilité d'ordre des opérations* : permet de changer l'ordre des opérations en cours de production (ce qui suppose l'existence d'une gamme principale et des gammes secondaires) ou de choisir la destination suivante après chaque opération (c'est le cas dans notre étude);

§ *flexibilité d'expansion* : autorise une extension et une modification de l'architecture du système et elle exige une modélisation ;

§ *flexibilité des ressources* : c'est la capacité des ressources à effectuer plusieurs tâches élémentaires et de permettre la reprogrammation.

En considérant les définitions données ci-dessus on peut déduire que la flexibilité est un facteur déterminant dans l'élaboration de la conception d'un système de production apte à fabriquer plusieurs variantes de produits. Malheureusement, une forte accentuation sur cette flexibilité engendre des investissements très élevés des ressources technologiques relevant de ce système, à cause de leur surdimensionnement à l'installation, et entraîne une baisse de productivité. Au cours de l'automatisation d'un système flexible de production il est nécessaire de réaliser un compromis entre flexibilité et productivité.

1.2.4.2 – La Réactivité

Une exigence importante du client est de recevoir sa livraison dans les délais impartis et ce quel que soit le carnet de commande (variable). Satisfaire une telle exigence impose au système de production d'être réactif, c'est-à-dire capable de répondre rapidement et économiquement à un changement (fabrication multi-produit, introduction d'une commande urgente, modification d'une norme etc.) ou à un aléa. Ces aléas peuvent provenir soit du système de production (défauts d'alimentation, défauts de réalisations d'une tâche, pannes des machines, rebuts) soit de son environnement (approvisionnements des matières premières).

La réactivité d'un système de production est définie comme l'aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, sollicitation,...) par rapport au régime (fonctionnement) permanent (stable).

1.2.4.3 – La Proactivité

Aujourd'hui, l'évolution rapide de l'environnement, la complexité croissante des processus de production conduisent à considérer comme nécessaire une adaptation permanente, dans un monde où l'aléa constitue la règle et non l'exception. La réactivité est donc nécessaire, mais elle n'est pas suffisante et les systèmes de production doivent présenter une nouvelle propriété : la proactivité.

La proactivité d'un système de production se caractérise par ses capacités d'anticipation (prévoir et/ou provoquer) les changements d'état, d'apprentissage et d'enrichissement des connaissances (pour améliorer sa réactivité), d'adaptation ses règles de fonctionnement et par sa capacité de réorganisation reposant sur une architecture décentralisée et une délégation de responsabilité.

1.2.4.4 – La Robustesse

Une autre exigence du client est d'acquiescer sa commande avec la garantie d'une certaine qualité. Cela oblige le concepteur du système de production à imposer au système de production une certaine robustesse.

La robustesse d'un système de production se définit par son aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'incertitudes dans le système.

L'acquisition de ces quatre propriétés est liée à une réorganisation notable du système de production existant, notamment au niveau du pilotage du système par la prise en compte des nouvelles approches.

1.2.5 – L'évaluation des performances des systèmes de production

Le but principal d'une entreprise manufacturière est de faire des profits. Pour augmenter les profits, il faut fabriquer des produits à faible coût et de bonne qualité pour pouvoir les imposer dans un marché à forte compétition. De ce fait, pour améliorer un produit, il faut minimiser son coût et augmenter sa qualité. Ceci peut se faire à travers l'optimisation d'un certain nombre de critères appelé critères de performance [Sar03] :

§ **Le temps de cycle** : il est composé du temps de chargement, du temps d'exécution, du temps de transfert et du temps d'attente. Contrairement aux autres temps, Seul le temps d'exécution augmente la valeur du produit, de ce fait, il faudra minimiser ces temps afin de minimiser les coûts de production. Dans le cas idéal, ces temps sont nuls et le temps du cycle est égal au temps d'exécution.

§ **Les stocks d'encours** : les stocks d'encours coûtent de l'argent sans apporter de valeur ajoutée au produit. De fait, ils doivent être minimisés. L'idéal serait que le nombre de produits en cours soit égal au nombre de produits en exécution. Néanmoins, il reste nécessaire de conserver des stocks pour pallier à d'éventuelle perturbation externes (approvisionnements défectueux, commande imprévue...) ou interne (pannes...).

§ **Taux d'utilisation des machines** : un taux d'utilisation de machines élevé, permet d'amortir ces machines plus rapidement, ce qui est avantageux. En contre partie, si on augmente le taux d'utilisation des machines sans tenir compte des autres facteurs, on risque de provoquer une augmentation importante des stocks d'encours et de produits finis. Ainsi, il est préférable de laisser les machines à l'arrêt, que de surproduire. Le mieux est d'utiliser les machines pour fabriquer la quantité exacte du produit approprié, au bon moment.

§ **Le taux de production** : le taux de production présente la quantité de produits sortant du système par unité de temps, de fait, il doit être maximisé.

§ **La capacité** : la capacité est le débit de productivité maximum pouvant être atteint. C'est la valeur maximum que peut atteindre le taux de productivité.

§ **La qualité** : la qualité est l'un des plus importants des critères de performances. Des produits défectueux qui échappent à l'inspection peuvent provoquer des pertes nettement supérieures à leurs propres valeurs marchandes (blocage de la chaîne de montage, retour de produit dans le cadre de la garantie...).

Le recours à l'évaluation des performances d'un système de production est nécessaire avant toute prise de décision, l'objectif étant l'optimisation de sa performance. Cette évaluation représente la mesure de l'impact d'une décision sur le système ou l'influence de perturbations modifiant son état. Les acteurs de la productique s'accordent sur le fait que, dorénavant, l'analyse, la conception et l'exploitation des systèmes de production ne peuvent être menées à bien sans une assistance méthodique [Pie90].

D'après Caux [Cau93], évaluer signifie « *déterminer une quantité par le calcul sans avoir recours à la mesure directe* ». Ceci suppose que l'évaluation soit effectuée à l'aide d'un modèle qui peut être expérimental, mathématique, de simulation... . Evaluer implique également le recours à un objectif et un indicateur de performance qui fournit une donnée

quantifiée mesurant l'efficacité du système, donc son aptitude à générer une performance [Ber97].

Les trois approches classiques d'évaluation des performances des systèmes de production sont : les mesures directes, les méthodes analytiques et la simulation informatique [Hab01].

1.2.5.1 – Les mesures directes

Les mesures directes sont pratiquées directement sur le système réel ou sur une maquette ou un prototype physique représentant ce système. Les bassins de carène sont utilisés pour simuler le comportement d'un bateau ou d'un navire à l'aide d'une maquette à échelle réduite.

Des expériences en soufflerie sont réalisées pour simuler le comportement d'un avion de chasse soumis à une vitesse d'air supersonique. Des expériences réelles sont réalisées pour mesurer la réaction au choc d'un véhicule contre un obstacle rigide (crash test). Ces simulations en grandeur réelle sont réalisées quand elles ne peuvent être remplacées par des simulations informatiques, le système étant très complexe pour être remplacé par un modèle fiable et ces expériences sont excessivement chères et nécessitent des budgets très importants pour leur mise en place. La réalisation de mesures directes sur des Systèmes de Production ne peut être acceptée que dans le cas d'une démarche de progrès, d'amélioration continue ou de pilotage par indicateurs de processus. Les mesures directes ne peuvent être pratiquées dans le cas de systèmes non existants et si la réalisation de prototypes physiques coûte trop chère.

1.2.5.2 – Les méthodes analytiques

Les fondements des méthodes analytiques sont à la base d'outils assez pratiques, fréquemment utilisés dans l'évaluation des performances des systèmes de production. Ces méthodes exigent qu'un modèle mathématique soit d'abord trouvé pour représenter le système étudié et que l'on dispose des outils mathématiques qui permettent d'étudier ce modèle. Une démarche analytique se décompose en trois étapes :

- recherche d'une approche analytique adéquate (modèle mathématique qui s'adapte au cas étudié),
- développement du modèle (émission des hypothèses adaptatives du système réel à la théorie adoptée et déduction du modèle),
- implémentation, utilisation et exploitation du modèle.

Les techniques permettant d'étudier de manière analytique un système de production sont nombreuses [Pro87] :

§ la *programmation linéaire* consiste à optimiser une fonction objective sous certaines contraintes linéaires conduisant à une solution statique,

§ la *programmation* dynamique consiste à trouver une solution optimale à partir de solutions optimales partielles comme dans le cas d'un programme PERT,

§ les *chaînes de Markov* sont utilisées dans la modélisation des systèmes stochastiques et dans lesquelles on définit l'état d'un système par un comportement entièrement probabiliste,

§ les *graphes potentiels tâches* et *l'algèbre des dioïdes* [Coh83] nécessitent de connaître les séquences d'activités pour tous les objets considérés au sein du système,

§ la *théorie des files d'attente* consiste à représenter le système sous forme d'un réseau de serveurs, de zones d'attente et de clients,

§ les *réseaux de Petri* [Dav88] constituent un outil graphique basé sur deux sortes de nœuds, les places et les transitions. A partir de ce graphe, on déduit des équations qui décrivent les caractéristiques du système (vivacité, synchronisation,...).

1.2.5.3 – La simulation informatique

Parallèlement aux méthodes analytiques, s'est créée depuis les années soixante une technique relevant d'une conception tout à fait différente. Il s'agit de la simulation, une technique qui exploite une autre voie, la voie expérimentale.

Elle a trouvé une utilisation dans de nombreux domaines : la conception, l'optimisation, l'évaluation des performances.... Les applications sont nombreuses : l'informatique, les réseaux de communication, la logistique, la fabrication, les stratégies militaires, la manutention.... Le recours à cette technique se fait principalement dans deux types de situations : le premier correspond au cas où l'expérimentation directe serait impossible à réaliser pour des raisons morales, d'impératifs temporels, de contraintes budgétaires, d'obstacles naturels..., le second correspond au cas où on ne disposerait pas de bases théoriques capables de modéliser la réalité dans toute sa complexité. La simulation peut servir dans ce dernier cas de repère pour d'éventuels modèles théoriques et déterminer lequel qui fournit la meilleure approximation. Il faut rappeler, que la simulation cherche plutôt à atteindre des objectifs préétablis, alors que les méthodes analytiques cherchent à optimiser.

Elle intervient souvent dans le cas de systèmes beaucoup trop complexes pour donner lieu à un modèle mathématique fiable. Ceci est particulièrement vrai quand le système est soumis à des phénomènes dynamiques et des situations aléatoires.

Pour l'étude de notre système de production, c'est cette dernière approche que nous utiliserons. Ce choix sera justifié au niveau du chapitre 2 (§ 2.7.4).

Afin d'améliorer les performances d'un système de production donné, il est très important, voir essentiel, d'optimiser le fonctionnement de ce dernier. Pour ce faire, il faut prendre en considération plusieurs paramètres du bon fonctionnement pendant la phase de conception ou de remodelage du système. Ceci en étudiant l'impact des futures méthodes de gestion à appliquer au système et son organisation physique (son arrangement et constituants) sur sa rentabilité.

1.3 – Les Système Flexible de Production (SFP)

Depuis le début des années 80, on assiste à l'émergence d'une nouvelle classe de systèmes de production : les Système Flexibles de Production (SFP) ou les Ateliers Flexibles ou encore Flexible Manufacturing System (FMS). Les SFP sont des systèmes de production fortement automatisés et adaptés à la fabrication en petites et moyennes séries de produits ayant des gammes différentes et ceci à faible coût. La littérature propose différentes définitions des SFP, parmi lesquelles nous retenons :

Celle de MacCarthy et Liu [Bra05] qui a l'avantage de prendre en compte les processus de production et de stockage :

« Un système flexible de production est un système de production capable de produire différents types de pièces, composé de machines à commande numérique ou à contrôle numérique et d'un système automatisé de stockage connectés par un système automatisé de maintenance. Le fonctionnement du système entier est sous le contrôle et le pilotage d'un système informatique. »

La définition englobant les points importants est celle de Pruvost [Jub03] :

« Un atelier flexible permet la production automatique de pièces de types divers et en quantités variables. Les opérateurs n'interviennent pas directement dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien. L'ordonnancement est géré par un système informatique. »

1.3.1 – Les éléments des systèmes flexibles de production (SFP)

Un système flexible de production est constitué d'un ensemble de machines à commande numérique, de stations de travail connectées par un système de transport automatisé, le tout commandé par ordinateur.

Les systèmes flexibles de production peuvent être caractérisés par les machines reprogrammables à commande numérique ; le changement d'outils automatisé ; les systèmes de transport automatisés ; le chargement et déchargement automatisés et un contrôle coordonné.

Les systèmes flexibles de production nécessitent des machines complexes et chères, mais leur nombre est réduit par rapport à d'autres systèmes de production. Globalement, une économie dans le coût et l'espace de l'ordre de 30 % peut être réalisée [Sar03].

Les systèmes flexibles de production sont constitués d'un certain nombre d'équipements qui peuvent être divisés en quatre familles :

§ Les stations de travail, englobant les machines à commande numérique, les systèmes de changement d'outils, les palettes, les supports, les systèmes d'inspection...

§ Les systèmes de manutention et de transport, comprenant les systèmes de transport, les robots manipulateurs.

§ Les systèmes de stockage, renfermant les aires de stockage, les systèmes de chargement/déchargement...

§ Les systèmes de contrôle et de communication.

1.3.1.1 – Les stations de travail

Une station de travail est composée d'une machine à commande numérique, d'un magasin d'outils avec un système automatique de changement d'outils, d'un magasin à palettes et supports, d'un système automatique de chargement/déchargement des palettes dans les machines, d'un système automatique d'inspection et d'un système de contrôle.

1.3.1.1.1 – Les machines

Les machines utilisées dans les SFP, sont, en général, des machines à commande numérique. Elles sont commandées par un programme mémorisé dans un contrôleur à base de microprocesseur. Le programme est développé pour chaque produit. En changeant d'outil et de programme de commande, une machine est en mesure de réaliser une grande variété d'opérations sur des produits de forme, de taille et de matériaux différents. Parmi les différents types de machines existantes, nous citerons à titre d'exemple : les laminoirs, les presses, les fours, les plieuses, machines d'injection

1.3.1.1.2 – Les palettes et supports

Les palettes¹ et supports sont des composants essentiels d'un SFP. Les palettes sont des pièces qui servent d'interface entre les machines et les produits. Le support est un dispositif qui permet de soutenir le produit pendant la fabrication ou l'assemblage. Les produits, solidaires de leurs supports, se déplacent dans le système de production sur des palettes.

1.3.1.1.3 – Changeur automatique d'outil

C'est un système capable de sélectionner l'outil approprié, pour une opération donnée, à partir d'un magasin d'outils et de le fixer sur la tête porte-outils de la machine. Les magasins d'outils sont capables de contenir jusqu'à 60 outils et plus. Ils peuvent être en forme de disque, d'anneau ou de chaîne. Il est possible d'utiliser des magasins d'outils centralisés pour tout le système.

1.3.1.1.4 – Magasin et chargement/déchargement des palettes

Lorsque les produits arrivent à la station de travail sur les palettes, ils sont réceptionnés dans un magasin sous forme de carrousel, de ligne ou autre. Les produits sont ensuite chargés sur une table de travail de machine à l'aide d'un système automatique de chargement/déchargement, qui peut être par exemple un robot manipulateur. À l'aide d'un système de détection (code-barres), la machine identifie le produit, charge l'outil et le programme correspondant et procède à la vérification.

1.3.1.1.5 – Système automatique d'inspection

L'inspection des produits a pour but de s'assurer que ces derniers répondent aux spécifications exigées. Un système d'inspection est vital pour une production de qualité. On peut définir une inspection comme une opération où la totalité ou une partie du produit est comparé avec le produit normalisé. L'inspection automatique nécessite une intégration dans le cycle de production, ce qui permet de minimiser les transports et de corriger rapidement les défauts. L'inspection automatique requiert différents types de technologies : informatique, électronique, optique, ultrason, métrologie, photographie.... Il existe deux niveaux d'inspection l'un pendant l'opération et l'autre après.

1.3.1.1.6 – Système de contrôle

Une station de travail est un système complexe composé de plusieurs équipements indépendants. Le système de contrôle a pour mission de coordonner et de superviser le

¹ Les différents types de palettes existantes seront étudiés en détail dans la sous-section 1.5.1.1.

fonctionnement de tous ces équipements. Il doit superviser un certain nombre de fonctions dont :

- Le chargement de produits sur la machine, l'exécution de l'opération et le déchargement.
- Surveiller et protéger le système des perturbations (mauvais chargement, casse de support ou d'outil...).
- Veiller au respect des priorités des différents produits.
- Maximiser l'utilisation de la machine et minimiser les quantités d'équipement annexes (outil, support, palettes..).
- Surveiller l'usure des outils pour les remplacer avant leurs casses. Ceci est réalisé par plusieurs capteurs qui permettent de déceler des changements dans les dimensions des produits, changement dans la géométrie des outils, augmentation des vibrations et des bruits et les détériorations de l'état de surface. Ces détections se font en ligne et les corrections peuvent intervenir tout de suite après la fin d'une opération.

1.3.1.2 – Les équipements de transport

Les équipements de transports servent à déplacer les produits et éventuellement les outils entre les machines suivant les chemins planifiés pendant la conception du FMS. Il existe différents moyens de transport et différentes stratégies, selon le système global, il peut être soit par unité ou par lots. On favorise le déplacement à l'unité lorsque les distances entre les stations sont petites et par lots lorsque celles-ci sont grandes. De plus, la taille et le poids des produits, comparés au système de transport, peuvent limiter le choix d'une méthode ou d'une autre. Il existe plusieurs manières de classifications des équipements de transport :

- § suivant le type d'installation (sur le sol, suspendu ou aérien) ;
- § suivant le type de commande (manuel, contrôlé, automatique) ;
- § suivant le type de déplacement (chemins fixes ou routage flexible) ;
- § suivant le type de fonctionnement :
 - dans les systèmes synchrones, toutes les charges dans le système, se déplacent simultanément à la même vitesse et intervalles réguliers.
 - Dans les systèmes asynchrones, toutes les charges se déplacent indépendamment les unes des autres.

Il existe différents types d'équipements de transport, avec des degrés d'automatisation très variables. Nous citons :

1.3.1.2.1 – Les convoyeurs : ils sont utilisés pour le transport de produit de taille et de poids uniforme avec un débit important à des destinations précises et sur un chemin fixe. Il existe différents types de convoyeurs, convoyeur à tapis roulant, à chaîne, à rouleau ... Ils peuvent être à même le sol, surélevés ou aériens. Ce sont des équipements de transport synchrones. Ils peuvent être en forme de ligne (unidirectionnelle ou bidirectionnelle) ou en boucle fermée.

Ils sont de deux types : à accumulation et sans accumulation. Les convoyeurs sans accumulation (autorisation d'une palette à la fois sur le convoyeur) ne font qu'introduire un retard entre l'émission d'un produit à l'entrée et sa réception à la sortie. Les convoyeurs à accumulation permettent le blocage d'un produit. Ils peuvent être modélisés par une file d'attente de type FIFO. Une classe de SFP utilise ce type de système de transfert. Les produits sont déposés sur des palettes transportées par des convoyeurs à accumulation (c'est le cas considéré dans notre étude).

1.3.1.2.2 – Les grues et palans : ils sont utilisés pour les déplacements verticaux et/ou horizontaux de produits de divers tailles et poids dans un espace limité.

1.3.1.2.3 – Les véhicules industriels : les tracteurs d'aéroport, les transpalettes etc., sont autant de véhicules servant au transport de différents types de produits suivant des chemins variables pourvu que des allées adéquates soient prévues. Les véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicles) sont les véhicules industriels les plus élaborés avec un degré d'automatisation très élevé.

1.3.1.2.4 – Les véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicles) : Ils peuvent se déplacer entre un nombre défini de destinations préprogrammées dans un système de control. Ils sont l'un des équipements les plus utilisés dans les systèmes de production flexibles grâce aux nombreux avantages qu'ils présentent dont la grande flexibilité de routage, une possibilité d'automatisation totale et le transport de charge très importantes (jusqu'à 50 tonnes).

Il en existe différents types dont les AGV remorqueurs (towing AGVs), les AGV à charge unitaire (unit load AGVs), les AGV d'assemblages (assembly line AGVs), les AGV pour système de fabrication flexible (flexible machining system AGVs) et les AGV autonomes (autonomous AGVs). Leurs guidages peuvent se faire de différentes manières dont l'électromagnétique, l'optique, l'infrarouge, l'inertie, par la triangulation, l'ultrason, le laser etc. Les différents types de réseau de guidage peuvent être classés en [Bra05] :

- Réseau unidirectionnel de guidage ;

- Réseau bidirectionnel de guidage² ;
- Réseau mixte de guidage.

1.3.1.2.5 – Les robots industriels : ils sont utilisés comme équipements de chargement /déchargement et/ou de déplacement de produits d'un point à un autre dans un espace limité. De plus, ils peuvent être utilisés pour réaliser des opérations simples comme le soudage à point ou la peinture. Ils sont en général commandés numériquement et sont compatibles avec les machines numériques. Ils sont classés de différentes manières, parmi lesquelles, la classification par catégorie :

§ **les robots de première catégorie** sont à séquence fixe, sans détecteur ni puissance de calcul.

§ **Les robots de seconde catégorie** sont dotés de détecteurs externes, et d'une certaine puissance de calcul. Cela leur permet de modifier leurs actions en réponse à des petites perturbations. Ils sont capables de distinguer les différents produits (tailles, formes etc.) et de les classer par type.

§ **Les robots de la troisième catégorie** sont des robots intelligents, qui sont capables de collecter des informations à travers des capteurs, de traiter ces informations dans des calculateurs puissants et de prendre les décisions qui s'imposent.

Les robots industriels ont un large potentiel d'application dans les systèmes flexibles de production. Ils peuvent s'adapter à l'environnement à travers leurs capteurs et leurs contrôleurs programmables. Ils peuvent communiquer facilement avec les autres équipements du système par leurs contrôleurs respectifs.

1.3.1.3 – Les systèmes de stockage

Bien que l'un des principaux objectifs de l'étude des SFP soit la réduction des en-cours et des stocks, il reste nécessaire de construire des aires de stockage dans les unités de production. Ces aires peuvent être utilisées pour stocker des produits qui peuvent en cas de perturbation, paralyser une chaîne de montage ou autre... ils peuvent servir aussi à d'autres activités comme l'emballage, le contrôle de qualité... Les aires de stockage peuvent aller du système complètement automatique au stockage manuel.

² Ils sont les plus utilisés, car ils réduisent la possibilité de blocage, exigent un système de contrôle moins sophistiqué et se sont les moins coûteux.

Une aire de stockage est composée d'un bâtiment, d'un système de rangement (racks, étagères...) d'un mécanisme de transport, de chargement déchargement et d'un système de contrôle. Les systèmes de stockage doivent être compatibles avec les systèmes de transports. Une aire de transit doit être prévue pour déposer les produits à stocker et récupérer les produits à déstocker. Ils peuvent être dédiés ou ouverts. Dans les systèmes dédiés, chaque produit possède sa propre aire de stockage. Dans les systèmes ouverts, le stockage se fait de manière aléatoire, dans ce cas, un système de commande élaboré doit mémoriser les emplacements des différents produits, pour pouvoir les récupérer, ainsi que les emplacements libres. Il existe plusieurs types de systèmes de stockage. Les systèmes de stockage les plus élaborés sont les systèmes automatiques de stockage et de déstockage (automated storage retrieval systems AS/RS).

Un système automatisé de stockage et de déstockage (AS/RS) est défini comme une combinaison d'équipements et de systèmes de contrôle qui prend en charge stockage et déstockage des produits avec précision, exactitude et célérité sous un certain degré d'automatisation. Un tel système a pour fonction de recevoir, identifier, classer, mettre en stock, déstocker, emballer..., des produits. Il sert aussi à emmagasiner les produits en-cours de production, la matière première, les pièces détachées, les palettes, les supports, les outils, les produits à retravailler. Un système automatisé de stockage et de déstockage est composé d'une série d'allées avec des étagères de stockage de part et d'autre ; de machines de stockage et de déstockage (en générale, une par allée), de points d'entrées et de sorties et d'un système de contrôle coordonnant le tout. Il en existe différents types dont la classification est basée sur leurs structures et leurs applications. Parmi eux, Les AS/RS à charge unitaire, Les AS/RS à multi allées, Les AS/RS à racks glissants (ou racks mobiles), Les AS/RS à mini charge, Les AS/RS à carrousel, Les AS/RS à personne embarquée, Les AS/RS à étagères profondes et Les AS/RS à convoyeur gravitationnel.

1.3.1.4 – Les systèmes de contrôle

Le système de contrôle peut être composé d'un ordinateur central de commande, il donne des instructions et reçoit des états de situations de chaque équipement du SFP. Il peut garder en mémoire les gammes d'usinage des produits si les ordinateurs subalternes sont saturés. C'est le système de contrôle qui décide quand et/ou comment les produits doivent se déplacer entre les différentes machines et être chargés ou déchargés. Un système de commande élaboré peut commander et ordonnancer en temps réel le SFP. Il peut, entre autres,

décider de remplacer les outils après une certaine durée d'utilisation pour éviter les pertes de qualité et les risques de casse, il peut vérifier les charges de batteries des AGV...

Les systèmes de contrôle sont composés de trois entités principales :

§ Les calculateurs, sont des ordinateurs à base de microprocesseurs dotés de mémoires et de puissances de calcul de plus ou moins grandes.

§ Les logiciels, développés pour chaque type de commande, sont le cœur du système de contrôle. De leurs puissances dépend le degré de performance du système.

§ Les bases de données, les systèmes de transmission d'information, les capteurs etc. représentent la troisième entité.

Le choix de l'architecture est effectué pendant la phase de conception, suivant les critères d'organisation et de production de l'entreprise. C'est le choix le plus important du projet. A travers l'architecture nous pouvons décider comment seront les niveaux décisionnels, la communication, le stockage d'information, la commande, la supervision/surveillance, etc. Les architectures les plus connues sont :

§ L'architecture centralisée.

§ L'architecture hiérarchisée.

§ L'architecture distribuée (hétérarchisée).

1.3.1.5 – Les systèmes de communication

Pour permettre une coopération entre les différents centres de contrôle, quelque soit la structure, il est nécessaire de prévoir un système de communication entre eux. Ils est nécessaire pour :

- Ø La récupération des programmes ou données d'un centre de contrôle principal à un centre subalterne ;
- Ø La transmission d'informations concernant l'état de la production d'un contrôleur de machine à un centre de calcul plus important.
- Ø L'acquisition des mesures de production (taux de production, temps d'attente, temps de changement, utilisation des machines...).
- Ø La transmission de fichiers à la mémoire de masse concernant l'état de toutes les composantes du système (produits, outils, supports, palettes, matières premières...).
- Ø Le transfert de données en temps réel (contrôle des outils, routage des AGV).

Pour ce faire, il est nécessaire de concevoir un réseau de communication local (local area network, LAN). Un LAN est un système de communication reliant tous les centres de production.

1.3.2 – Typologie de systèmes flexibles de production

Il existe de nombreuses classifications des différents types de systèmes flexibles de production. Les critères de classification considérés par les auteurs sont variés. Citons par exemple la méthode de fabrication utilisée, la taille des machines et leur complexité, les modèles des flux de pièces à traiter ainsi que les caractéristiques de fonctionnement et de contrôle du système, la topologie de l'atelier, la méthode de fabrication utilisée (cyclique/acyclique, unitaire/lot, ...), la nature de la production (usinage ou assemblage. Nous présentons ci-dessous une classification simplifiée en quatre classes [Bra05] :

1.3.2.1 – Un SFM (Single Flexible Machine ou machine unique flexible) : c'est une unité de production pilotée par ordinateur qui contient une machine unique avec capacité de changement d'outil, un élément de manutention et un stock interne ;

1.3.2.2 – Un FMC (Flexible Manufacturing *Cell* ou cellule de production flexible) : c'est un groupe de SFM reliés par un seul élément de manutention, avec ou sans espaces de stockage intermédiaires situés en entrée ou en sortie de chaque SFM (figure 1.2) ;

1.3.2.3 – Un MMFMS (Multi-Machine Flexible Manufacturing System ou système de production flexible à plusieurs machines) : c'est un groupe de SFM reliés par un système de manutention automatisé qui contient deux ou plusieurs chariots. Les systèmes de type MMFMS sont donc capables de servir plusieurs machines simultanément, avec ou sans espaces de stockage intermédiaires qui peuvent être en Entrée/Sortie de chaque SFM (figure 1.3).

1.3.2.4 – Un MCFMS (Multi-Cell Flexible Manufacturing System ou système de production à plusieurs cellules) : c'est un groupe de SFM et FMC tous connectés par un système de manutention automatisé (contenant un ou plusieurs moyens de transport) de deux à plusieurs zones de stockage et de deux à plusieurs zones de communication. Un atelier flexible comporte en entrée et en sortie une zone de stockage et une interface d'Entrée/Sortie avec le monde externe (figure 1.4).

D'après ce qui précède, nous constatons que la cellule flexible de production FMC est l'élément de base de tout système de production.

1.3.3 – Les différentes topologies des SFP

L'analyse de cinquante SFP existants réalisée par Kusiak en 1988 montre que la topologie du SFP et le placement des machines est déterminé d'après le type de système de manutention utilisé. Des études, menées dans le domaine de la manutention dans les SFP, montrent que les systèmes de manutention les plus utilisés comportent essentiellement des

robots et des chariots automatiquement guidés. Selon [Bra05], les types de topologies des SFP les plus souvent rencontrés sont :

a) une topologie circulaire (Figure 1.2) ;

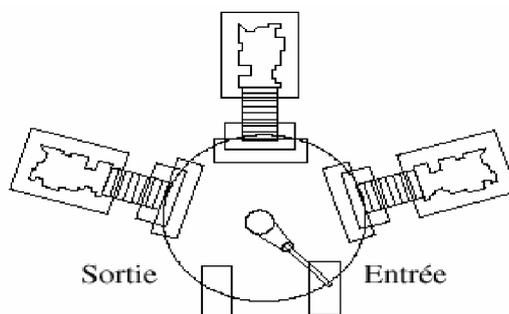


Figure 1.2 : Topologie circulaire (en boucle).

b) une topologie comportant des unités flexibles de production/stockage rangées en réseau circulaire unidirectionnel (Figure 1.3) ;

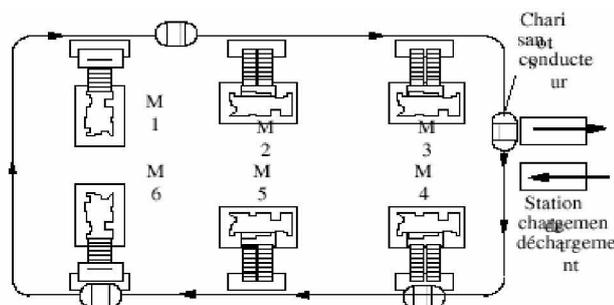


Figure 1.3 : Un réseau circulaire unidirectionnel.

c) une topologie comportant des unités flexibles de production/stockage rangées en plusieurs lignes et colonnes (Figure 1.4).

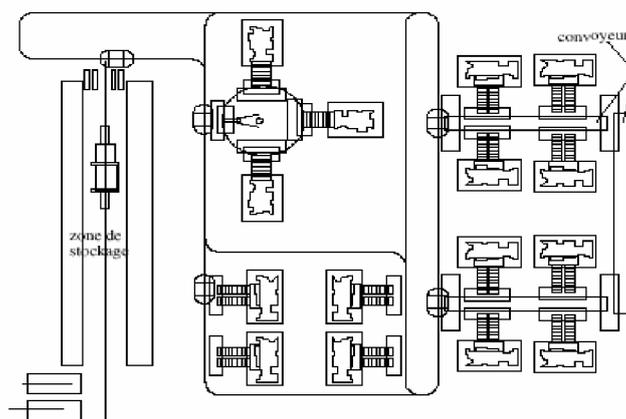


Figure 1.4 : Topologie en plusieurs lignes et colonnes.

d) une topologie linéaire comportant des unités flexibles de production/stockage rangées en une ligne (Figure 1.5) ;

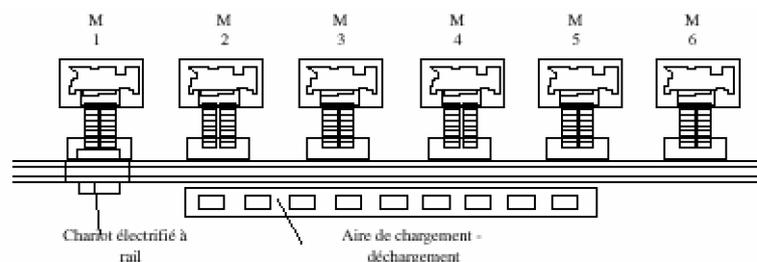


Figure 1.5 : Topologie linéaire.

e) une topologie linéaire comportant des unités flexibles de production/stockage rangées en deux lignes (Figure 1.6) ;

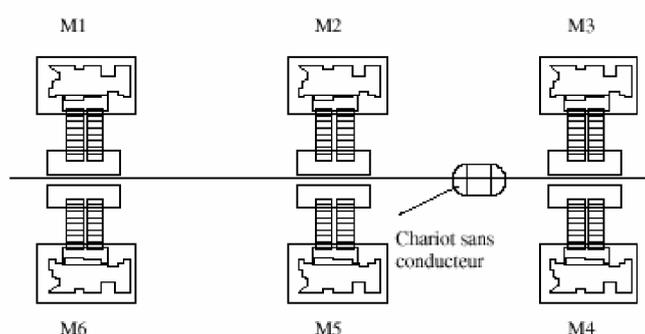


Figure 1.6 : Topologie linéaire en deux lignes.

Les choix du type et de la topologie adéquats du système de production se fait à sa conception. C'est une décision dont l'impact est très important sur le bon fonctionnement et les performances globales du système. Ainsi, il est très important, voir crucial, de prendre en considération les aspects fonctionnement et gestion pendant la phase conception du système de production afin d'éviter un surdimensionnement de l'atelier ou tout autre effet indésirable qui pourrait plus tard, nuire au bon fonctionnement de celui-ci.

1.4 – Typologie des processus d'assemblage

L'assemblage est un processus qui se retrouve dans presque tous les produits fabriqués et qui peut représenter jusqu'à 40 % du coût de revient des produits [Cet95].

Little [Lit94] cite le résultat d'une enquête aux Etats-Unis qui indique que 53% du temps total de production et 22 % du coût de main d'œuvre sont consacrés à l'assemblage.

Le produit fini résulte des assemblages successifs de composants sur un ou plusieurs postes de travail implantés le long d'un transfert asynchrone. On peut distinguer plusieurs processus d'assemblage suivant la façon d'alimenter les composants à assembler [Des94].

1.4.1 – Assemblage par *kits*

L'assemblage par *kits* consiste à préparer tous les composants à assembler et à les placer en vrac dans un support unique, généralement un simple container, puis introduire ce container sur la ligne de transfert. Le container est acheminé vers un des postes de travail - obligatoirement manuel- où l'opérateur réalise l'assemblage des composants présents dans le container. Le produit fini est soit évacué au niveau même du poste de travail, soit réintroduit sur la ligne transfert jusqu'à un poste de déchargement.

Le système de gestion permet aux opérateurs de commander la préparation des kits par anticipation, en fonction de leurs charges de travail, afin de supprimer les attentes.

Ce type d'assemblage, le plus élémentaire en production industrielle, évite la présence de dispositifs d'alimentation sur les postes de travail, mais impose la présence des *Kits*. Il est surtout utilisé pour les petites séries de produits variés pouvant être assemblés sur la même ligne. On supprime ainsi les temps de réglage ou de chargement de dispositifs d'alimentation, qui peuvent être importants par rapport au temps de fabrication d'une série.

La préparation des *Kits*, presque systématiquement manuelle, est réalisée en temps masqué par rapport aux opérations d'assemblage, ce qui permet de passer très rapidement d'une série à une autre.

Le *Kit* permet une gestion rigoureuse des composants puisqu'on ne sort que le nombre de composants strictement nécessaire à la quantité de produits à assembler.

1.4.2 – Assemblage par *Rendez-vous*

Ce type d'assemblage, surtout rencontré dans la production automobile (lignes de production de moteurs), correspond à un processus mixte (usinage + assemblage).

En effet, les composants, à cause de leurs encombrements ou de leurs coûts unitaires, ne sont pas stockés à l'avance en grosse quantité. Ils sont donc réalisés à la demande, suivant un planning prévisionnel sur des postes d'usinage. Les différents composants nécessaires à l'assemblage d'un produit sont par la suite transférés séparément vers le poste d'assemblage. C'est de cette organisation que vient la notion de *Rendez-vous* au poste d'assemblage qui caractérise la nécessité de synchroniser l'arrivée des différents composants requis pour une opération.

1.4.3 – Assemblage par *Pièce maîtresse*

Lors de la conception du processus d'assemblage, on identifie sur le produit à assembler la *Pièce maîtresse*³, appelée aussi *composante primaire*. Sa fonction, au niveau de

³ Ce type d'assemblage est vraisemblablement le plus représentatif de la tendance actuelle dans l'industrie.

la gamme d'assemblage, est de recevoir successivement les différents composants et sous-ensembles nécessaires à l'obtention du produit fini. Pour des raisons d'organisation et de productivité, toutes les opérations d'assemblage ne sont pas réalisées au même endroit. La *Pièce maîtresse* doit donc être transférée d'un poste à un autre (dans le cadre de ce mémoire, c'est ce type d'assemblage que nous considérons).

Les composants sont en général stockés à l'avance sur les différents postes de travail en lots (ordonnés ou en vrac) de taille suffisante pour permettre un fonctionnement sans attente. Il faut donc être en mesure d'extraire un composant de ce stock, de le mettre en position dans la *pièce maîtresse* et éventuellement de l'immobiliser (par vissage, serrage, collage, encliquetage, ...).

Ce type d'assemblage est utilisé dans le cas de :

- produits à structure convergente ou à points de regroupement ;
- productions par petite et moyenne séries, répétitives ou pas, éventuellement les productions de masse à cadence faible et personnalisation possible du produit ;
- systèmes de transfert inter-postes du type asynchrone automatisé ;
- lignes flexibles d'assemblage, automatisé ou pas, capable de réaliser simultanément plusieurs produits différents et de changer rapidement de production.

La tâche d'assemblage, en fonction de sa complexité, est soit manuelle, soit automatisée, soit mixte. L'automatisation de l'assemblage relève essentiellement de l'utilisation d'un robot (4 à 6 axes) et d'équipement de périrobotique tels que les convoyeurs, trémies,... ces équipements peuvent être rendus particulièrement flexibles par le biais de système de vision artificielle et de reconnaissance de formes, notamment pour l'extraction et l'orientation des composants.

1.5 – Analyse fonctionnelle et description technologique des lignes d'assemblages multiproduits à transfert asynchrone automatisé

Les systèmes physique d'assemblage doit assurer les fonctions suivantes : Charger/Décharger, *Transférer* et assembler. La figure 1.6 représente les fonctions physiques suivant le formalisme SADT⁴ [Fon99].

⁴ **SADT** : Formalisme qui offre une représentation hiérarchique de la structure organisationnelle du système de production, et permet une description des processus décisionnels et opérants. Elle permet d'identifier les contraintes et de distinguer les flux d'information et les flux des composants en tenant compte des interactions entre le système physique et le système de pilotage.

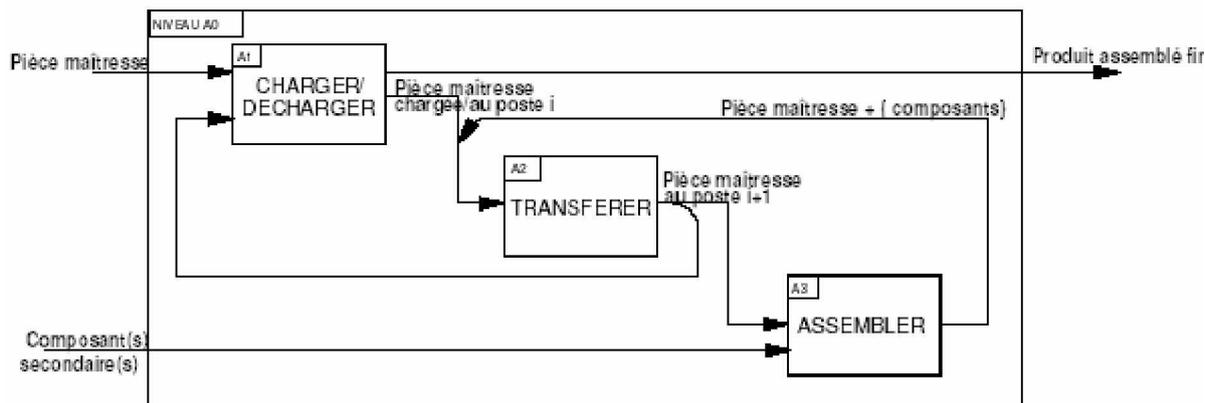


Figure 1.7 : Fonctions générales d'une ligne d'assemblage [Fon99]

Remarque : dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons uniquement au mode de transfert asynchrone.

1.5.1 – Fonction transfert

La figure 1.8 représente la fonction *Transfert* suivant le formalisme SADT.

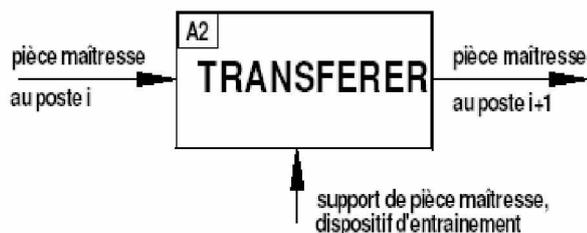


Figure 1.8 : Fonction TRANSFERER d'une ligne d'assemblage.

1.5.1 – Description des solutions technologiques utilisées pour cette fonction

1.5.1.1 – Palette : c'est un support universel de la pièce maîtresse durant son transfert. Elles comportent souvent un posage servant d'interface, réalisé spécialement en fonction des formes et des dimensions de la pièce maîtresse et destinée à la positionner précisément pour que les opérations d'assemblage les plus délicates soient réalisées sans aléas.



Figure 1.9 : Exemple de palette avec un posage

On peut distinguer deux principaux types d'entraînement des palettes :

1.5.1.1.1 – Les palettes motorisées : chaque palette est pourvue de sa propre motorisation, dont l'alimentation en courant électrique est réalisée par des batteries embarquées qui se rechargent lors des opérations d'assemblage. Chaque palette dispose de sa propre partie commande, ce qui autorise la programmation du routage, d'accélération, de vitesses limites, de règles de gestion de collision avec les autres palettes,... On peut d'ailleurs les assimiler aux plus connus *chariots filoguidés*. La différence réside justement dans le dispositif de guidage qui, pour les palettes, correspond à de simples rails comportant lignes droites, virages, aiguillage, ...

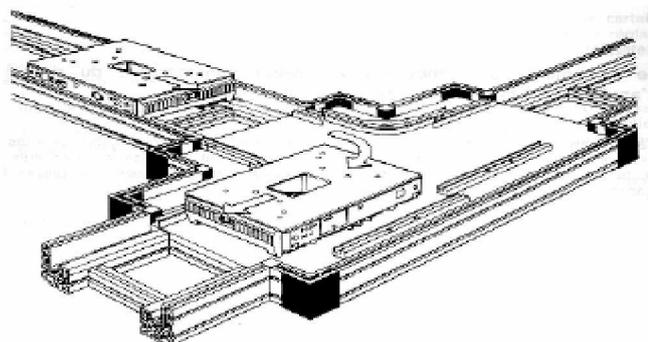


Figure 1.10 : Exemple d'entraînement à palette motorisée [Fon99]

1.5.1.1.2 – Les palettes libres : l'entraînement des palettes est réalisé par adhérence avec un convoyeur, qui peut être à bande, à chaîne à écailles, à galets ou à courroies plates ou circulaires. Quelle que soit sa nature, le convoyeur défile en permanence et entraîne par adhérence toutes les palettes à la même vitesse. L'indépendance des palettes entre elles est obtenue par l'utilisation de butées permettant de les arrêter. Dans ce cas, le convoyeur glisse sous la palette sans l'entraîner. Ce dispositif offre la possibilité de créer des zones d'accumulation des palettes, en amont des postes de travail par exemple.



Figure 1.11 : Exemple d'entraînement par palette libres

Remarque : La majorité des fournisseurs de systèmes de transfert asynchrone s'est orientée vers une offre en rapport avec les besoins des concepteurs de ligne d'assemblage : proposer des éléments modulaires permettant non seulement la réalisation sur mesure, mais aussi l'ajout ou la suppression rapide d'éléments de convoyage.

Les principales caractéristiques de ce transfert sont :

- § La circulation libre et automatique des palettes entre les postes de travail ;
- § La possibilité d'arrêter les palettes sur un obstacle (butée) ;
- § La possibilité d'accumulation sur le convoyeur en amont et en aval du poste de travail ;
- § La possibilité d'avoir des postes manuels et des postes automatisés sur la même ligne ;
- § Des architectures multiples [Yin98] :

a. Ouverte : les produits finis sont déchargés au bout de la ligne ;

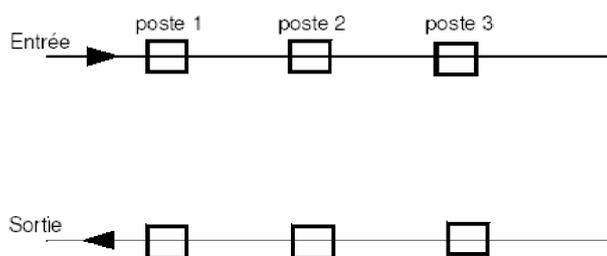


Figure 1.12 : Exemple d'architecture de ligne ouverte

b. Fermée : un produit peut éventuellement effectuer plus d'un tour (cas d'un Job Shop).

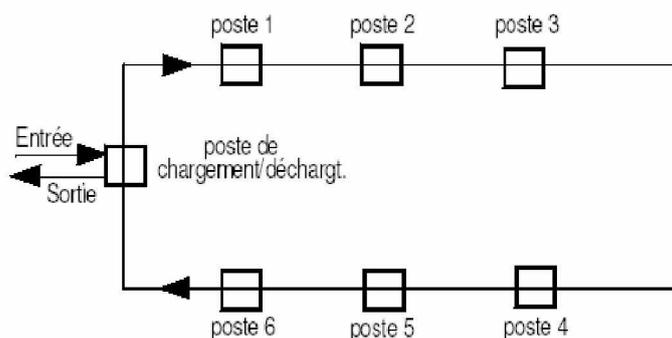


Figure 1.13 : Exemple d'architecture de ligne fermée

c. à une seule piste avec poste de travail en série : les palettes sont bloquées et indexées au niveau du poste de travail. Cette architecture est intéressante si les temps opératoires sont proches et si toutes les palettes doivent s'arrêter à chaque poste de travail.

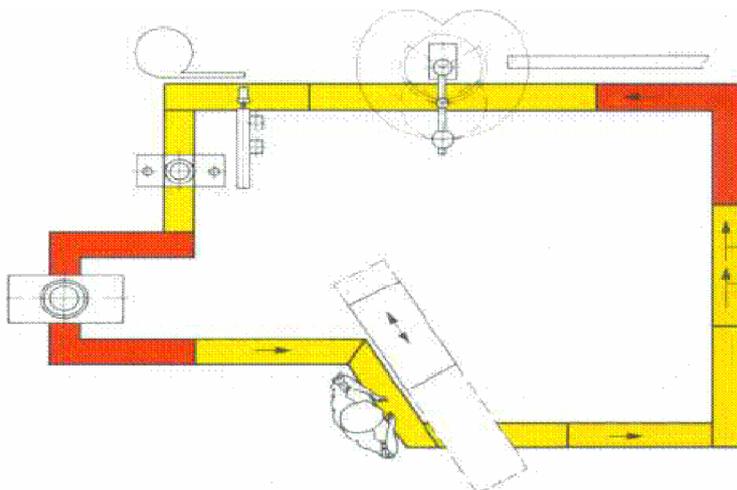


Figure 1.14 : Exemple d'architecture de ligne à une piste avec postes en série

d. à une seule piste avec postes de travail en dérivation : cette architecture est celle qui correspond le plus au besoin de production simultanée de produits variés en quantité moyennes. En effet les postes de travail en dérivation permettent de dériver uniquement les produits concernés par l'opération sans perturber le flux des autres produits. D'autre part, cette solution permet de créer des files d'attente locales, en amont de chaque poste, afin de réduire les temps d'attente.

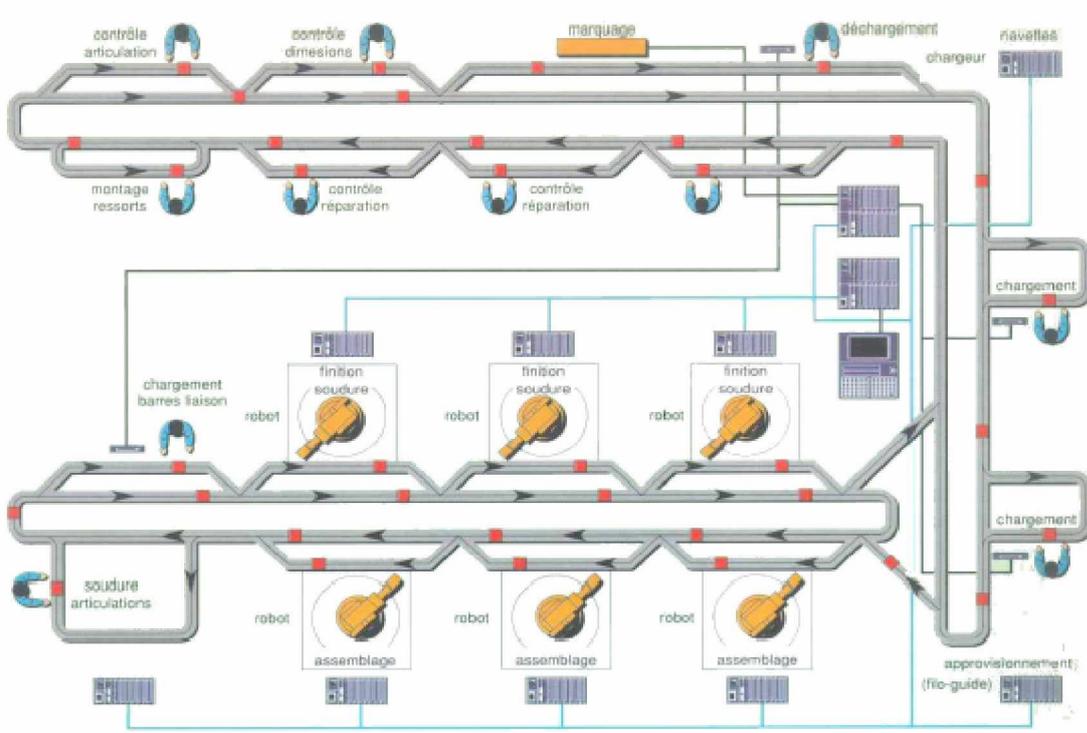


Figure 1.15 : Exemple d'architecture à une seule piste et postes en dérivation

e. à deux pistes parallèles avec postes de travail en dérivation : c'est une évolution de l'architecture précédente, permettant le passage direct d'une palette d'un

poste à un autre. Cette solution, bien que plus attrayante au niveau du flux, limite les possibilités d'évolution de la ligne et augmente son coût.

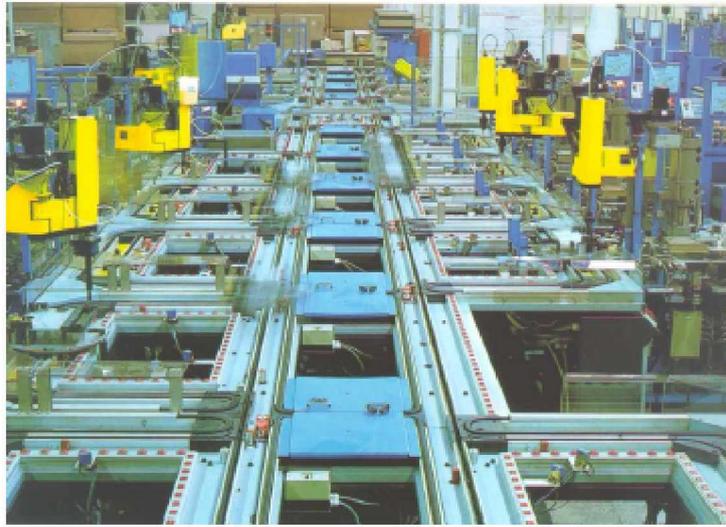


Figure 1.16 : Exemple d'architecture à deux pistes et postes en dérivation

En dehors des palettes et des convoyeurs, les autres éléments technologiques utilisés pour la fonction *Transfert* sont :

1.5.1.2 – les butées : elles permettent d'arrêter les palettes sur la ligne pour des opérations sans précision ou pour la gestion des priorités aux interactions.



Figure 1.17 : Exemple de butée

1.5.1.3 – les indexages : ils sont destinés eux aussi à arrêter les palettes, mais contrairement aux butées qui laissent la palette en glissement sur le convoyeur, les indexages la soulèvent légèrement et la mettent en position précisément (environ ± 0.03 mm) afin de pouvoir y réaliser des opérations délicates. Les indexages sont donc essentiellement situés au niveau du poste de travail, qu'il soit en dérivation ou en série.

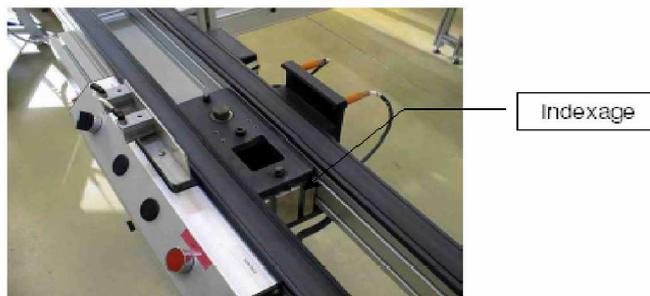


Figure 1.18 : Exemple d'indexage

1.5.1.4 – les aiguillages et dérivations : ce sont les éléments technologiques indispensables si l'on désire concevoir une ligne avec des postes de travail en dérivation. Leur fonction est de dériver ou pas les palettes de la ligne principale sur une unité de transfert perpendiculaire. La dérivation se fait par lecture d'informations portées par la palette elle-même.

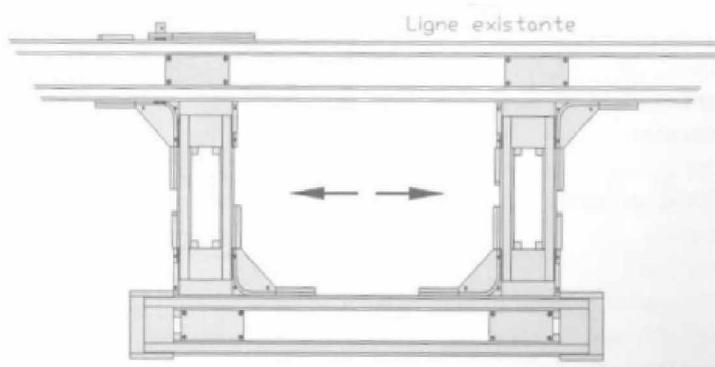


Figure 1.19 : Exemple de poste en dérivation [Fon99]

1.5.2 – Fonction *Assembler*

Sur transfert libre (cadre de notre étude), les postes d'assemblage peuvent être manuels ou automatisés et travailler à des cadences différentes, surtout s'ils sont placés en dérivation par rapport à la ligne.

La fonction *Assembler* se décompose en plusieurs sous-fonctions dans le cas d'un assemblage par pièce maîtresse : *Stocker*, *Alimenter*, *Manipuler*, *Insérer*.

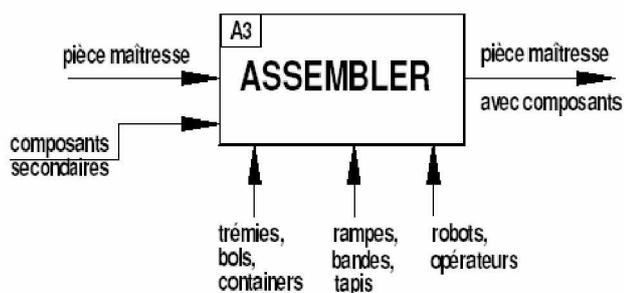


Figure 1.20 : Fonction *Assembler*

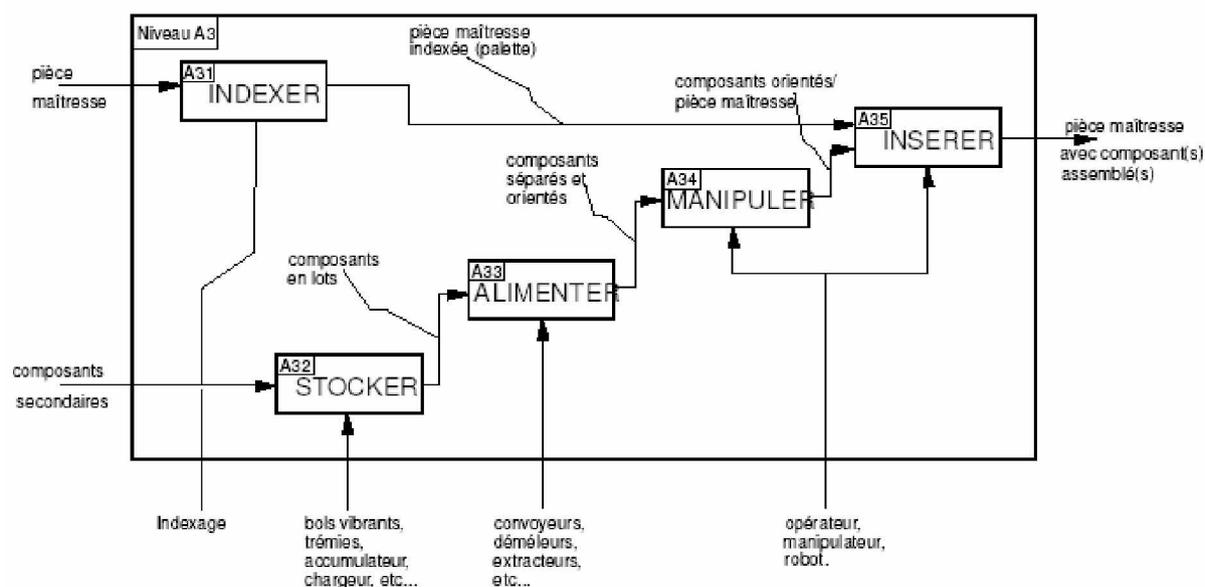


Figure 1.21 : Analyse détaillée de la fonction Assembler [Fon99]

1.5.2.1 – Description de la sous-fonction *stocker*

Le stockage permet l'accumulation de composants autorisant une certaine autonomie du poste d'assemblage en le découplant du système amont qui peut être un magasin central, un atelier de fabrication ou un autre poste d'assemblage.

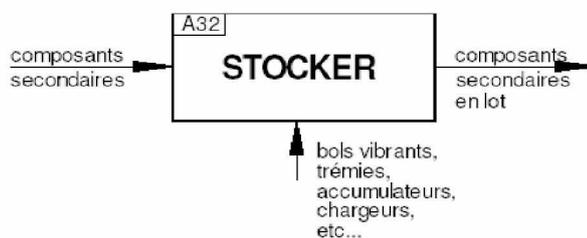


Figure 1.22 : La fonction *stocker*

Le stockage des composants peut être réparti sur plusieurs niveaux liés :

- § Niveau 1 : stockage de composants pour la journée ;
- § Niveau 2 : stockage de composants pour quelques minutes de fonctionnement.

C'est par exemple le cas lorsque la fonction Stocker est réalisée à partir de prévisions. La détermination de cette quantité peut être évaluée à partir de prévisions de commande.

En fonction de la forme géométrique des composants et de la nature du stockage, on rencontre différents types de dispositifs [Oli89], [Ram95] :

- § *Stockage de composants isolés* : bandes ou plateaux alvéolés, utilisés surtout dans l'industrie électronique, pour le stockage de composants petits et fragiles.

§ *Stockage de composants empilés, alignés ou en files (appelé aussi stockage 1D)* : goulottes, rails, convoyeurs à bande ou vibrants avec dispositifs d'autoalignement des composants.

§ *Stockage de composants en vrac planaire (2D) et volumique (3D)* : les dispositifs utilisés pour ce type de stockage sont les plus complexes et présentent des risques de défaillances qui sont à l'origine de 60% de dysfonctionnement d'un poste d'assemblage [Cet95]. Parmi ceux-ci, les plus fréquents sont les bols vibrants associés aux trémies, et les alimenteurs centrifuges, élévateurs ou rotatifs. La particularité de ces dispositifs est qu'ils sont, la plupart du temps, spécifiques à un composant. Ils présentent donc peu ou pas du tout de flexibilité, ce qui est contraire au type de production étudié.

La solution qui semble la plus flexible aujourd'hui est l'utilisation d'un robot associé à un système de vision artificielle. Il est à noter que cette solution concerne non seulement la fonction Stockée mais aussi les autres fonctions du poste d'assemblage : *Alimenter*, *Manipuler*, *Insérer*.

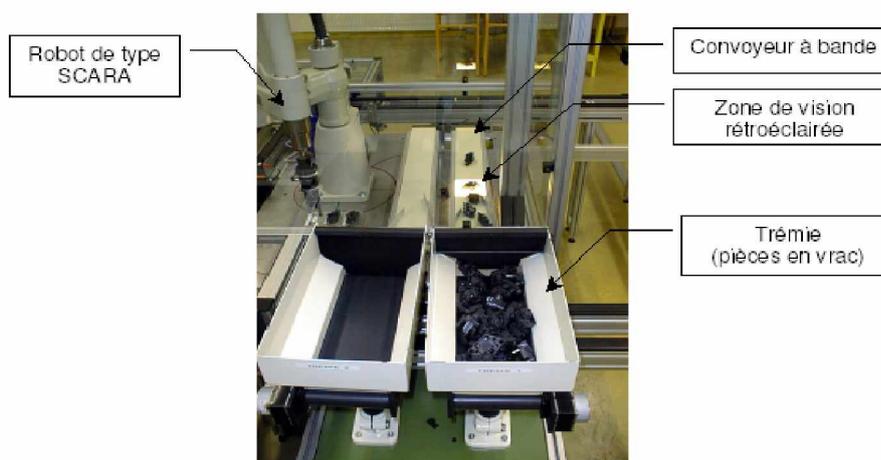


Figure 1.23 : Exemple de distributeur flexible assisté par vision

1.5.2.2 – Description de la sous-fonction *Alimenter*

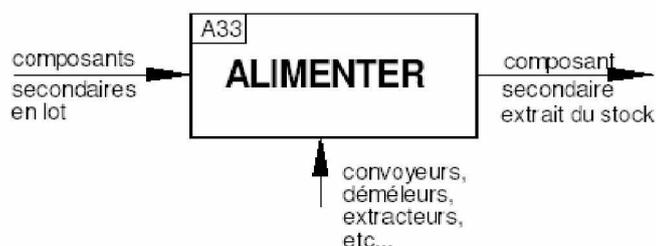


Figure 1.24 : La fonction Alimenter

La réalisation pratique de la fonction Alimenter est souvent associée à la fonction Stocker. Cette fonction permet d'extraire un composant du stock et de le présenter dans une

orientation permettant ensuite sa manipulation. En sortie de stock, on trouve des dispositifs permettant de piéger les composants mal orientés et de les renvoyer dans le stock.

Lorsque la fonction Stocker est réalisée à partir d'un système vibrant, la sortie des composants n'est pas continue. La fonction Alimenter doit dans ce cas permettre aussi d'accumuler quelques composants dans la bonne orientation afin de ne pas freiner la cadence du poste d'assemblage. On utilise alors de petits convoyeurs à bande ou tout simplement des rampes gravitaires.

1.5.2.3 – Description de la sous-fonction *Manipuler*

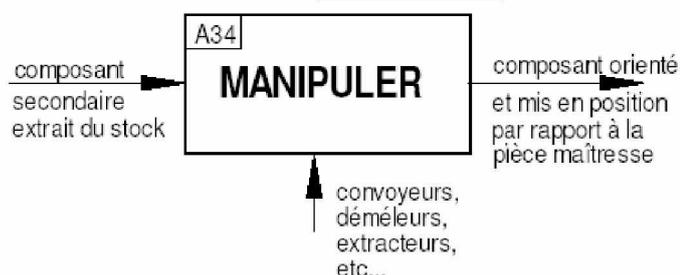


Figure 1.25 : La fonction Manipuler

Deux cas peuvent se présenter pour la réalisation de cette fonction :

§ Manipulation manuelle : c'est un opérateur qui réalise l'opération. La conjoncture économique et sociale peut avoir un effet non négligeable sur ce choix. Sur un poste d'assemblage, l'opérateur est utilisé soit pour réaliser des opérations à la fois simples et variées, pour lesquelles une automatisation sera trop coûteuse, soit pour des opérations d'une grande complexité où l'intelligence et la dextérité humaine sont irremplaçables.

§ Manipulation automatisée : les solutions technologiques pour automatiser cette fonction sont nombreuses, mais là encore, seuls les robots permettent d'obtenir la flexibilité nécessaire à une production multiproduit. Ils font l'objet de recherche permanente pour améliorer leurs performances et leurs environnements. Aujourd'hui, plusieurs constructeurs annoncent des répétitions de positionnement de ± 5 microns. Parallèlement, les coûts ont bien diminué ces dernières années.

Les architectures de type Portique et Scara (3 à 4 axes), actuellement les plus répandues, sont pour des cycles où le composant manipulé reste dans une orientation parallèle au plan de la prise et de la dépose.

Les robots polyarticulés verticaux (5 à 6 axes) permettent des trajectoires plus complexes pour la réalisation de tâches d'assemblage selon des orientations différentes.

On peut rappeler que dans le cas où le transfert des produits est réalisé par une ligne comportant des postes de travail en dérivation, la cohabitation des postes d'assemblage manuels et automatisés ne pose aucun problème. En effet, des zones de stockage en amont des postes permettent aux postes manuels de ne pas être astreints à suivre la cadence des postes automatisés. Les temps de cycle de chacun des postes doit toutefois rester proches les uns des autres afin d'éviter une saturation en amont du poste le plus lent et une réduction du taux d'engagement du poste le plus rapide.

1.5.3 – Fonction *Charger/Décharger*

Comme nous l'avons vu dans les fonctions *transférer* et *Assembler*, le principe de l'assemblage par *pièce maîtresse* nécessite de la positionner sur la palette dès le début du processus. De même, lorsque toutes les opérations de la gamme sont terminées, le produit assemblé doit être retiré de la palette. La fonction *Charger/Décharger* est le plus souvent réalisée sur un poste de travail similaire aux postes d'assemblage, c'est-à-dire disposé en dérivation par rapport à la ligne principale. La seule particularité du poste chargement/déchargement est sa zone de stockage qui doit être importante pour pouvoir accumuler plusieurs palettes en attente de lancement.

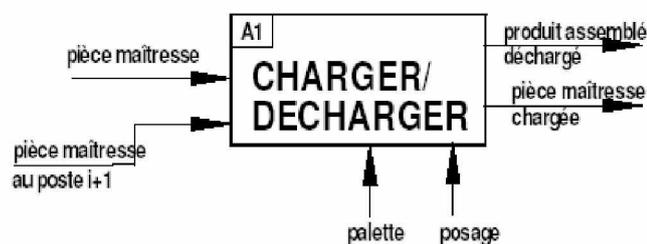


Figure 1.26: La fonction *Charger/Décharger*

Lors des opérations d'assemblage, principalement celles qui sont automatisées, la position de la pièce maîtresse sur la palette doit être suffisamment précise et présenter une bonne répétitivité. On doit donc utiliser des posages, réalisés spécialement en fonction de la forme et des dimensions de la pièce maîtresse, dont le rôle est d'en assurer la mise en position précise sur la palette pour que les opérations d'assemblage les plus délicates puissent s'effectuer sans aléa. Si nécessaire, des dispositifs de maintien peuvent équiper le posage pour éviter le déplacement de la pièce maîtresse ou des composants.

1.6 – Conception et remodelage d’ateliers

En raison de leur importance industrielle, le problème de la conception d’ateliers multi-produits apparaît comme un enjeu majeur et s’intègre au sein d’une succession de décisions qui vont de la définition des choix stratégiques de l’entreprise à l’optimisation de la production (figure 1.27). De plus en plus, le contexte économique actuel rend rédhibitoire le recours à l’empirisme qui prévalait jusqu’ici pour concevoir de tels ateliers, et qui aboutissait dans de nombreux cas à leur suréquipement.

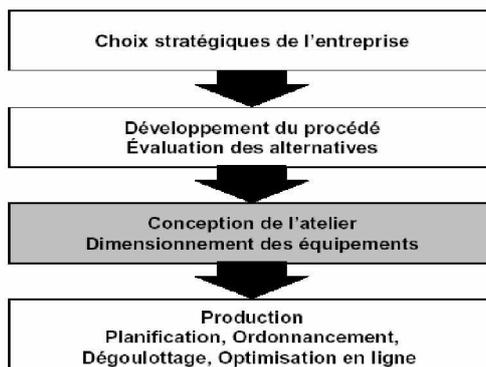


Figure 1.27 : Approche décisionnelle multiniveaux en conception et ordonnancement de procédés [Die04].

Le but de la conception consiste à déterminer le nombre et les dimensions des équipements nécessaires pour chacune des opérations unitaires intervenant dans les procédés d’élaboration des différents produits afin d’assurer un niveau de production donné, tout en optimisant un critère technico-économique. Toutefois, il est difficile de l’aborder sans mentionner d’autres sujets qui lui sont étroitement liés et souvent traités simultanément, notamment la gestion et le remodelage.

Le remodelage d’un atelier, souvent qualifié par le terme anglo-saxon de « retrofitting », peut résulter d’une modification dans la liste des produits à élaborer (nouveaux produits à fabriquer, suppression de produits de la liste initiale), d’un réajustement de la demande, d’une amélioration de la flexibilité du procédé, d’une réduction des coûts opératoires, de la consommation énergétique ...

Papageorgaki et Reklatis [Pap93] considèrent deux types de modification :

F Modification pour expansion, par augmentation du niveau de production : si la liste de produits reste fixée, la stratégie opératoire n’est pas modifiée. Le paramètre sur lequel on agit généralement est la durée des campagnes, en autorisant éventuellement l’addition d’équipements en parallèle.

F Modification pour tenir compte d'une nouvelle liste de produits à fabriquer : ce cas peut imposer des modifications importantes, y compris la décision d'introduire ou non de nouveaux équipements et de supprimer ou non des équipements existants.

L'addition de nouveaux équipements peut imposer de nouvelles décisions d'affectation des tâches. Le retrait d'équipements peut affecter la taille des lots et altérer la performance du système.

1.6.1 – Formulation classique du problème de conception

Plus précisément, le problème de conception optimale d'un atelier de type multi-objectif est défini par Papageorgaki et Reklaitis [Pap90] dans les termes suivants :

Etant donnés :

- un ensemble de N produits, des spécifications sur leur production et un horizon de temps.
- un ensemble d'équipements disponibles classés selon leur fonction en familles d'équipements.
- des recettes d'élaboration de chaque produit incluant les relations d'antériorité entre opérations unitaires et les temps opératoires correspondants.
- l'ensemble des équipements admissibles pour chaque produit.
- l'état stable ou instable des intermédiaires et les règles de transfert des produits.
- les niveaux d'utilisation des ressources, les temps de transfert entre équipements.
- la disponibilité du stockage.
- un (voir des) critère(s) de performance technico-économique, impliquant les coûts en investissement, frais d'exploitation, main d'œuvre et stockage ...

Il s'agit de déterminer une structure d'atelier qui permette d'assurer la production (capacité et nombre des équipements et bacs de stockage) pour optimiser le (ou les) critère(s) de performance retenu(s).

Cette formulation est connue dans la littérature dédiée sous la dénomination « approche à facteurs de temps et de taille⁵ constants ».

Le problème de conception multicritère des ateliers discontinus se transpose de la façon suivante : il s'agit de déterminer le nombre et la taille des équipements (et des bacs de stockage) ainsi que les conditions opératoires de chaque opération unitaire, ayant comme données les recettes d'élaboration et la production souhaitée pour chacun des produits avec

¹ On appelle facteur de taille S_{ij} la taille caractéristique de l'équipement utilisé à l'étape j pour produire une quantité unitaire de produit i .

pour fonctions objectifs un critère économique ainsi que des critères associés à l'impact environnemental, et éventuellement d'autres critères, comme la sécurité ou la flexibilité.

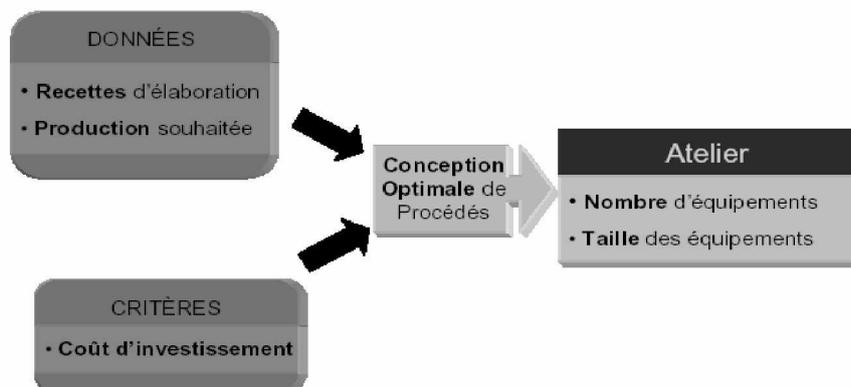


Figure 1.28 : Approche classique pour la conception d'ateliers [Ded01]

1.6.2 – Méthodes de résolution des problèmes de conception

1.6.2.1 – Approches classiques de résolution monocritère du problème de conception d'ateliers

Les principaux algorithmes d'optimisation monocritère peuvent être répertoriés en deux groupes : d'une part, ceux à caractère déterministe qui nécessitent au préalable une formulation (critères et contraintes) et des propriétés mathématiques précises (convexité, dérivabilité, ...) du problème à traiter, et d'autre part, ceux de nature stochastique qui s'appuient sur des règles d'évolution probabilistes. Ces derniers ne requièrent la vérification d'aucune formulation et propriété mathématique particulière.

1.6.2.1.1 – Approches déterministes

Dans le cadre de la conception ou du remodelage d'ateliers multiobjectifs, les procédures les plus utilisées dans la littérature sont des procédures de type MINLP. En effet, la formulation générale du problème fait apparaître des critères et contraintes généralement non linéaires, comportant des variables entières traduisant par exemple la présence ou l'absence d'unités, et des variables réelles correspondant aux conditions de fonctionnement, aux divers bilans, etc.,... Dans certaines applications particulières, le problème peut être linéaire ou linéarisé ; il est alors résolu au moyen de procédures MILP (Mixed Integer Linear Programming) ou « Branch and Bound ».

En présence de propriétés mathématiques satisfaites telles que la dérivabilité par rapport aux variables continues, la convexité, .., la convergence de ces méthodes vers un optimum global est assurée.

Un des inconvénients majeurs de cette démarche déterministe réside dans l'aspect combinatoire des problèmes. En effet, le nombre de variables et de contraintes peut devenir rapidement très important en présence d'ateliers de taille industrielle. C'est pourquoi la grande majorité des publications dans ce domaine ne concerne que des exemples didactiques et/ou s'appuie sur des hypothèses simplificatrices restrictives, telles que :

- instabilité des produits ignorée,
- stockage illimité,
- pas de partage d'un équipement entre plusieurs recettes.

1.6.2.1.2 – Approches stochastiques

Les algorithmes stochastiques comme la procédure du recuit simulé (RS), les algorithmes génétiques (AG), les colonies d'insectes (intelligence collective) sont basés sur une évolution probabiliste de la (ou des) solution(s) au problème posé. Leur inconvénient majeur est l'incertitude quant à l'obtention d'une solution optimale à chaque essai de la procédure [Cav97] et [Jon02].

1.6.3.2 – Méthodes d'optimisation multiobjectifs

Dans le cas de l'optimisation, le concept de base utilisé est le concept d'optimum de Pareto [Par96], qui constitue les origines de la recherche sur l'optimisation multicritère⁶. Cependant, dans la plupart des cas, l'optimum de Pareto n'est pas constitué d'une seule solution mais d'un ensemble de solutions appelées solutions non-dominées au sens de Pareto.

Les deux techniques les plus utilisées permettant de ramener le problème multicritère à un problème monocritère sont la méthodologie de la somme pondérée ou la méthode ε -contraintes. En modifiant leurs paramètres, ces deux méthodes permettent de retrouver l'ensemble de solutions optimales au sens de Pareto. Elles sont très souvent utilisées car elles permettent l'utilisation de techniques d'optimisation monocritère pour aborder des problèmes multiobjectifs [Die04].

⁶ Pour plus de détails voir [Par96] et [Die04]

1.6 – Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordés toutes les notions élémentaires essentielles à notre étude afin l'entamer sans aucune ambiguïté.

A cet effet, Nous avons d'abord introduit la notions de production, les systèmes de production et la décomposition de ces derniers, mais nous nous sommes intéressés beaucoup plus à la partie physique afin de se familiariser avec toutes les composantes de tels systèmes, voir, démontrer l'impact que peut avoir ces derniers sur le fonctionnement futur de l'atelier, sachant que l'objectif de notre étude est l'optimisation du fonctionnement d'un atelier cyclique d'assemblage. Selon le paragraphe § 1.2.3, le système étudié est un SFM c'est-à-dire une cellule de production flexible. Nous rappelons que le processus d'assemblage dans la cellule étudiée est par pièce maîtresse (§1.13), le transfert y est asynchrone automatisé (§1.5.1) moyennant des palettes libres suivant une architecture d'une seule piste avec postes de travail en dérivation (§1.5.1.1.2).

Dans le prochain chapitre, Nous aborderons la partie pilotage des systèmes flexibles de production et plus précisément la fonction ordonnancement. Afin d'affiner nos horizons, nous nous intéresserons aux configurations dites du type Open Shop. Un état de l'art sur les méthodes et algorithmes de liste de résolution existants des problèmes du type Open Shop y seront présentés.

Chapitre 2 :

Généralités sur le pilotage des SFP et sur l'Ordonnancement Open Shop

2.1 – Introduction

Les modifications, améliorations ou transformations de produits, sont de plus en plus fréquentes et la notion de flexibilité est fortement liée à cette évolution. La concurrence exige que l'entreprise se dote d'un système de production efficace qui réagisse rapidement aux contraintes du monde environnant et en particulier aux exigences et évolutions du marché. Deux types d'évolutions non antagonistes, bien au contraire, semblent émerger pour tenter de répondre au problème de la survie de l'entreprise :

- intégration cohérente de la gestion de production avec une importance particulière pour la transmission des informations et de la communication.
- automatisation de la fabrication pour l'amélioration de l'exécution des tâches et de l'ensemble des flux physiques.

Ce chapitre est consacré à la partie pilotage des systèmes de production et plus précisément à l'ordonnancement. La première section est consacrée à la fonction pilotage. Dans la seconde, nous nous intéressons de plus près à l'une des sous-fonctions du pilotage c'est la fonction conduite du système afin d'introduire la fonction ordonnancement qui représente l'un des point clés de notre étude. La troisième section, est dédiée aux généralités sur l'ordonnancement en l'entamant par certains concepts et définitions. La problématique de l'ordonnancement sera ainsi abordée. Nous nous sommes intéressés par la suite aux :

- différentes classes d'ordonnancement,
- éléments fondamentaux d'un problème d'ordonnancement,
- objectifs de l'ordonnancement,
- classifications des problèmes d'ordonnancement.
- différentes méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement.

Dans la quatrième section, nous abordons les différentes organisations d'ateliers afin d'introduire le cas qui nous intéresse : l'Open Shop. La cinquième section est consacrée aux ateliers Open Shop, ou nous aborderons quelques méthodes de résolutions basées sur les algorithmes de liste et la complexité des problèmes Open Shop.

2.2 – Pilotage des systèmes de production

Selon *l'approche automatique*, nous retrouvons derrière le concept de pilotage [Bre84], un système *physique*, partie opérative, qui effectue des opérations lorsque l'ordre lui en est donné par la partie commande. La partie commande élabore des ordres à partir de comptes *rendus* venant des processus physiques et des objectifs qui lui sont donnés.

Selon Melnyk [Mel87], le pilotage d'atelier est défini comme *le groupe d'activités directement responsable de la gestion de la transformation d'ordres de fabrication planifiés en pièces sorties de l'atelier*. Il gouverne le planning court terme détaillé, les activités d'exécution et de suivi nécessaires pour contrôler l'écoulement d'un ordre de fabrication depuis le moment où l'ordre est lancé par le planning jusqu'à son exécution complète.

Le pilotage affecte le travail des moyens de production afin de respecter le plan et les délais fixés par la planification à court terme. Cette activité s'appelle l'ordonnancement.

Bel [Bel91] complète la définition de Melnyk, en indiquant *que le pilotage d'atelier couvre les activités de conduite du système et la mesure de son état en vue de déterminer les actions correctives les plus appropriées*.

Selon l'approche producticienne, *l'objectif principal de la fonction pilotage de la production est la bonne exécution du programme prévisionnel de production par le système physique*, [Nag91].

Le système de pilotage collecte, stocke, traite et transmet des informations d'une part, et pilote le système à travers les informations recueillies, en fonction de l'environnement et de son processus de décision, d'autre part il est composé de :

- § Des points de captage (les capteurs), pour la récupération de l'information à différents points du système de production ;
- § Du processus de décision pour l'analyse et le traitement de l'information et la génération des décisions ;
- § Des points d'actions qui constituent les points de passage d'ordre vers le système physique.

Le système de pilotage récupère en entrée des informations et fournit en sortie, après traitement, des informations et des décisions. Ces décisions peuvent être soit des ordres de fabrication (issus du processus d'ordonnancement) soit des actions correctives (réaction aux aléas) sur le système, impliquant la mise en œuvre de certaines règles de conduite. La réactivité du système de production dépend en premier lieu de la capacité de réaction de son système de pilotage. Cette capacité est liée au nombre et à la qualité des points de captage et des points d'action d'une part, et aux processus de décision, d'autre part. le système de pilotage est ainsi un ensemble de points de pilotage (points de captage + processus de décision + point d'action) interférents [Bak96].

2.3 – Décomposition de la fonction de pilotage

Le pilotage est défini par Trentesaux et al. [Tre96] comme la structure de décision et d'information associée à la gestion temps réel. La fonction pilotage « temps réel » comprend deux sous-fonctions (figure 1.2) :

- la fonction *conduite*,
- la fonction *commande*.

La fonction conduite regroupe les activités décisionnelles qui sont traduites en ordres et transmises au niveau commande. Ce dernier niveau gère la réalisation du processus physique de fabrication et retourne au niveau conduite un ensemble de données de suivi. Cette approche reprend la notion de boucle de rétroaction.

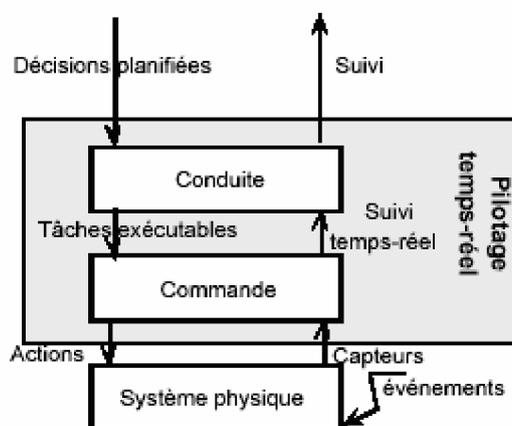


Figure 2.1 : les fonctions de pilotage

2.4 – La conduite des systèmes de production

La fonction principale de la partie conduite est d'élaborer les ordres nécessaires à la partie opérative (physique). Le rôle de la conduite des systèmes de production est de diriger, guider et piloter, de manière à assurer la pertinence et la cohérence du système dans un environnement donné. La conduite peut être considérée comme l'art d'adapter en permanence les objectifs de l'entreprise à l'évolution de l'environnement à travers l'analyse des contraintes et des opportunités. La conduite réactive d'un système de production se définit comme la capacité à répondre à une demande fluctuante en nature et en quantité de produits variés et personnalisés, dans des délais respectés et de plus en plus courts. C'est une démarche visant à répondre à la demande du client et correspond à l'un des facteurs mesurant la compétitivité industrielle de l'entreprise. Un système est réactif si les conditions de flexibilité sont assurées au sein de l'entreprise [Dra98].

Les principales missions du système de conduite peuvent être résumées de la façon suivante : auto-organisation, adaptation, optimisation et régulation.

La conduite d'un système de production consiste à utiliser un système de décision pour faire exécuter par le système physique l'ensemble des opérations de fabrication qui lui sont affectées :

- en respectant au mieux les objectifs de production fixés, tout en satisfaisant les contraintes spatiales, temporelles et de coûts ;
- en s'assurant que chaque ordre transmis est cohérent vis-à-vis du caractère perturbé de l'environnement dans lequel évolue le système ;
- en utilisant un système d'information cohérent réalisant une interface robuste entre le système physique et le système de décision.

Le système de décision définit des cadres de décisions dans lesquels il précise les opérations à accomplir, les grandeurs sur lesquelles il est possible d'agir, les méthodes à suivre ainsi que les limites. Il s'articule autour d'une organisation en boucle (Figure 2.2) constituée de quatre activités suivantes :

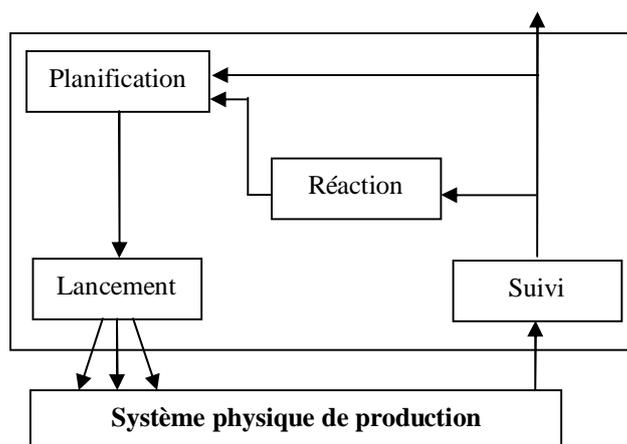


Figure 2.2 : Le modèle conceptuel du système de décision [Dra98]

§ *la planification*, qui consiste à mettre en œuvre des techniques d'ordonnancement. Intégrée dans le processus global de conduite, la planification propose une affectation pour les différentes opérations, dans le temps et l'espace. C'est un moyen unique et incontournable pour s'assurer du respect des objectifs fixés. Néanmoins les méthodes de calcul employées pour sa mise en œuvre sont souvent pénalisantes dans le temps.

§ *le lancement*, qui répartit et transmet les ordres au système en tenant compte de l'état des entités de production ;

§ *le suivi*, qui recueille l'ensemble des événements survenant dans l'atelier et qui met à jour une image interne du système opérant ;

§ *la réaction*, qui corrige les déviations induites par les aléas de production. Cette activité est très liée à celle de la planification, car il s'agit de prendre des mesures correctives tout en s'assurant du respect des objectifs de production.

La conduite en temps réel d'un système de production est une tâche complexe qui requiert des connaissances dans les domaines de l'informatique, de l'automatique, de la production, de la communication homme - machine etc. Sa difficulté est due :

- à la complexité du problème d'ordonnancement ;
- à la nécessité de résoudre le problème d'ordonnancement dans un contexte perturbé ;
- au problème intrinsèque du suivi, souvent banalisé dans la plupart des systèmes ;
- à l'intégration du système de conduite dans le système global de gestion de production.

Pour gérer le déroulement des opérations sur les moyens de production la conduite doit respecter les contraintes techniques suivantes :

- une machine exécute au plus une opération à la fois (contrainte d'exclusion mutuelle) ;
- une opération commencée sur une machine doit être terminée sans interruption sur la même machine (contrainte de non - préemption) ;
- la fabrication d'une pièce nécessite un ensemble d'opérations qui doivent être effectuées dans un ordre spécifique (contrainte de précédence).

Finalement, pour garantir de meilleure performance d'un système de production, il faut bien le gérer. Pour mieux le gérer, il faut bien le piloter. Pour bien le piloter, il faut s'assurer de sa bonne conduite, l'un des paramètres de la bonne conduite d'un système de production est la résolution du problème d'ordonnancement. Car c'est le niveau le plus bas de la fonction planification qui consiste à proposer une affectation pour les différentes opérations, dans le temps et l'espace. C'est un moyen unique et incontournable pour s'assurer du respect des objectifs fixés.

Pour que la conduite se charge de la traduction de l'ordre de fabrication en une séquence d'instructions exécutables par une ressource il faut d'abord, que la séquence en question soit déterminée par l'ordonnancement.

2.5 – Les problèmes d'ordonnancement

Le plan de charge permet de vérifier si la charge occasionnée dans l'atelier par les commandes n'est pas supérieure à la capacité des ressources de l'atelier. Dans le cas contraire, des réajustements de charge (lissage) ou de capacité (sous-traitance, heures ou équipes

supplémentaires) peuvent être faits. Les données sont transmises à la fonction ordonnancement.

Bien que globalement l'adéquation charge/ capacité soit vérifiée sur un horizon donné, on se retrouve au niveau du lancement avec plusieurs ordres de fabrication (OF) présentant diverses contraintes telles que les dates d'achèvement, les dates de livraison, la non préemption, ..., etc. faisant qu'il est impossible de les traiter en même temps. A ce niveau, un séquençement des ordres de fabrication sur les ressources s'impose. Nous parlons, dans ce cas là, d'ordonnancement.

2.5.1 – Définitions

On distingue plusieurs définitions pour le problème d'ordonnancement. Citons par exemple :

« Ordonnancer la production, c'est planifier les dates de lancement et de fin des opérations ainsi que l'affectation de ces opérations aux différents postes de production susceptible de les exécuter. On classe généralement la fonction d'ordonnancement parmi les activités de planification à très court terme, quoique dans le cas d'ordonnancement de projets elle puisse par fois tenir compte d'un horizon de plusieurs années » [Dup97].

« Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leurs exécutions en leurs allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début » [Got93].

« L'ordonnancement est une fonction permettant de déterminer les priorités de passage des produits et leurs affectations sur les différentes machines » [Hen99].

« Le problème d'ordonnancement a pour objet de définir, prévoir et coordonner l'ensemble des ressources physiques et humaines nécessaires à la fabrication. La solution de ce problème devra permettre d'optimiser l'utilisation des ressources tout en respectant les délais de réalisation fixés. Cette solution doit donc répondre aux questions suivantes : Qui ? Quoi ? Quand ? Combien » [Jav97]. « La réponse sera obtenue lorsqu'on saura quelle est la séquence de passage des travaux et les machines sur lesquelles ils doivent passer, tout en optimisant un ou plusieurs critères donnés » [Hen99].

« Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement,...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches » [Lop01].

L'ordonnancement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (ou activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et

techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques, et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [Got93] et [Esq99]. Les ordres de fabrication (OF), suggérés par le calcul des besoins, représentent chacun une requête pour fabriquer une quantité déterminée de pièces pour une date donnée. Ils constituent les données d'entrée de l'ordonnancement et permettent de définir, au moyen des gammes de fabrication, l'ensemble des tâches que la fonction ordonnancement doit planifier.

2.5.2 – Problématique de l'ordonnancement

Résoudre un problème d'ordonnancement consiste à trouver une planification des tâches sur les ressources en optimisant les objectifs et en respectant les contraintes. La modélisation du problème dépend fortement de différents paramètres, contraintes, objectifs... . Les problèmes d'ordonnancement sont différenciés suivant le nombre de machines (problèmes à machine unique ou multi-machines) et, si l'on a plusieurs machines, suivant l'ordre de réalisation des tâches [Got93] et [Esq99].

Un ordre de passage des tâches constitue une solution aux problèmes d'ordonnancement. Il décrit l'exécution des tâches et l'allocation des ressources au cours du temps, et vise à satisfaire un ou plusieurs objectifs. Plus précisément, on parle de problèmes d'ordonnancement lorsque on doit déterminer les dates de début et les dates de fin des tâches, alors qu'on réserve le terme de séquençement au cas où l'on cherche seulement à fixer un ordre relatif entre les tâches qui peuvent être en conflit pour l'utilisation des ressources. Un ordonnancement induit nécessairement un ensemble unique de relation de séquençement.

2.5.3 – Objectifs de l'ordonnancement

Le traitement de l'ordonnancement dans la littérature s'est tout d'abord orienté vers une optimisation monocritère. L'environnement manufacturier évoluant rapidement et la concurrence devenant de plus en plus acharnée, les objectifs des entreprises se sont diversifiés et le processus d'ordonnancement est devenu de plus en plus multicritère. Les critères que doit satisfaire un ordonnancement sont variés. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement [Esq99] :

– *Les objectifs liés au temps* : on trouve par exemple la minimisation du temps total d'exécution, du temps moyen d'achèvement, des durées totales de réglage ou des retards par rapport aux dates de livraison,

Les objectifs liés aux ressources : maximiser la charge d'une ressource ou minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches sont des objectifs de ce type,

Les objectifs liés au coût : ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, etc.

Les objectifs liés à une énergie ou un débit.

Les objectifs à satisfaire au niveau de l'ordonnancement sont issus des objectifs globaux de l'entreprise, par décomposition. Cette décomposition conduit à une structure d'objectifs qui permet de gérer les contradictions et les compromis [Far90] et [Gra98]. Un exemple de structure d'objectifs est présenté dans la Figure 2.3 utilisée à moyen terme [Esq99]. Son horizon et sa période sont donc relativement courts. L'horizon d'un ordonnancement est en général d'une à trois semaines, la période varie de deux ou trois jours à une semaine.

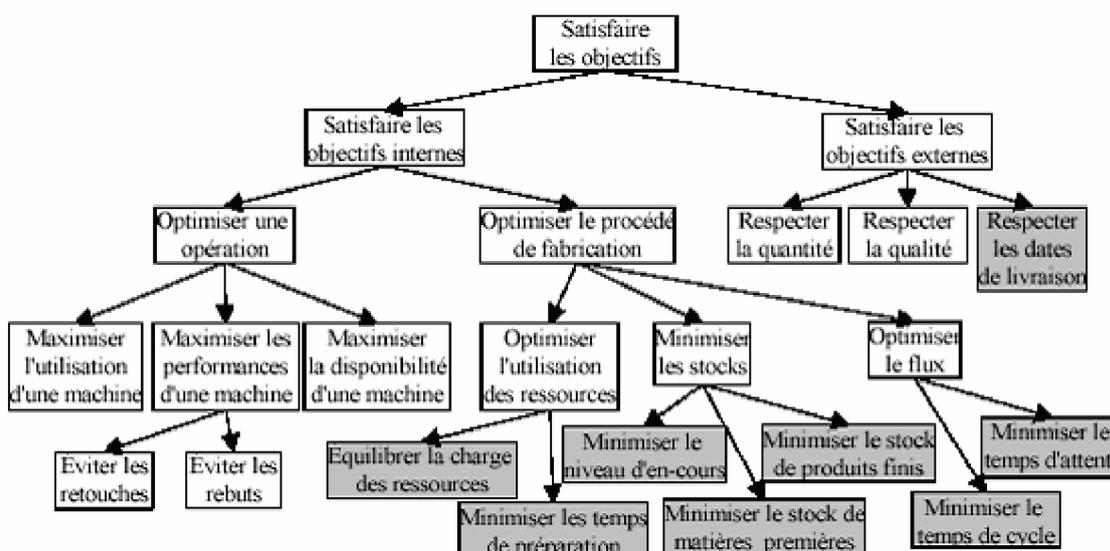


Figure 2.3 : Structure d'objectifs [Gra98]

Dans cet exemple de décomposition, les objectifs de haut niveau (stratégiques) sont séparés en objectifs externes, qui quantifient la relation entre l'entreprise et son environnement, et internes, qui évaluent les performances des ressources du système. On ne conserve ici que les objectifs concernant la fonction ordonnancement (grisés sur la Figure 2.3). Chaque entreprise a ses propres critères, dépendants de sa politique, de son passé, de ses problèmes particuliers... Même si on y retrouve certains points communs, ces objectifs sont trop dépendants de la compagnie, de l'environnement manufacturier ou tout simplement de la personnalité et des habitudes du responsable de la production pour pouvoir être définitivement fixés dans les méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement.

2.5.4 – Eléments fondamentaux d'un problème d'ordonnancement d'ateliers

2.5.4.1 – Les tâches

Une tâche (job) correspond à la fabrication d'un objet (ou la fourniture d'une prestation d'un service) [Bot99]¹. Selon les problèmes, les tâches peuvent être exécutées par morceaux ou sans interruption. On parle alors, respectivement, de problèmes préemptifs et non préemptifs. Suivant les conditions de fabrication, chacune des phases, dans l'exécution d'une tâche, peut fortement conditionner le temps de séjour d'un produit dans un atelier [Esq99].

2.5.4.2 – Les opérations

Lorsque la réalisation d'une tâche requiert successivement plusieurs ressources, on dira que chaque ressource réalise une opération de la tâche considérée.

La gamme d'une tâche décrit la séquence des opérations de cette tâche [Gaz03].

Les gammes

Les gammes de fabrication décrivent la succession des opérations à réaliser pour passer d'une matière au composant ou du produit semi-fini au produit fini, c'est le processus d'élaboration. On trouve dans la littérature non spécialisée, l'appellation de routage de la tâche et dans la littérature anglophone le terme : routing. Il existe plusieurs sortes de gammes, dont on distingue [Hen99]² :

- § Les gammes libres où gammes non linéaire (c'est le cas considéré dans notre étude) ;
- § Les gammes linéaires ;
- § Les gammes techniques ;
- § Les gammes mixtes ou semi-linéaires.

2.5.4.3 – Les ressources

Une ressource j est un moyen technique ou humain destiné à être requis pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée, sa capacité a_j est supposée constante. On distingue plusieurs types de ressources [Esq99] et [Lop01]³ :

- § Ressources renouvelables ;
- § Ressources consommables ;
- § Les ressources doublements contraintes ;

¹ Voir Annexe 1.

² Voir Annexe 1.

³ Voir Annexe 1.

§ Les ressources disjonctives ;

§ Les ressources cumulatives.

La nature des ressources prises en considération permet de dresser une typologie des problèmes d'ordonnancement. La figure suivante illustre cette dernière.

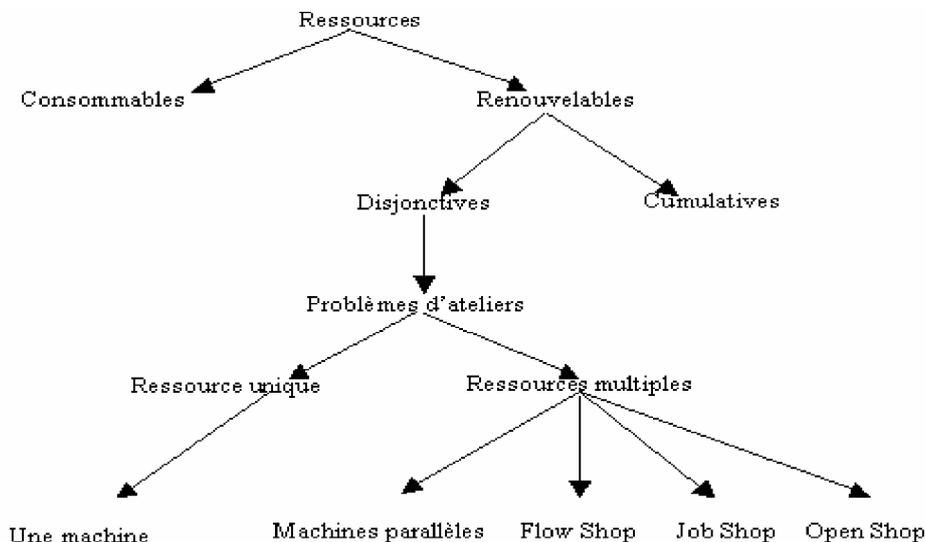


Figure 2.4 : Typologie par les ressources des problèmes d'ordonnancement

Remarque : Les problèmes non préemptifs à ressources renouvelables disjonctives couvrent une classe importante d'applications : les problèmes d'ateliers.

2.5.4.4 – Les contraintes

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement une ou plusieurs variables de décision. On distingue⁴ :

- § Contraintes physiques,
- § Contraintes temporelles,
- § Les contraintes disjonctives,
- § Les contraintes cumulatives.

2.5.5 – Propriétés des ordonnancements

Des sous-ensembles d'ordonnancement particuliers sont ici présentés dont certains présentent des propriétés de dominance vis-à-vis de tout critère⁵ régulier (minimisation de la durée, de la somme de retard,...)⁶.

⁴ Voir Annexe 1.

⁵ On appelle critère toute règle permettant de classer des ordres de fabrication ou des opérations à planifier à une étape précise des différentes méthodes de calcul. Il peut être temporel, potentiel ou structurel.

⁶ Voir Annexe 1.

- § Ordonnancement admissible.
- § Ordonnancement semi actif.
- § Ordonnancement actif.
- § Ordonnancement sans retard.
- § Ordonnancement au plus tôt / au plus tard.

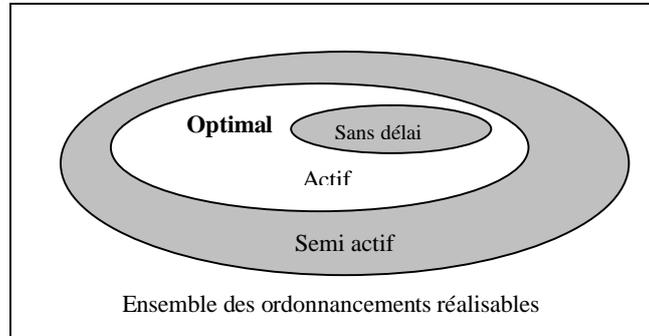


Figure 2.5 : Diagramme de Venn [Our01]

2.5.6 – Les critères de performances et leur évaluation

De nombreuses définitions des indicateurs de performance ont été données. La plus couramment admise, de nos jours, est celle donnée par l'Association Française de Gestion Industrielle dans [Afg92] : « Un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité et/ou l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système (réel ou simulé), par rapport à une norme, un plan ou un objectif, déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise. »

2.5.6.1 – Définitions

Nous définissons dans ce paragraphe les variables intervenant le plus souvent dans l'expression de la fonction objectif :

C_i : la date d'achèvement ou de terminaison de la tâche i (Completion time) ;

L_i : le retard algébrique de la tâche i (Lateness), $L_i = C_i - d_i$, (d_i : due date) ;

T_i : le plus grand retard absolu de la tâche i (Tardness), $T_i = \max(0, L_i)$;

U_i : l'indicateur de retard, $U_i = 0$ si $L_i \leq 0$ et 1 sinon ;

F_i : le temps de présence ou de séjours (Flow time) de la tâche i dans l'atelier, $F_i = C_i - r_i$,
(r_i : release date) ;

W_i : le temps d'attente de la tâche i (Waiting time), $W_i = C_i - r_i - \sum p_{ij}$;

E_i : l'avance absolue (Earliness), $E_i = -\min(0, L_i)$

2.5.6.2 – Classification des critères de performance

Nous pouvons regrouper les critères de performances suivant les quatre points ci-dessous :

- Les dates de fin notées c_i ,
- Les dates de livraison notées d_i ,
- Les volumes des en-cours (\bar{C}),
- L'utilisation efficace des ressources (C_{max}).

2.5.6.2.1 – Les critères basés sur la date d'achèvement

$C_{max} = \max(C_i)$: est la plus grande date d'achèvement, ou la durée totale (le Makespan), le temps nécessaire pour finir toutes les tâches.

$F_i = C_i - r_i$: est la durée de séjours (Flow time).

$F_{max} = \max(F_i)$: est le maximum du temps de séjours,

$W_i = C_i - r_i - \sum p_{ij}$: est le temps d'attente ;

$W_{max} = \max\{W_i / i \in [1, n]\}$: est le maximum des temps d'attente.

$\sum C_i$: est la somme des dates de fin d'exécution.

$\sum w_i C_i$: est la somme pondérée des dates de fin d'exécution.

Les critères suivant sont également basés sur les dates de fin des tâches : \bar{C} , \bar{F} et \bar{W} . Ce sont les moyennes arithmétiques, respectivement des dates de fin, des temps de séjours, et des temps d'attente. Dans certains cas, ces critères sont associés à une pondération w des tâches.

2.5.6.2.2 – Les critères basés sur la date de livraison

$L_i = C_i - d_i$: est le retard algébrique,

$L_{max} = \max(L_i)$: est le plus grand retard algébrique (maximum Lateness).

$T_i = \max(0, L_i)$: est le plus grand retard absolu (Tardiness)

$E_i = -\min(0, L_i)$: est l'avance absolue (Earliness)

Nous trouvons aussi des critères sous forme de moyennes arithmétiques, notée \bar{L} , \bar{T} et \bar{E} , ou bien encore pondérés par une pénalité. Le critère $N = \sum_{i=1}^n U_i$, représentant le nombre de tâches en retard, est également des plus utilisés.

2.5.6.2.3 – Les critères basés sur les volumes des en-cours

Le critère \bar{C} est des plus utilisés pour la minimisation des volumes des en-cours (l'en-cours est le plus souvent caractérisé par le temps moyen des travaux [Gia88]). C'est la moyenne arithmétique de l'ensemble des dates de fin.

Une opération est toujours caractérisée par le numéro de la tâche et l'atelier sur lequel elle passe. Soient s_o la date de début de l'opération o et p_o sa durée d'exécution. A chaque instant t on peut calculer les mesures suivantes :

$N_p(t) = \sum_{i=1}^n e_i(t)$ est le nombre de tâches en cours d'exécution.

$$\text{Avec } e_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } (s_o \leq t < s_o + p_o) \\ 0 & \text{sin on} \end{cases}$$

La maximisation de ce critère permettra l'exploitation de façon quasi optimale des ressources. Plus la valeur de ce critère est grande, plus le nombre de machines en attente est faible.

$N_w(t) = \sum_{i=1}^n e_i(t)$ est le nombre de tâches en attente.

$$\text{Avec } e_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } (s_o + p_o \leq t < s_{o+1}) \\ 0 & \text{sin on} \end{cases}$$

Minimiser ce critère permet de diminuer le nombre de tâches en attente dans les stocks intermédiaires des machines et par conséquent, de réduire la capacité intrinsèque des stocks.

$N_f(t) = \sum_{i=1}^n e_i(t)$ est le nombre de tâches terminées sur la dernière machine.

$$\text{Avec } e_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } (c_i \leq t) \\ 0 & \text{sin on} \end{cases}$$

La maximisation de ce critère permet de répondre au plus vite à la demande des clients.

Nous pouvons observer que $N_p(t) + N_w(t) + N_f(t) = N$ (N est le nombre de tâches à ordonnancer pour un horizon fixé) et, par conséquent, les objectifs de production dans ce cas peuvent être complètement antagoniste [Hen99] et [Rin76].

2.5.6.2.4 – Les critères basés sur l'utilisation des ressources

L'exploitation des ressources peut être aussi un souci majeur du gestionnaire. En plus du critère de minimisation de la plus grande date de fin C_{max} (Makespan), les critères suivants sont parmi les mieux appropriés, soient M_v le nombre de machines disponibles dans l'atelier v et C_{max} la plus grande date de fin de l'ordonnancement.

$$\bar{U} = \left(\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^v p_{i,j} \right) * \left(\sum_{j=1}^v M_j * C_{max} \right)^{-1} \right) \text{représente l'utilisation moyenne des ressources.}$$

Elle permet de signaler éventuellement la sous-utilisation des ressources de fabrication de l'entreprise. Elle indique par conséquent, les périodes pleines et les périodes creuses de la chaîne de fabrication.

$$I_v = \left(C_{max} - \sum_{i=1}^n p_{i,v} \right) * M_v \text{ est le temps d'inactivité (ou temps de repos, d'inoccupation)}$$

de l'atelier v (Idle time). Cet indicateur donne le temps d'inactivité de l'atelier correspondant et sa minimisation permettra une plus grande exploitation des ressources.

$$A_p(t) = \sum_{s_o \leq t \leq s_o + p_o} p_o \text{ est la quantité de travail en marche dans l'atelier à l'instant } t.$$

Maximiser le \bar{A}_p conduit à une utilisation efficiente des machines.

2.5.6.3 – Propriétés des critères

Un critère est dit régulier quand sa valeur décroît si et seulement si l'un au moins des C_i décroît (les autres restent fixes) [Our01] et [Gaz03].

Un critère en fonction des variables C_i est dit *régulier* si l'on peut le dégrader en avançant l'exécution d'une tâche. C'est pour la minimisation du temps total d'exécution, du plus grand retard, etc. [Esq99].

Un sous-ensemble de solutions est dit dominant pour l'optimisation d'un critère donné, s'il contient au moins un optimum pour ce critère [Esq99].

2.5.6.4 – Relation entre les critères

Nous nous intéressons dans cette section aux diverses relations d'équivalence et de similitude qui peuvent exister entre les critères d'optimisation. En effet, une solution optimale pour l'un ou l'autre des problèmes pour un critère donné peut s'avérer optimal pour un autre critère. La figure ci-dessous donne les liens entre certains critères, nous lisons au début, qu'une solution optimale pour le critère L_{max} est aussi optimale pour le critère C_{max} (avec $d_i = 0$). Autrement dit, une méthode qui optimise L_{max} optimise C_{max} , la méthode qui optimise le critère $\sum W_i C_i$ optimise aussi le critère $\sum C_i$, etc. [Pin95] et [Esq99].

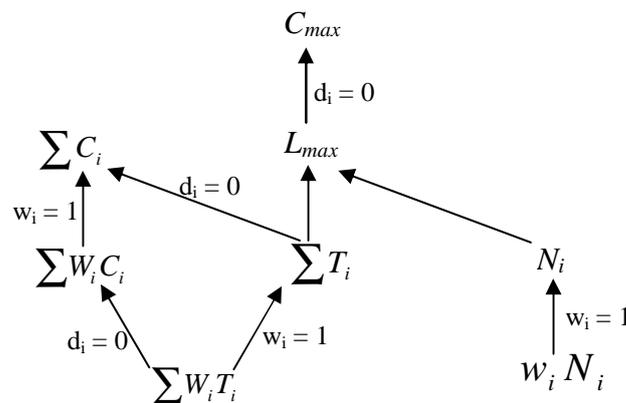


Figure 2.6 : Les relations entre les critères d'optimisation

Les théorèmes suivants présentent les équivalences entre les critères [Rin76]:

Théorème 1 : les critères suivants sont équivalents : C_{max} , \bar{N}_p , \bar{A}_p , $\sum I_v$, $\sum w_v I_v$ et \bar{U} .

Théorème 2: les critères suivants sont équivalents : $\sum C_i$, $\sum F_i$, $\sum W_i$, $\sum L_i$, \bar{C} , \bar{F} , \bar{W} et \bar{L} .

Théorème 3: les critères suivants sont équivalents : $\sum w_i C_i$, $\sum w_i F_i$, $\sum w_i W_i$ et $\sum w_i L_i$.

Théorème 4 : un ordonnancement optimal pour le critère L_{max} est aussi optimal pour le critère T_{max} .

Théorème 5: les critères suivants sont équivalents : $\bar{N}_p + \bar{N}_w$, \bar{N}_f et \bar{C} / C_{max} .

Théorème 6: les critères suivants sont équivalents : \bar{N}_w et \bar{W} / C_{max} .

Pour la démonstration de ces théorèmes, voir [Rin76] et [Gaz03].

Nous nous intéressons dans ce mémoire au temps de séjours des tâches dans le système d'assemblage.

2.5.7– Classification des problèmes d'ordonnancement

Plusieurs classifications ont été proposées depuis la définition du premier problème d'ordonnancement. Certains auteurs utilisent parfois d'autres classifications bien spécifiques. Plus les problèmes se diversifient plus nous aurons besoin d'actualiser nos notations tout en gardant un souci d'homogénéité des classifications existantes. Les classifications les plus connues sont :

- § Classification de Conway, Maxwell et Miller (1967)
- § Classification de Graham & al. (1979)
- § Classification de Lawler & al. étendue par Vignier & al. (1995)

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à la classification de Graham & al. étant donné que les paramètres considérés dans le problème sont très bien pris en compte dans celle-ci, au contraire des deux autres dont les paramètres sont nombreux.

Cette classification est basée sur trois paramètres notés $\alpha/\beta/\gamma$.

Le premier paramètre α est composé de deux sous-paramètres α_1 et α_2 ($\alpha = \alpha_1\alpha_2$). $\alpha_1 = \{\Phi, P, Q, R, O, F, J\}$ caractérise l'organisation des machines dans le système (Φ : une seule machine, P : machines identiques, Q : machines uniformes, R : machines différentes (indépendante), O : machines dédiées pour les systèmes du type « Open Shop », F : machines dédiées pour les systèmes du type « Flow Shop », J : machines dédiées pour les systèmes du type « Job Shop »). $\alpha_2 \in \{\Phi, k\}$ est le nombre de machines (dans le cas où $\alpha_2 = \Phi$, le nombre de machines est supposé variable).

Le deuxième paramètre β caractérise les restrictions éventuelles. Il est composé de cinq sous-paramètres $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ et β_5 principalement.

$\beta_1 \in \{\emptyset, \text{prmp}\}$ précise que la préemption des tâches est autorisée ou non. β_2 identifie les ressources additionnelles du système. Les contraintes de précédence sont notées dans β_3 . $\beta_4 \in \{\emptyset, r_i\}$ représente les dates de disponibilité des tâches. β_5 définit les particularités des durées opératoires s'il y en a.

Le troisième paramètre γ est l'indicateur de performance (critère d'optimisation ou la fonction objectif).

La notion hybride n'a pas été prise en compte dans cette classification. Sriskandarajah & Sethi (1989) ont proposé une version étendue du travail de Graham et Lawler. Les auteurs ont modifié les définitions des paramètres α ($\alpha = Fm$: pour Flow Shop à m machines) et β

($\beta = \{1, 2, 3, \dots, m\}$), le nombre de machines dans chaque atelier. La modification ainsi faite ne prend pas en considération les contraintes supplémentaires [Hen99].

2.5.8 – Les approches de résolution

Nous traitons dans cette section des approches pour les ordonnancements statiques et déterministes. Ces approches utilisent des algorithmes pour définir le meilleur ordonnancement sans tenir compte des perturbations qui peuvent intervenir. Par contre, les approches d'ordonnancement temps réel régénèrent de nouveaux ordonnancements pour faire face aux aléas (arrivée aléatoire des tâches, pannes de machines,...) [Our01].

Les problèmes d'ordonnancement font partie intégrante de la famille des problèmes d'optimisation combinatoire [Per03]. L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation [Pap82] et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire [Rib94]. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre. En effet, la plupart de ces problèmes appartiennent à la classe des problèmes NP-Difficiles et ne possèdent donc pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données [Gar79]. Etant donnée l'importance de ces problèmes, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle (RO) et en intelligence artificielles (IA). Ces méthodes peuvent être classées sommairement en deux grandes catégories : les méthodes exactes (complètes⁷) qui garantissent la complétude de la résolution et les méthodes approchées (incomplètes) qui perdent la complétude de la résolution pour gagner en efficacité [Gaz03].

2.5.8.1 – Ordonnancement statique

Un problème d'ordonnancement prévisionnel est un problème qui consiste à optimiser une fonction objectif sur un ensemble de configurations, le problème ainsi défini est un problème d'optimisation combinatoire. Pour résoudre de tels problèmes, un algorithme simple consiste à essayer toutes les configurations possibles pour choisir celle qui optimise la fonction objectif. Néanmoins, cet algorithme ne peut être utilisé dans la majorité des cas du

⁷ Une méthode est complète si quel que soit le problème abordé, on peut prouver en un temps raisonnable que le problème admet ou non des solutions.

fait que le nombre de configuration devient très important avec l'augmentation de la taille du problème. Par conséquent, le temps de calcul devient aussi très important (par exemple, pour le cas d'un problème d'ordonnement à $n = 5$ tâches et $m = 5$ machines, le nombre de configurations est $(n!)^m = 2.5 \cdot 10^{10}$ [Our01]).

Les problèmes d'optimisation combinatoire qui ne peuvent être résolus par des algorithmes polynomiaux sont dits NP-Difficiles. La mise en œuvre des méthodes heuristiques (algorithmes approchés) permet d'obtenir une solution satisfaisante dans un temps de calcul raisonnable. Cette section est réservée pour la présentation de ces méthodes.

2.5.8.1.1 – Les méthodes exactes

Le principe essentiel d'une méthode exacte consiste généralement à énumérer, souvent de manière implicite, l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Pour améliorer l'énumération des solutions, une telle méthode dispose de techniques pour détecter le plus tôt possible les échecs (calculs de bornes) et d'heuristiques spécifiques pour orienter les différents choix. Parmi les méthodes exactes, nous trouvons entre autres : des procédures par séparation et évaluation et la résolution de modèles mathématiques en nombres entiers. Le temps de calcul de ces méthodes est exponentiel ce qui explique qu'elles ne sont utilisables que sur des problèmes de petites tailles.

2.5.8.1.1.1 – Les méthodes de potentiels

Ces méthodes sont utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnement de n tâches liées par des contraintes de succession et de localisation temporelle, avec comme objectif la minimisation du délai des tâches (la date de fin de toutes les tâches ; la plus grande date de fin C_{max} (makespan) [Sac02]). Ces méthodes supposent que la capacité des ressources est illimitée. Elles sont fondées sur les graphes valués et sont connues sous les appellations : méthodes de potentiels-tâches de Bernard Roy et la méthode potentiel/étape (CPM/ PERT).

Les algorithmes de résolution correspondants sont des algorithmes polynomiaux issus de la programmation dynamique. Ces méthodes sont adaptées surtout pour la gestion de projet et sont très peu extensibles aux problèmes manufacturiers.

2.5.8.1.1.2 – Les procédures par séparation et évaluation (Branch & Bound)

Les Procédures d'optimisation par Séparation et Evaluation (PSE ou B&B) sont des procédures d'exploration par énumération implicite de l'ensemble des solutions. Ce sont des

méthodes exactes particulièrement bien adaptées pour résoudre un problème d'ordonnancement.

La méthode de séparation et évaluation est basée sur une énumération implicite et intelligente de l'ensemble des solutions réalisables. Pour cela, la séparation consiste à décomposer le problème initial en plusieurs sous problèmes qui sont à leurs tours décomposables. Ce processus peut se visualiser sous forme d'un arbre d'énumération. Pour chaque sous-problème (noeud de l'arbre), la procédure d'évaluation calcule (dans le cas d'un problème de minimisation) une borne inférieure de la solution obtenue à partir de ce sous problème [Hao99] et [Lop01]. Les Procédures par Séparation et Evaluation « PSE » reposent sur quatre composantes essentielles [Lop01] :

- § La technique de séparation ;
- § La méthode d'évaluation ;
- § La méthode de sondage ;
- § La méthode de sélection ou stratégie d'exploration.

Deux grandes stratégies existent. Dans une stratégie meilleure d'abord, on sélectionne puis on sépare le sous problème « pendant » ayant la meilleure évaluation ; la méthode arborescente ainsi développée est appelée PSEP (Procédure par Séparation et Evaluation Progressive). Dans une stratégie de type profondeur d'abord puis retour arrière, les sommets pendants sont gérés selon une pile : à chaque étape on dépile un problème pendant, on l'évalue, on le sonde et on empile les sous problèmes issus de sa séparation ; la procédure résultante est une PSES (Procédure par Séparation et Evaluation Séquentielle).

Pour des problèmes de taille importante, il faut craindre d'avoir à manipuler des arborescences conséquentes. Pour limiter la taille de l'arborescence, on peut chercher à raffiner les calculs des bornes inférieures. On peut aussi appliquer des résultats de dominance [Car88]. En plus du calcul d'une borne inférieure, on peut enfin calculer, pour chaque sommet, une borne supérieure du critère, à l'aide d'une heuristique. Le but est d'interrompre l'exploration d'un sommet lorsque sa borne est plus grande que la meilleure borne supérieure déjà trouvée jusque là.

2.5.8.1.1.3 – La programmation dynamique

Introduite par Bellman dans les années 50 [Bel57], la programmation dynamique décompose un problème de dimension n en n problèmes de dimension 1. Le système est alors constitué de n étapes que l'on résout séquentiellement, le passage d'une étape à une autre se faisant à partir des lois d'évolution du système et d'une décision [Che77]. Le principe

d'optimalité de Bellman est basé sur l'existence d'une équation récursive permettant de décrire la valeur optimale du critère à une étape en fonction de sa valeur à l'étape précédente. Ainsi, pour appliquer la programmation dynamique à un problème combinatoire, le calcul du critère pour un sous-ensemble de taille k nécessite la connaissance de ce critère pour chaque sous-ensemble de taille $k-1$ et porte le nombre de sous-ensembles considérés à 2^n (où n est le nombre d'éléments considérés dans le problème). La programmation dynamique est ainsi de complexité exponentielle. Pourtant pour les problèmes NP-Difficiles au sens faible, pour lesquels il existe des algorithmes de résolution pseudo-polynomiaux, il est souvent possible de construire un algorithme de programmation dynamique pseudo-polynomial, pouvant alors être utilisé pour des problèmes de tailles raisonnables.

2.5.8.1.1.4 – La programmation linéaire

Un programme linéaire modélise un problème d'optimisation dans lequel un critère et des contraintes sont des fonctions linéaires des variables. Pour traiter un programme linéaire en variables continues, les deux types d'algorithmes les plus importants sont la méthode du simplexe et la méthode des points intérieurs. En pratique, la méthode du simplexe est performante, bien que de complexité théorique exponentielle. Le meilleur exemple d'une méthode de points intérieurs est l'algorithme de Karmarkar qui résout les programmes linéaires en temps polynomial [Lop01].

2.5.8.1.2 – Les méthodes heuristiques ou méthodes approchées

Les méthodes approchées constituent une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale. En effet, ces méthodes sont utilisées depuis longtemps par de nombreux praticiens [Hao99].

Une méthode approchée est une méthode qui ne garantit pas l'obtention d'une solution optimale mais qui s'exécute, en général, plus rapidement qu'une méthode exacte.

Parmi ces méthodes, nous distinguons les heuristiques dédiées à un type de problèmes et les métaheuristiques.

Une heuristique est une méthode, conçue pour un problème d'optimisation donné, qui produit une solution non nécessairement optimale lorsque nous lui fournissons une instance de ce problème. Par contre, une métaheuristique est définie de manière similaire, mais à un niveau d'abstraction plus élevé. Le terme « métaheuristique » a été initialement utilisé par F.Glover pour distinguer la méthode Tabou des heuristiques spécifiques [Glo86], [Glo89] et [Glo90].

Les performances d'une méthode approchée sont liées à la qualité de la solution produite ainsi qu'au temps de calcul nécessaire pour l'obtenir. Ces deux critères étant de nature opposée, il s'agit de trouver un compromis, au cas par cas, sur la base des spécificités du problème d'optimisation considéré.

Les cinq classes principales d'heuristiques sont, les approches constructives, les approches de recherche locale, les approches par décomposition, celles dites par relaxation et changement de modèle, et celles considérées comme évolutives. Ces méthodes étant suffisamment générales pour être appliquées à plusieurs catégories de problèmes d'optimisation combinatoire.

2.5.8.1.2.1 – Génération d'ordonnancement par règles de priorité (Les algorithmes de liste ou aussi règles d'ordonnancement)

Cette approche consiste à générer des ordonnancements particuliers en utilisant des règles de priorité aidant aux choix des opérations candidates à l'ordonnancement. Ce fonctionnement est celui utilisé dans les programmes de simulation d'ateliers où les décisions d'ordonnancement ne sont pas prises d'avances mais dès qu'une machine se libère, c'est l'objet de notre travail. Une opération ij est ordonnançable si l'opération la précédant immédiatement dans sa gamme est achevée sauf dans le cas des systèmes du type Open Shop, le cas considéré dans le cadre de ce mémoire.

La liste des critères utilisés pour le choix des tâches à planifier en priorité est très longue. Dans le cadre de notre étude, nous allons ainsi nous attacher à présenter une liste qui regroupe un ensemble utilisé dans les problèmes de minimisation du temps total de séjours [Chu96] :

§ **SPT (Shortest Processing Time)** : elle cherche à planifier le plutôt possible les tâches dont la durée est la plus petite. Nous pouvons imaginer facilement qu'une tâche à durée courte permettant de libérer les ressources plus rapidement et ainsi d'autoriser leur utilisation par un autre ensemble de tâches plus rapidement.

§ **LPT (Longest Processing Time)**: pour des instances de problèmes particuliers, il est possible qu'il soit plus intéressant de retarder les tâches les plus courtes. En effet, ces dernières ont plus de chance de disposer de marges plus importantes vis-à-vis des tâches de longue durée.

§ **LST (Latest Start Time)**: ce critère est similaire au critère EDD. La seule différence est qu'il s'appuie sur les dates de début au lieu des dates de fin.

§ **MTS (Most Total Successors)**: l'idée est que si nous planifions une tâche possédant plusieurs successeurs alors nous retardons moins le projet étant donné que nous nous offrons la possibilité de planifier le plus tôt possible le plus de tâches possibles.

§ **MWKR (Most Work Remining first)** : qui donne la priorité à l'opération appartenant au travail pour le quel le reste à faire est le plus grand.

§ **LWKR (Least Work Remining first)** : qui donne la priorité à l'opération appartenant au travail pour le quel le reste à faire est le plus petit.

§ **MOPNR (Most OPERatioNs Remining first)** : lié à l'opération dont le travail possède le plus grand nombre d'opération restant à exécuter.

§ **PRTF (Priority Rule for Total Flow time)** : lorsque deux tâches i et j sont à ordonnancer sur une machine disponible à partir de l'instant Δ , exécuter i avant j minimise le temps de séjour de i et de j si et seulement si $PRTF(i, \Delta) \leq PRTF(j, \Delta)$.

La fonction $PRTF(i, \Delta)$ une sorte de mesure de la priorité de la tâche i à l'instant Δ tel que : $PRTF(i, \Delta) = 2 \max(r_i, \Delta) + P_i$.

En cas d'ex aequo, la tâche dont la date d'arrivée est la plus petite est choisie.

D'autres règles sont utilisées afin d'optimiser d'autres critères, parmi lesquelles nous citons :

§ **EDD (Earliest Due Date)**: ce critère cherche à démarrer les tâches dont la fin au plus tard (ou date échue) est la plus proche afin de maximiser nos chances de ne pas augmenter la durée de l'ordonnancement.

§ **GRD (Greatest Resource Demand)**: il est en fait une combinaison des critères GRU et LPT dans le sens où nous lancerons les tâches que nous qualifierons de « goulet » vis-à-vis à la fois de leurs utilisations en ressources et de leurs durées.

§ **GRU (Greatest Resource Utilization)** : nous sélectionnant l'ensemble des tâches qui utilisent le maximum de ressources.

2.5.8.1.2.2 – Les approches constructives

Les méthodes constructives produisent des solutions admissibles de la forme $s = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ en partant d'une solution initiale vide $s[0]$ et en insérant, à chaque étape k ($k = 1, 2, \dots, n$), une composante $x_{o(k)}$ ($o(k) \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{o(1), o(2), \dots, o(k-1)\}$) dans la solution partielle courante $s[k-1]$. La décision qui est prise en étape donnée porte l'indice de la composante à insérer puis sur la valeur à donner à cette dernière. Cette décision n'est jamais remise en question par la suite. La représentation vectorielle $s = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ convient très

bien pour les solutions d'un problème d'affectation général. Les positions du vecteur correspondent aux objets alors que chaque composante x_i définit la ressource qui est affectée à l'objet « i » [Lop01].

2.5.8.1.2.3 – Les approches de recherche locale

Ces méthodes également appelées méthodes de recherche de voisinage, sont des algorithmes itératifs explorant l'espace X en se déplaçant pas à pas d'une solution à une autre.

Une méthode de ce type commence à partir d'une solution $s_0 \in X$ choisie arbitrairement ou alors obtenue par le biais d'une méthode constructive.

Le passage d'une solution admissible à une autre se fait sur la base d'un ensemble de modifications élémentaires Δ qu'il s'agit de définir suivant les cas. Une solution « s' » obtenue à partir de « s » en effectuant une modification (ou aussi mouvement) $\delta \in \Delta$ est notée ($s' = s \oplus \delta$).

Le voisinage $N(s)$ d'une solution $s \in X$ est défini comme l'ensemble des solutions admissibles atteignables depuis s en effectuant des modifications élémentaires δ . Plus formellement, nous pouvons écrire : $N(s) = \{s' \in X / \exists \delta \in \Delta : s' = s \oplus \delta\}$.

Un tel processus d'exploration est interrompu lorsqu'un ou plusieurs critères d'arrêt sont satisfaits.

Parmi ces approches, nous citons La méthode de descente ([Lop01] et [Gaz03]), le recuit simulé ([Met53], [Kir83], [Hao99] et [Chu96]) et la recherche tabou ([Glo86], [Glo89], [Glo90] et [Han86]).

2.5.8.1.2.4 – Les approches par décomposition

D'une manière générale, il existe plusieurs stratégies de décomposition des problèmes d'ordonnancement. Ces décompositions peuvent être les suivantes [Hen99] :

- F Décomposition hiérarchique,
- F Décomposition structurelle,
- F Décomposition spatiale,
- F Décomposition temporelle,
- F Décomposition de l'ensemble des solutions.

Dans [Por96], Portmann présentait des méthodes de décomposition spatiale, temporelle et spatiale & temporelle à la fois pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. Plusieurs expérimentations ont été effectuées. Aucune méthode de décomposition présentée ne domine

nettement les autres. Des différences de temps de calcul sont à noter. Les résultats ont montré l'intérêt de ces approches et leur efficacité par rapport au critère étudié : la somme des retards [Sac02].

2.5.8.1.2.5 – Les approches par relaxation et changement de modèle

Les approches par relaxation et changement de modèle sont des méthodes où nous modifions le modèle que nous avons à résoudre. Le relâchement de contraintes est la stratégie la plus utilisée dans ces approches. Ce fait conduit à des solutions qui sont souvent non réalisables.

Les méthodes de relaxation sont plus utilisées pour déterminer une bonne borne inférieure (pour augmenter l'efficacité des méthodes de séparation et d'évaluation progressive) que pour calculer une solution du problème d'ordonnancement. La relaxation lagrangienne est la plus connue des méthodes de relaxation [Sac02].

Dans la relaxation lagrangienne, la contrainte est souvent traduite dans la fonction objectif par un coefficient de pénalité. Le principe de la relaxation est très simple : il consiste à considérer le problème sans certaines de ses contraintes de façon à l'alléger pour le résoudre plus facilement. Parfois, le changement de modèle peut guider vers d'autres formes d'approches de résolution des problèmes d'ordonnancement. En effet, le rapprochement des problèmes d'ordonnancement à d'autres problèmes de la combinatoire peut s'avérer fructueux.

2.5.8.1.2.6 – Les approches évolutives

Ce sont des méthodes qui utilisent des représentations de connaissances et des résolutions liées à l'intelligence artificielle. Parmi les approches liées à l'intelligence artificielle, on peut citer les systèmes experts, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques et la propagation par contraintes, les systèmes intelligents à base de connaissances, les colonies de fourmis (Ants systems).

Les algorithmes évolutionnistes constituent une famille de méthodes d'optimisation inspirées des mécanismes naturels d'évaluation (c'est-à-dire les individus les mieux adaptés au milieu ont la plus grande probabilité de survie). Ils utilisent un ensemble d'individus, appelé population. Chaque individu représente un point dans l'espace de recherche des solutions potentielles au problème donné [Bac96]. Quand on optimise un système de production, une solution peut être par exemple, représentée via une liste de paramètres (taille des stocks, nombre de kamkans, etc.). Dans [Bac96], Bäck considère que dans plusieurs algorithmes, la

stratégie est également basée sur un processus aléatoire de sélection et de variation et/ou reproduction. Ce mécanisme de sélection favorise les individus de plus grande force (appelés parents) à être désigné pour les opérateurs de variation (mutation et/ou combinaison) plus souvent que ceux de moindre force. La procédure de combinaison (qui peut être considéré comme la coopération), permet le mélange des informations des parents qui sera récupéré par les descendants [Bac93]. La mutation (qui peut être considéré comme l'autoadaptation), modifie certaines caractéristiques de l'individu et assure ainsi une certaine diversité au sein de la population. Soit $P(t)$ une population d'individus à la génération t et $P'(t)$ la descendante de cette population. Dans [Bac97], Bäck & al. résumant les étapes principales d'un algorithme évolutionniste comme suit :

Etape 1 : Mettre le compteur de générations à zéro ($t=0$) ;
Etape 2 : générer la population initiale $P(t)$;
Etape 3 : Evaluer la force de tous les individus de la population initiale ;
Etape 4 : Sélectionner une sous-population qui sera sujette à variations (sélection) ;
Etape 5 : Appliquer les opérateurs de variation aux parents (recombinaison et/ou mutation) ;
Etape 6 : Evaluer la force des individus qui ont été modifiés (évaluation) ;
Etape 7 : Sélectionner les survivants en fonction de leur force (Survie) ;
Etape 8 : Incrémenter le compteur de générations ($t = t+1$) ;
Etape 9 : Tester le critère de fin (nombre de générations, force maximale atteinte, etc.) et terminer le programme ou aller à l'étape 4.

Figure 2.7 : Algorithme évolutionnistes selon [BAC 97]

2.5.8.2 – Contexte dynamique

En pratique le caractère dynamique de l'atelier entraîne l'arrivée continue de nouveaux travaux. La durée d'exécution des opérations peut varier en fonction de circonstances différentes. De même, les machines ne sont pas constamment disponibles, pour des raisons de maintenance, ou de panne et réparation. Chacune de ces informations, décrites par une distribution de probabilités, peut être modélisée comme un processus stochastique régi par une loi aléatoire. Face à ces événements inattendus ou incomplètement spécifiés, deux types d'approche sont utilisés : les méthodes analytiques et la simulation [Esq99]. Ces deux méthodes ont été largement présentées au §1.2.5 du chapitre 1 (L'évaluation des performances des systèmes de production).

2.6 – Les organisations d'ateliers

Dans les problèmes d'ordonnancement d'atelier, les ressources sont des machines ne pouvant réaliser qu'une tâche (ou opération). D'autre part chaque travail concerne une entité physique indivisible appelé produit, ou lot lorsque plusieurs produits identiques sont groupés.

Une entité ne peut pas se retrouver simultanément en deux lieux distincts, un même travail ne peut être exécuté qu'à raison d'une opération à la fois, sur une seule des machines.

On distingue les problèmes à machine unique et les problèmes multimachines. Dans le premier cas, les travaux se réduisent à une seule opération, il faut alors trouver une séquence des travaux sur la machine. Dans l'autre, on distingue tout d'abord les problèmes à machines parallèles, qui conserve l'hypothèse des travaux à opération unique et pour lesquels la solution est un ensemble de séquences, une par machine. Ensuite nous avons les problèmes d'ateliers multimachines où les travaux comportent plusieurs opérations, chacune nécessitant une machine particulière disponible en exemplaire unique. Ce cas regroupe lui même trois types de problèmes, si l'ordre des opérations composant un travail est fixé et commun à tout les travaux, c'est un atelier à cheminement unique ou Flow Shop. Si l'ordre est fixé mais propre à chaque travail, c'est un atelier à cheminement multiple ou Job Shop. Si l'ordre est indéterminé, alors l'atelier est à cheminement libre ou Open Shop.

On peut regrouper les organisations en trois grandes classes comme suit :

- F Les organisations à ressource unique.
- F Les organisations à ressources multiples.
- F Les organisations multi-lignes parallèles.

2.6.1 – Relations entre organisations

La figure 2.8 illustre schématiquement les différences et les ressemblances qui existent entre les différentes organisations de production. Un arc reliant une organisation O_1 à une autre organisation O_2 peut être interprété comme suit : O_2 est un cas particulier de la première organisation O_1 . Ces relations entre organisations illustrent bien les similitudes des systèmes de production. Dans certain cas, ce schéma peu être lu en terme de domaine de solutions réalisables, par exemple, l'ensemble des solutions réalisables des problèmes machine simple appartient aussi à l'ensemble des solutions réalisables du problème du flow shop simple. D'une façon plus générale, la figure ci-dessous illustre les liens entre les différents systèmes de production.

Nous pouvons lire sur la figure que le job shop simple est un cas particulier du job shop hybride (c'est le cas où tous les ateliers du job shop hybride ne disposent que d'une seule machine). On peut lire, aussi, que l'organisation parallèle est un cas particulier du flow shop hybride, c'est le cas où l'organisation du type flow shop hybride ne dis pose que d'un seul atelier et ce dernier dispose d'au plus une machine,..., etc.

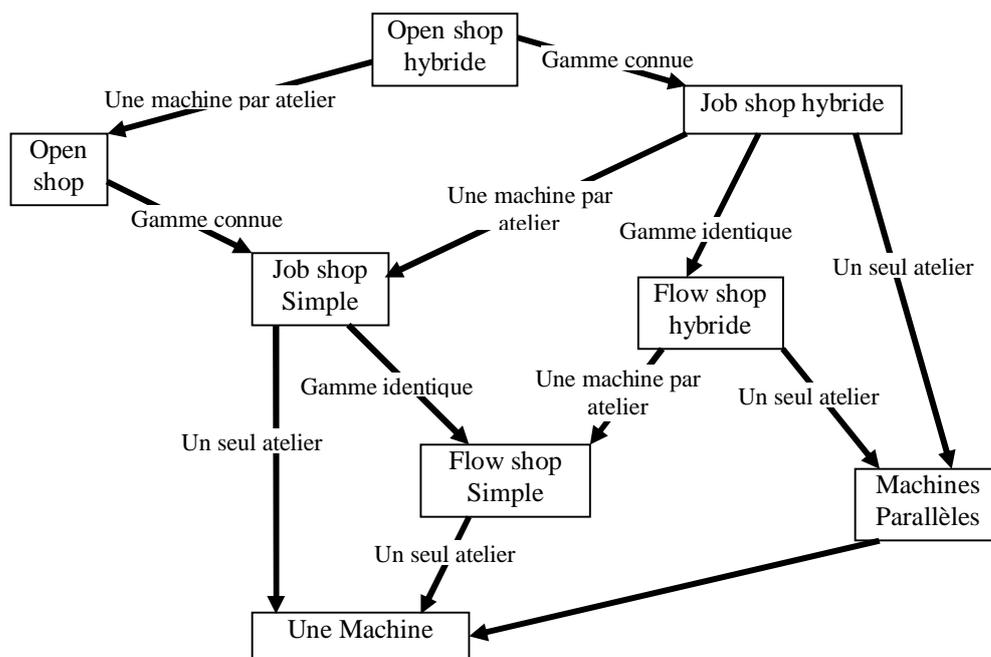


Figure 2.8 : Schéma montrant les liens entre diverses organisation

2.7 – Les ateliers Open Shop

Le problème d'Open Shop appartient à la classe des problèmes dits d'atelier comme le Flow Shop et le Job Shop. Sa principale particularité est qu'il ne contient aucune contrainte de précédence. On le retrouve fréquemment dans les problèmes d'ordonnancement industriels. Ce problème est NP-Difficile dans le cas général.

Les applications d'Open Shop sont nombreuses. Historiquement, la structure des ateliers (lignes d'assemblage) a imposé des contraintes de précédence dues au flux des produits entre les machines, ce qui a favorisé les recherches sur le Flow-Shop et le Job-Shop. En fait, avec le développement des cellules flexibles de nombreuses contraintes de précédence disparaissent d'une part parce que le produit n'est plus déplacé d'un poste à l'autre suivant le positionnement des postes de travail, et d'autre part parce que des opérations deviennent exécutables sans ordre précis, voire en parallèle. Ainsi, les problèmes d'Open Shop existent bien, et ils ont même tendance à être de plus en plus répandus.

2.7.1 – Définition

Dans le problème d'Open Shop général on considère un ensemble M de m machines $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ et un ensemble N de n jobs ou travaux $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ à exécuter sur ces machines. Chaque job J_j est composé de m tâches ou opérations $O_{1j}, O_{2j}, \dots, O_{mj}$. Chaque tâche O_{ij} à une durée opératoire p_{ij} et doit être exécutée sur la machine M_i . Une instance du

problème est donc définie par deux entiers m et n , et par une matrice $P(m \times n)$ des temps opératoires. Les contraintes du problème sont les suivantes :

- une machine ne peut exécuter qu'une seule tâche à la fois.
- plusieurs tâches d'un même job ne peuvent être exécutées en même temps.
- Contrairement aux Job-Shops ou aux Flow-Shops, le séquençement des jobs n'est pas imposé.

2.7.2 – Méthodes de résolution existantes

La plupart des articles dans la littérature ont traité la minimisation de makespan. Gonzalez et Sahni [Gon79] ont présenté un algorithme en $O(n)$ pour le problème Open Shop à deux machines dénoté $O2||C_{max}$. Le problème de préemption peut être résolu en temps polynômial pour un nombre arbitraire des machines [Gon76]. Cependant, les légères généralisations du problème non préemptif de deux machines mènent déjà aux problèmes NP-difficiles.

Dans [Ram92], Ramudin et al. généralisent la procedure Shifting bottleneck aux problèmes Open-Shop, une heuristique initialement conçue pour le Job-Shop proposée dans [Ada88]. Cette heuristique consiste, à chaque itération, à choisir un job ou une machine et à fixer son séquençement. Le séquençement de chaque nouvelle machine ou chaque nouveau job est déterminé en résolvant un problème à une machine grâce à l'algorithme de Carlier [Car82].

E. Taillard dans [Tai93] a utilisé une recherche tabou pour résoudre des problèmes carrés de taille 4 à 20 générés aléatoirement. Il propose dans cet article un ensemble de problèmes réputés difficiles pour lesquels la recherche tabou fournit une solution très éloignée de la borne inférieure classique LB.

Dans [Bra93], Brasäel et al. proposent deux heuristiques originales pour le problème général $O||C_{max}$. La première est basée sur la construction de couplages dans un graphe biparti. La seconde est une heuristique construisant un ordonnancement en utilisant des techniques d'insertions combinées avec une recherche arborescente tronquée.

Dans [Pin95], Pinedo a prouvé que la règle simple LAPT donne un résultat optimal pour le problème Open Shop à deux machines. Selon la règle LAPT (longest alternate processing time first), quand une machine est inoccupée, choisir parmi ses opérations disponibles, celle dont le travail correspondant à la plus longue durée opératoire restante sur l'autre machine

Alcaide et al. proposent également une recherche tabou dans [Alc96]. Les auteurs construisent une solution initiale par une heuristique de liste générant un ordonnancement

actif. Ils appliquent ensuite une procédure d'amélioration sur cette première solution, avant d'exécuter une recherche taboue basée sur la modification de l'ordre d'exécution de tâches sur le chemin critique.

Dans [Gue97], Gueret propose deux nouvelles familles d'heuristiques H1 et H2. La famille H1 repose sur l'utilisation de listes à doubles priorités. On y considère des priorités statiques ou bien dynamiques, ainsi qu'une exécution unique ou bien une série d'exécutions avec perturbations de la liste. La famille H2, plus complexe, repose sur une décomposition en une suite de couplages du graphe biparti associé au problème.

Strusevich [Str99] propose un algorithme heuristique pour le problème d'ordonnancement Open Shop à deux-machine avec des temps de transport minimisant le makespan $O2|\tau_j|C_{\max}$. Cet algorithme emprunte les idées à l'algorithme de Gonzalez [Gon79] pour l'Open Shop à deux machines sans les temps de transport.

Liaw [Lia00] a présenté un algorithme génétique hybride pour résoudre le problème d'Open Shop avec minimisation approximative du makespan. L'algorithme hybride a incorporé un procédé local d'amélioration basé sur la recherche tabou dans un algorithme génétique de base. Ceci a permis à l'algorithme d'exécuter la recherche génétique sur le sous-espace des optimums locaux. L'algorithme a été examiné aussi bien sur des générations aléatoires que sur des problèmes de repère (benchmark) de la littérature avec 20 travaux et 20 machines, et souvent atteint une valeur de fonction objective près de l'optimum.

Actuellement, le meilleur algorithme exact est celui donné par Dorndorf et Al. [Dor01]. Au lieu d'analyser et d'améliorer les stratégies de recherche pour trouver des solutions, les auteurs se concentrent sur des méthodes de propagation de contrainte pour réduire l'espace de recherche. Plusieurs exemples de problème de benchmark sont résolus à l'optimalité pour la première fois.

Gupta et Al [Gup03] ont dérivé et comparé plusieurs algorithmes heuristiques pour les problèmes de deux-machines à critères hiérarchiques, où le premier objectif est la minimisation du makespan et le second critère est soit de minimiser le temps total d'accomplissement, le temps total d'accomplissement pondéré ou le temps total de retard pondéré. Les algorithmes constructifs et itératifs développés ont été évalués sur des exemples de problèmes avec 80 travaux. D'ailleurs, deux cas spéciaux polynomialement solubles sont donnés.

Dans [Chi03], Ching-Fang présente des algorithmes heuristiques et exacts pour le problème $O2|nwt|C_{\max}$. L'algorithme exact proposé, basé sur un arrangement branch-and-bound, résout le problème avec les 100 travaux dans une durée de temps raisonnable, alors

que l'heuristique proposée trouve rapidement des solutions de qualité extrêmement élevée pour des problèmes de grande taille.

2.7.3 – Quelques méthodes de résolution existantes

2.7.3.1 – Heuristiques de liste classiques

Voici un aperçu des heuristiques de liste classiques utilisées pour résoudre les problèmes d'Open Shop. Ces heuristiques classent les h tâches de durée non nulle selon un ordre de priorité. Les tâches sont ordonnancées à partir de l'instant de départ t_0 en affectant à l'instant t , parmi les tâches disponibles, celle de plus grande priorité. Les tâches disponibles à un instant donné sont toutes les tâches O_{ij} non encore ordonnancées et telles qu'aucune tâche du job J_j et aucune tâche de la machine M_i ne soit en cours d'exécution à cet instant.

Il s'agit d'algorithmes construisant des ordonnancements sans retard⁸ (non-delay schedules). Ces algorithmes peuvent ne pas trouver l'optimum, quelle que soit la liste de priorités. On peut les adapter pour construire des ordonnancements actifs, qui incluent l'optimum, mais les performances moyennes sont alors bien moins bonnes.

L'algorithme 1 (figure 2.9) présente la structure générale de telles heuristiques : I est l'ensemble des tâches à ordonnancer, U l'ensemble des tâches ordonnancées et $D(t)$ l'ensemble des tâches de $I - U$ disponible à l'instant t .

```

U := ∅
Tant que U ≠ I
    Déterminer le premier instant  $t_{\min}$  où  $D(t_{\min})$  n'est pas vide
    Choisir la tâche  $O_{ij}$  de  $D(t_{\min})$  de plus grande priorité
     $t_{ij} := t_{\min}$ 
     $U = U \cup \{O_{ij}\}$ 
Fin Tant que

```

Figure 2.9 : Algorithme 1 (Structure générale d'un algorithme de liste (cas sans retard) [Gue97])

Les heuristiques de liste les plus connues sont la LPT (Longest Processing Time) et la SPT (Shortest Processing Time). Il s'agit d'idées simples et naturelles d'algorithmes, déjà utilisées pour les autres problèmes d'atelier, au point que personne ne peut en revendiquer la paternité dans le cas de l'Open-Shop. Ces heuristiques ont été évaluées sur divers types d'instances générées aléatoirement par Gueret [Gue97].

⁸ Un ordonnancement est sans retard si aucune machine ne reste libre alors qu'elle pourrait exécuter une tâche.

2.7.3.1.1 – LPT (Longest Processing Time)

L'heuristique LPT donne la priorité aux tâches de plus longues durées. L'algorithme associé est présenté dans la figure 2.10. Dans cet algorithme, deux tableaux sont utilisés EOM (comme End Of Machine) et EOJ (comme End Of Job) dans lesquels nous stockons respectivement les dates de disponibilité des machines et des jobs [Gue97].

```

U := ∅
EOM := 0
EOJ := 0
Tant que U ≠ I
  (* Déterminer le premier instant tmin où D(tmin) n'est pas vide *)
  Pour chaque tâche Oij libre faire
    t := max(EOM [i]; EOJ [j])
    Si t < tmin alors
      tmin := t
      D(tmin) := {Oij}
    FinSi
    Sinon si t = tmin alors D(tmin) := D(tmin) ∪ {Oij}
  FinPour
  Choisir la tâche Oij de D(tmin) de plus grande priorité
  tij := tmin
  EOM [i] := tmin + pij
  EOJ [j] := tmin + pij
  U = U ∪ {Oij}
Fin Tant que

```

Figure 2.10 : Algorithme 2 (Algorithme de liste LPT) [Gue79]

2.7.3.1.2 – SPT (Shortest Processing Time)

Dans l'heuristique SPT, à chaque itération, la tâche sélectionnée est la tâche libre de durée minimale. Cette heuristique a la même complexité que LPT.

2.7.3.2 – LAPT (Longest Alternate Processing Time first)

Dans la règle LAPT, lorsqu'une machine est libérée, on sélectionne parmi les travaux en attente celui dont la durée opératoire sur l'autre machine est la plus grande. A l'instant zéro, quand les deux machines sont libres, il arrive qu'un même travail se qualifie comme premier à traiter sur les deux machines. Dans ce cas, sur laquelle des deux machines le travail est traité en premier est peu important. Suivant cette règle, quand une machine est libérée, les travaux qui ont été déjà traités sur l'autre machine auront la plus petite priorité, voir zéro priorité sur la machine déjà libérée. Cependant, il n'y a aucune distinction entre deux travaux qui ont été déjà traités sur l'autre machine [Pin95].

La règle LAPT donne un ordonnancement optimal dans le cas du problème $O2||C_{\max}$ avec un makespan :

$$C_{\max} = \max \left(\max_{j \in \{1, \dots, n\}} (P_{1j} + P_{2j}), \sum_{j=1}^n P_{1j}, \sum_{j=1}^n P_{2j} \right)$$

2.7.4 – Résultats de complexité

Dans cette section nous aborderons la complexité des problèmes Open Shop. C'est à ce niveau que nous décidons de l'approche que nous adoptons pour la suite de notre travail.

De nombreux travaux ont été effectués sur la complexité des problèmes d'Open Shop. Très peu de problèmes Open Shop peuvent être résolus en temps polynomial. Les cas les plus connus sont $O2//C_{\max}$ et $O/pmtn/C_{\max}$ [Gon76]. Dans la quasi-totalité des cas polynomiaux, les algorithmes sont conçus pour construire des ordonnancements de durée LB (borne inférieure classique des problèmes d'atelier égale au maximum des charges des machines et des durées des jobs).

La NP-Difficulté au sens fort de $O||C_{\max}$ a été démontrée dans [Gra79]. Dans le cas des problèmes d'Open-Shop non préemptifs, le cas polynomial le plus connu est $O2||C_{\max}$, problème pour lequel Gonzalez et Sahni proposent dans [Gon76] un algorithme en $O(n)$. Les autres cas polynomiaux sont principalement des problèmes avec des tâches unitaires.

Peu de problèmes non-préemptifs avec un nombre de machines supérieur à 2 sont polynomiaux. Dans [Gon76], Gonzalez et Sahni démontrent que le problème $O3||C_{\max}$ est NP-difficile au sens faible dans le cas général. Cependant, certains cas particuliers de ce problème sont polynomiaux.

La NP-Difficulté au sens fort a été établie pour les problèmes $O2/r_j/C_{\max}$ Par E.L. Lawler et al. [Law81], dans lesquels les dates de début au plus tôt r_j des jobs ne sont pas identiques.

Le problème $O/r_j; d_j/C_{\max}$ est NP-Difficile dans le cas général, même si les tâches sont de durée 0 ou 1. Mais il devient polynomial si toutes les tâches sont de durée 1, ou si au plus $m+n$ tâches sont de durée 1 et les autres nulles [Kub95].

Graham et al. [Gra79] ont démontré que $O/tree/C_{\max}$ est NP-Difficile au sens fort pour $m \geq 2$. Mais le cas où les tâches sont unitaires, $O/p_{ij}=1; tree/C_{\max}$ devient polynomial [Gon82].

Les cas $O/p_{ij}=1; r_j/L_{\max}$ [Law81] et $O/p_{ij}=1; tree/ \Sigma C_j$ [Bra91] sont également polynomiaux. Par contre Brucker et al. [Bru93] ont montré que $O2/p_{ij} = 1; prec/\Sigma U_j$ est

NP-difficile. Cependant, le cas $O|p_{ij}=1; r_j|L_{max}$ où l'on cherche à minimiser le retard maximal avec des tâches unitaires peut être résolu polynomialement [Lab84] et [Bru93].

Les problèmes préemptifs sont en général plus faciles à résoudre que les non-préemptifs car on peut faire appel aux mathématiques du continu, comme par exemple la programmation linéaire utilisée par Cho et Sahni [Cho81] pour résoudre le problème $O/pmtn/L_{max}$.

Dans [Law81], Lawler et al. proposent un algorithme en $O(n)$ pour résoudre $O2/pmtn; r_i/C_{max}$.

L'algorithme de Gonzalez et Sahni pour $O2||C_{max}$ peut aussi, comme nous l'avons dit plus haut, être appliqué au cas préemptif $O2|pmtn|C_{max}$. Le problème plus général $O|pmtn|C_{max}$ est également polynomial. Dans [Gon76], Gonzalez et Sahni proposent pour ce problème un algorithme basé sur la construction de couplages de cardinal maximal dans un graphe biparti. Cet algorithme est en $O(h^2)$, où h est le nombre de tâches du problème de durée non nulles, Gonzalez propose une complexité en $O(h \cdot (\min(h, m^2) + m \log n))$ dans [Gon76], puis en $O(h + \min(m^4; n^4; h^2))$ dans [Gon79]. Enfin, dans [Sah95], Vairactarakis et Sahni présentent un algorithme de même complexité que celui proposé dans [Gon76] mais un peu plus rapide en pratique.

Pour tous les critères usuels, les problèmes Open-Shop sans attente ont été prouvés NP-Difficiles au sens fort par Sahni et Cho [Sah79] même pour les problèmes ne comportant que deux machines. Ces problèmes restent NP-Difficiles au sens fort lorsque toutes les tâches non nulles sont de durées égales [Gon82].

Les problèmes de cette catégorie répertoriés polynomiaux sont tous des cas particuliers avec tâches unitaires :

- $O|p_{ij} = 1, tree, no-wait| C_{max}$ [Set76].
- $O|p_{ij} = 1, pec, r_i, no-wait| L_{max}$ [Gar77].
- $O|p_{ij} = 1, r_i, no-wait| L_{max}$ [Sim 89].
- $O|p_{ij} = 1, no-wait|\sum w_i U_i$ [Kub91].
- $O|p_{ij} = 1, no-wait|\sum w_i T_i$ [Bru93].

Il est évident que les problèmes d'Open Shop avec ressources supplémentaires (c'est à dire autres que les machines) ne sont pas plus faciles que les mêmes problèmes sans ressources. Ainsi, tous les résultats de NP-Difficulté vus précédemment restent valables pour les problèmes avec ressources. Pire, l'introduction de ressources complique le cas préemptif.

De Werra et al. [Wer91] ont démontré que le problème $O/pmtn/Cmax$ avec une ressource renouvelable est NP-Difficile dans le cas général. Cependant le cas où toutes les tâches sont unitaires est polynomial.

Le problème préemptif $O/pmtn/Cmax$ avec une ressource consommable est également NP-Difficile. Dans [Wer92], de Werra et al. proposent cependant quelques cas particuliers qui peuvent être résolus en temps polynomial.

Le problème $O2|\tau_j|Cmax$ est NP-difficile dans au sens fort [De195]. Le problème $O2|\tau_j|Cmax$ avec des temps égaux de transport est connu pour être NP-difficile binaire tel prouvé dans [Ray92].

En résumé, le problème d'Open Shop non-préemptif est NP-Difficile dans le cas général. Le problème préemptif est polynomial, mais il devient NP-Difficile lorsque l'on ajoute une ressource.

2.8 – Conclusion

Dans ce chapitre nous avons complété toutes notions nécessaires à notre étude. Nous nous sommes intéressé beaucoup plus à la partie pilotage des systèmes flexibles de production afin d'introduire la sous fonction ordonnancement. Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'une des configurations d'atelier les plus adaptées aux Systèmes Flexibles de production, les ateliers Open Shop.

Comme nous l'avons déjà souligné, dans l'étude des problèmes Open Shop (§2.6.4), le problème est déjà NP-difficile dans le cas général et l'ajout de ressources en plus des ressources de transformation (les machines) rend le problème plus difficile. Même si la préemption est autorisée, ce problème est déjà NP-difficile. Or, dans notre cas, la préemption est non autorisée (ressources disjonctives), la typologie est circulaire (ce qui rend le problème plus combinatoire par rapport aux lignes d'assemblage conventionnelle) et les temps de transport sont considérés (considération des ressources de transport) ce qui fait de notre problème un problème NP-difficile au sens fort. Le problème considéré est $O|\tau_j|F$.

Vu la complexité de ce type de problème, nous avons opté pour une approche empirique de prise en charge du problème par utilisation de la simulation informatique. Ce choix est dû à sa puissance comme outils d'analyse des systèmes complexes et la résolution des problèmes d'optimisation des flux physiques ou des flux d'informations dans les systèmes de production manufacturiers. Ainsi les deux prochains chapitres sont consacrés à l'étude et la modélisation du problème énoncée dans l'introduction générale c'est-à-dire à la partie pratique de ce

mémoire. Dans le troisième chapitre, les premières sections du prochain chapitre sont consacrées à la simulation des systèmes de production. Par la suite, dans le but de modéliser l'atelier d'assemblage, nous mettrons en pratique les cinq premières étapes du processus de simulation.

Chapitre 3 :

Modélisation du système d'assemblage

3.1 – Introduction

Le processus manufacturier d'un système de production est composé d'activités de natures différentes. Ainsi, il y a les activités de nature physique telles que le stockage, le transfert, la transformation, le contrôle... qui peuvent être regroupées dans un *processus de fabrication*. Par ailleurs, il y a les activités de nature logique (décisionnelle) telles que l'ordonnancement, l'arbitrage en cas de conflits, la réaction à une perturbation, la programmation d'une action préventive ou corrective... qui peuvent être groupées dans un *processus de pilotage*.

L'intégration et l'automatisation de plus en plus poussées des systèmes de production ont rendu leur phase de conception critique. Par ailleurs, les volumes des investissements font que les marges d'erreur sont très faibles dans la mise en place de ces systèmes. Dans ce contexte, la simulation informatique révèle toute son utilité pour évaluer les performances prévisionnelles de ces systèmes. Elle est considérée comme l'un des plus puissants outils d'analyse des systèmes complexes. Aujourd'hui, elle est devenue indispensable pour aider à prendre en charge les problèmes d'optimisation des flux physiques ou des flux d'informations dans les systèmes de production manufacturiers.

La simulation est une technique de plus en plus utilisée dans le milieu industriel, c'est l'un des outils qui peut aider à répondre à des questions décisives du type : la gestion appliquée sur cette ligne de production est-elle bien adaptée ? Les paramètres de gestion choisis sont-ils les meilleurs ? Le pilotage appliqué est-il bien adapté ? Comment convaincre le responsable du budget qu'il devient indispensable d'investir dans telle ou telle ressource ?

En phase d'exploitation, la simulation permet l'évaluation et la comparaison de différentes stratégies de pilotage afin d'en déterminer la plus performante. En effet, ceci peut se faire suite à un diagnostic par des tests de diverses solutions, divers paramétrages en vue de déduire la meilleure solution à appliquer.

Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu la simulation comme support principal de mise en œuvre de l'approche empirique adoptée pour la résolution du problème posé. A cet effet, nous tenterons de répondre à certaines questions en vue de vérifier la possibilité d'améliorer les performances du système étudié moyennant un ordonnancement plus judicieux au niveau des stations de la cellule d'assemblage (cf. problématique).

Pour ce faire, nous commencerons par la construction du modèle représentatif de la cellule et de son fonctionnement ; ce chapitre lui est essentiellement consacré.

Dans le souci de garder un enchaînement logique à ce chapitre, et avant d'aborder le cœur du sujet (élaboration du modèle de simulation), nous nous intéresserons d'abord à la simulation des systèmes de production afin d'y introduire tous les concepts nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Nous y abordons, dans la première section, la définition et le concept de la simulation, son application au domaine de la production, ses objectifs, apports et limites, modélisation et les étapes d'un processus de simulation (telles que présentées par Pritsker [Pri86]). La seconde section est consacrée à la modélisation des systèmes de production par l'approche privilégiée par le logiciel retenu pour cette étude (ARENA 7.1), c'est l'approche par processus (Process Interactions). La troisième section est consacrée à la présentation du logiciel utilisé ARENA 7.1.

La quatrième section est un rappel du problème étudié. La dernière section de ce chapitre est consacrée à la description de la mise en œuvre des cinq premières étapes du processus de simulation. La première sous-section est consacrée à la position des hypothèses de simulation. Dans la deuxième sous-section, nous aborderons la construction du modèle. La troisième sous-section est consacrée à la phase de transcription informatique du modèle (statique et dynamique). La dernière sous-section est consacrée à la vérification du modèle.

Sachant que les étapes du processus de simulation ne sont pas rigoureusement séquentielles, l'étape d'identification et de collecte des données s'est faite au fur et à mesure que nous détaillions l'analyse de la cellule d'assemblage et de son fonctionnement.

3.2 – Simulation des systèmes de production

3.2.1 – Définitions et concepts de la simulation

Au « *sens large* », la simulation peut être définie comme étant « *une science de reproduction du comportement d'un système complexe difficilement contrôlable et soumis à des phénomènes aléatoires ; le comportement du système réel avec toutes ses composantes (physique, informationnelle, décisionnelle) est ainsi remplacé par un modèle virtuel ayant un comportement analogue traduit ensuite en un programme informatique permettant de réaliser des expériences afin d'appréhender le comportement du système réel, d'évaluer ses performances et d'aider à l'anticipation d'éventuelles dérives* » [Hab01].

La simulation des systèmes de production peuvent être définies comme étant « *un processus de conception de modèle de système réel puis de conduite d'expériences avec ce modèle pour appréhender le comportement du système réel et/ou évaluer différentes*

stratégies de production de ce système ». La simulation est principalement une technique de modélisation et d'aide à la prise de décision [Hab01].

La simulation est une technique temporelle alors que les techniques non temporelles comportent une série de techniques faisant partie de la recherche opérationnelle (la programmation linéaire, la théorie des files d'attente, la théorie des graphes...etc.). La technique utilisée détermine le degré de simplification, fixe les hypothèses nécessaires pour la construction du modèle, et impose le fait que si le caractère aléatoire des systèmes réels doit être exclu du modèle (par exemple la programmation linéaire). L'une des caractéristiques les plus puissantes de la simulation est sa capacité à modéliser le caractère stochastique d'un système réel. Mais, aussi l'un des dangers les plus importants est l'utilisation d'une hypothèse fautive en simulant un système à caractère aléatoire à l'aide d'un modèle ayant des données déterministes.

Le concept de simulation utilisé comme un outil légitime pour la conception et l'analyse des systèmes manufacturiers qu'ils soient nouveaux ou existants a fait l'objet de plusieurs travaux [Pau91], [Cha95], [Tre97], [Hab00]... En 1991 Law et Kelton [Law91] ont résumé le paradigme de la croissance de l'utilisation de la simulation par quatre raisons :

- F La compétition dans l'industrie qui a poussé les industriels à améliorer la productivité et la qualité et à réduire les coûts.
- F La réduction des coûts dans le secteur de l'informatique.
- F L'amélioration des outils de simulation.
- F La disponibilité de l'animation graphique facilitant la compréhension de la simulation.

La simulation permet d'évaluer les performances d'un système de configuration donnée aussi bien au niveau de la structure physique (conception de nouveaux systèmes), qu'au niveau du système de décision (exploitation, réorganisation).

La simulation permet de répondre à la question : « *Qu'obtiendra-t-on si l'on fait ceci ?* » mais ne permet pas de répondre à la question : « *Que faut-il faire pour obtenir cela ?* ».

Pour aboutir à une solution intéressante, il est nécessaire de tester un nombre suffisant de scénarios afin de les comparer et de retenir le plus intéressant. Ainsi, la simulation est une démarche par induction (étude de cas particuliers afin d'aboutir à une conclusion, la plus générale possible) et non par déduction (solution obtenue par un raisonnement, un algorithme).

La figure 3.1 décrit le processus maintenant classique de conception de systèmes automatisés de production en utilisant la simulation [Cas04].

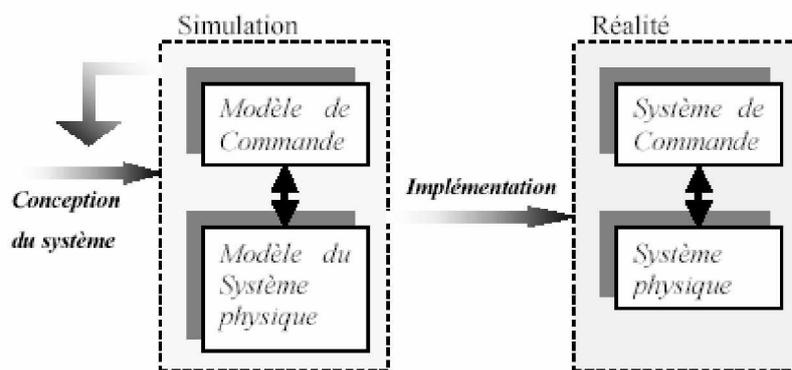


Figure 3.1 : Le processus classique de conception de système automatisé de production en utilisant la simulation

Un modèle de simulation permet de prévoir les performances du futur système de production en fonction des choix qui sont faits tant en ce qui concerne le dimensionnement du système physique que de la conception du système de commande. Ce modèle de simulation entre dans une boucle d'optimisation permettant par améliorations successives, d'affiner la conception du système. Le modèle de simulation est structuré en deux parties :

- F **Le modèle du système physique** : traduit le comportement de la partie opérative du futur système de production.
- F **Le modèle de commande** : traduit le comportement de la partie commande du futur système de production.

3.2.2 – La modélisation des systèmes de production pour la simulation

La performance globale d'un système de production est le résultat d'une interaction complexe de nombreux facteurs aussi variés que : la vitesse d'un engin de manutention, le temps de changement d'outil sur une machine, les principes d'ordonnancement utilisés ou encore la dextérité d'un opérateur. Cette superposition de facteurs nécessite de représenter le système industriel comme un modèle où toutes ces composantes interagissent, qu'elles soient physiques ou d'informationnelles.

On utilise un modèle quand on veut comprendre un système réel que l'on ne peut pas observer ou expérimenter directement, parce que le système n'existe pas encore ou parce que cela est trop difficile à manipuler. Ensuite, par simulation, il est possible de mesurer l'impact relatif de chacune de ces composantes sur la performance globale du système de production. Ainsi, la modélisation et la simulation de la partie opérative du système permettent de fournir les informations nécessaires au système de conduite [Dra98].

Qui dit évaluation dit modèle. Dans un processus de simulation, la modélisation est l'étape la plus importante dont dépend en grande partie, la réussite de ce processus. Les

activités de modélisation consistent à construire un modèle à partir d'un système réel et définir la validité de ce modèle par rapport à ce système [Zei76]. La simulation quant à elle, va utiliser ce modèle pour analyser le comportement du système réel, dans un environnement donné [Bel85]. En effet, ce comportement varie selon le contexte d'exploitation (défini par l'environnement) de ce système, ce changement se traduirait par des valeurs de paramètres différentes.

Un modèle est une structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes et de systèmes qui possèdent entre eux certaines relations [Del93]. On dit que b est un modèle de B pour un observateur O , si b peut renseigner O sur le fonctionnement de B [Min75].

Le modèle est défini comme une représentation formelle d'un système réel, tel qu'elle permette une description structurelle du système réel, d'une part, et comme un substitut de système réel afin d'en analyser le comportement dans des conditions variées, d'autre part. Cette définition du modèle est proche de celle de J. Lasriere cité dans [Pes91], où il est dit que la représentation repose sur une double métaphore, « celle de la représentation théâtrale et celle de la représentation diplomatique » :

- § La première exposant devant le spectateur, sous forme concrète, une situation signifiante ;
- § La seconde exprimant cette sorte de transfert d'attribution en vertu duquel une personne peut agir en lieu et à la place d'une autre.

Les moyens de production devenant de plus en plus complexe, la réalisation des modèles le devient encore davantage.

Un modèle peut concerner un système existant ou à concevoir. On parle de modélisation a posteriori dans le premier cas, et de modélisation a priori dans le second. La modélisation a posteriori intervient principalement dans le cas d'une nouvelle configuration d'un système donné. Ce type de modèle peut être utilisé dans la phase d'exploitation pour tester des politiques d'ordonnement par exemple. La modélisation a priori est nécessaire tout au long de la phase conception (dimensionnement, agencement et évaluation).

Avant de commencer la simulation d'un système nous devons fixer les critères pour pouvoir obtenir de bons résultats. Quelques critères d'un bon modèle de simulation sont :

- § connaissance du but de la simulation ;
- § compréhension parfaite du système ;
- § modèle évolutif (démarrer simple ==> complexe) ;

- § modèle complet sur les caractéristiques principales (décrit les phénomènes principaux avec exactitude) ;
- § modèle flexible, facile à modifier et à mettre à jour ;
- § modèle robuste, qui reste valide face à un grand nombre de situations ;
- § modèle facile à mettre au point ;
- § modèle qui donne des résultats de façon claire.

La partie pilotage d'un système de production doit disposer d'un modèle de la partie opérative du système, afin de réaliser son objectif.

3.2.3 – Avantages et limites de la simulation

3.2.3.1 – Avantages de la simulation

L'utilisation de la simulation pour la conception et l'analyse des systèmes industriels est toujours privilégiée. Les principaux apports de la simulation dans le domaine des systèmes de production peuvent être résumés par les points suivants [Hab01]:

- § *La mise en œuvre accélérée.* En effet, le changement de gestion d'une ligne de fabrication, une nouvelle implantation d'atelier,... suppose souvent une phase expérimentale dans laquelle il faut tester les nouvelles données, et où l'on avance souvent par tâtonnement, afin d'optimiser au plus vite les flux. Cette phase peut être réduite en étant préalablement simulée.
- § *Evaluation de la performance par avance* ou il est possible de mesurer puis d'évaluer à priori, des performances par l'intermédiaire de divers indicateurs de performance (quel en-cours, quel risque de rupture, quel niveau de stock, ... ?).
- § *Conception, modification et dimensionnement par anticipation* : chacun des choix (gestion, paramétrage, ...) pouvant être réalisé au cours de la conception, suite à une réorganisation, un re-dimensionnement, une modification, et ayant un impact sur l'exploitation, mérite d'être évalué au préalable grâce à la simulation.
- § *Comparaison d'alternatives de gestion ou évaluation de l'influence de certains paramètres de gestion* : avant même d'avoir fait le choix d'un type de gestion et de l'avoir appliqué, il est intéressant de tester plusieurs alternatives possibles.
- § *Support de formation* : un modèle de simulation peut sensibiliser l'utilisateur à une nouvelle logique de fonctionnement de l'atelier et peut l'aider à mieux le maîtriser.

- § *Outil de médiation* : l'utilisation d'un simulateur peut servir de négociation, de base de discussion entre intervenants, en illustrant les conséquences des hypothèses en discussion.
- § *Rôle de microscope et/ou de microscope* : la simulation permet une vision globale du système étudié, ce qui est particulièrement intéressant quand le système est complexe, et/ou quand la taille réelle est très importante. A l'inverse, la simulation permet de réaliser des zooms importants liés au niveau de détail adapté.
- § *Aide à la formalisation des données pour la production* : la simulation permet de rassembler les données utiles à la production autant pour un système existant que pour un système en projet. Ces données seront ainsi formalisées en vue de leur exploitation dans un modèle.

3.2.3.2 – Limites de la simulation

L'utilisation de la simulation reste assez restreinte malgré ses potentiels et ses apports mis en évidence. Ainsi, les potentiels de la simulation sont très larges. Toutefois, elle est davantage utilisée, en phase de conception. Elle l'est beaucoup moins lors de la phase de réalisation et d'exploitation du système. Cependant, elle pourrait être tout aussi bien un outil très performant et utile lors de ces phases, si elle était utilisée pertinemment [Kos98]. Ce déficit d'utilisation peut être, en partie, imputé aux limites réelles ou supposées de cet outil. Aussi, le processus de simulation soulève certaines limites dans ses différentes étapes. Ces limites constituent certaines raisons pour lesquelles l'utilisation de la simulation reste un domaine plus ou moins réservé aux experts. Certaines de ces limites sont classées en deux catégories [Bel90], [Fri90], [Len93], [Bak96] et [Ber00] : les limites liées à l'approche de modélisation et celles liées à l'étape de programmation.

3.2.3.2.1 – Limites liées à la modélisation

Les limites de la simulation liées à la phase de modélisation peuvent être décomposées en plusieurs points :

- § **Absence de cohérence entre les deux modèles statique et dynamique** : Elle est souvent due à l'utilisation de formalismes différents. En effet, le modèle statique décrit des caractéristiques structurelles alors que le modèle dynamique décrit le comportement dynamique. Certaines tentatives ont été faites pour coupler des méthodes d'analyse avec des modèles de simulation. Le succès est limité car les concepts utilisés sont différents et adaptés à un type de processus : physique, informationnel ou décisionnel [Pie87], [Cor91] et [Kel92].

- § **Manque de méthodologie pour l'élaboration du modèle :** La plupart des langages de simulation offrent des fonctions ayant une correspondance très limitée avec les éléments du système réel. Pour construire un modèle, la manipulation de ces fonctions nécessite une expérience approfondie de la part de l'utilisateur et renforce l'idée de spécialisation de la simulation.
- § **Manque de propriétés nécessaires à l'approche de modélisation :** Les langages de simulation manquent de certaines propriétés qui sont fondamentales telles que ; l'affinage, la modularité, la réutilisabilité, la flexibilité... En effet, ces propriétés sont nécessaires à l'approche de modélisation qu'elle soit itérative, modulaire ou progressive. La tendance actuelle privilégie l'approche modulaire et hiérarchisée qui fournit un fil conducteur à l'élaboration du modèle sur plusieurs niveaux. Ces niveaux représentent le système en allant du plus abstrait au plus concret.
- § **Manque de concepts universels et potentiels :** La plupart des concepts utilisés par les langages font référence aux files d'attente, à la notion de processus, aux réseaux de Petri... L'utilisation de ces concepts, difficilement assimilables par les utilisateurs potentiels, limite le champ de la simulation et constitue souvent un obstacle à la compréhension du système étudié. La tendance actuelle est plutôt orientée vers des concepts proches de la perception des utilisateurs. L'orientation objet favorise fortement cette approche.
- § **Manque de structures d'affinage et de réutilisation de modèles existants :** L'affinage des modèles est basé en grande partie sur l'expérience des utilisateurs. Les structures hiérarchiques permettant un affinage progressif sont quasi inexistantes. Des modèles nouveaux sont entièrement reconstruits même pour des systèmes très similaires. Ceci pose le problème d'évolutivité qui s'ajoute à celui du manque de généricité (il est impossible de considérer autant de concepts spécifiques que de processus et de stratégies).
- § **Manque de concepts pour la modélisation du processus de pilotage :** La modélisation du processus de pilotage est l'une des tâches les plus difficiles à réaliser. On constate à travers des langages existants que la modélisation du processus de pilotage est quasi inexistante. L'utilisation de certaines fonctions permettant de réorienter le flux physique se fait de manière imbriquée avec les autres fonctions. La gestion des échanges informationnels et décisionnels entre le processus de pilotage et le processus de fabrication n'est pas prise en compte. Ceci rend complexe l'évaluation de l'impact du pilotage sur les performances du système. Les activités de décision sont

donc beaucoup moins bien appréhendées, alors qu'il est toujours nécessaire de les prendre en compte dans un modèle de simulation, soit pour les reproduire afin de refléter au mieux la réalité, soit pour les évaluer. Par ailleurs, si les décisions sont parfois simples, elles peuvent aussi être complexes, car elles résultent de l'analyse de l'état du système et dépendent de raisonnements experts. A l'image d'un système d'indicateurs de résultats ou d'un bilan comptable, la simulation est dans ce cas « passive », elle ne permet que de constater. Davis et Williams [Dav94] soulignent bien cet état en écrivant que la simulation focalise sur la formulation et la solution des problèmes en utilisant des méthodes par tâtonnements.

3.2.3.2.2 – Limites liées à l'outil informatique

L'une des limites liées au support informatique concerne la possibilité d'intervenir durant la simulation sur le modèle de façon intelligente, suite à l'application d'un plan d'action, résultat du processus de pilotage, devrait être possible. Or cette interactivité n'est pas encore complètement intégrée dans les outils actuels. Jusqu'à présent, l'utilisateur renseigne les données et la simulation fournit la réponse du système modélisé. C'est à la fin de l'exécution de la simulation qu'on peut : analyser les résultats, analyser les causes dans le cas de l'obtention de résultats non escomptés, retrouver les variables et leviers d'action, modifier les paramètres correspondants, puis relancer la simulation. Ce processus est à reproduire jusqu'à satisfaction du résultat obtenu. De ce fait, le processus classique de simulation est à reproduire autant de fois qu'il le faut pour obtenir un résultat satisfaisant.

La recherche d'un optimum consiste à tester toutes les combinaisons possibles des variables du système. Mais souvent en production, se posent des problèmes complexes à très forte combinatoire, dits « N-complets ». Des méthodes telles que les plans d'expérience et les tables de Taguchi, les techniques mathématiques (programmation linéaire, optimisation combinatoire,...) permettent de réduire considérablement le nombre d'essais à réaliser pour obtenir cet optimum, encore faut-il qu'il y ait un optimum atteignable (souvent les objectifs sont antagonistes). Nous parlerons ainsi davantage de solutions « satisfaisantes ». Mais le nombre de tests reste malgré tout encore bien élevé.

L'interactivité suppose une assistance pendant la phase de modélisation et particulièrement celle de la programmation qui devrait être simplifiée, voire totalement éliminée. Elle implique également la possibilité d'agir directement sur le modèle pendant l'exécution, c'est-à-dire l'introduction d'un aléa, la modification de l'organisation, le changement de règles ou de paramètres... Mais, elle suppose aussi des possibilités de modification sans compilation

nouvelle du modèle et sans reprise de la simulation aux conditions initiales. L'une des conséquences directes de cette limite est la difficulté d'utilisation de la simulation pendant la phase d'exploitation d'un système, qui limite la prise de décision suite à l'arrivée d'un aléa pour cause de lenteur dans la réaction.

L'interactivité concerne aussi l'introduction de modules d'évaluation, d'aide à la structuration des expériences et l'évaluation des résultats issus du processus de simulation. Un module d'évaluation permettrait d'interpréter les résultats continuellement. Ainsi, parmi les nombreux facteurs, les inducteurs à l'origine d'une performance ou d'une contre performance pourraient être identifiés. D'autres modules permettraient de limiter et structurer les expériences. Ils auraient le rôle d'interface entre les résultats généraux du simulateur et l'utilisateur qui a besoin de résultats spécifiques [Sén95] et [Hab96].

3.2.4 – Les étapes d'un processus de simulation

Le processus de simulation est un processus itératif basé encore sur l'expérience individuelle. C'est hors de la partie proprement informatique qu'une étude de simulation requiert le plus de temps et de savoir-faire.

De manière relativement simplifiée, le processus de simulation peut être présenté selon la figure 3.2. La modélisation fournit un modèle conceptuel (modèle de connaissance), la programmation fournit un modèle exécutable (modèle d'action), la simulation ou l'expérimentation fournit les résultats obtenus du modèle, l'analyse des résultats permet d'évaluer le processus à modéliser [Hab01].

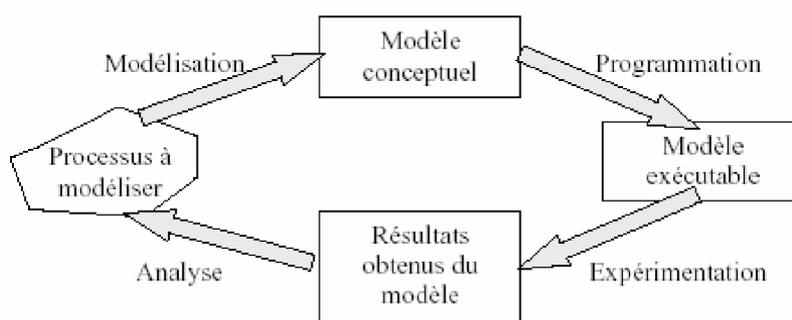


Figure 3.2 : Processus simplifié de simulation

De manière plus détaillée, le processus de simulation peut être éclaté en dix étapes [Pri86] (figure 3.3) :

- § La formulation du problème, où le recours à des méthodes d'analyse est indispensable ;

- § La construction du modèle, la tâche la plus ardue dont le succès dépend de l'analyse et de l'approche de modélisation ;
- § L'identification et la collecte de données, c'est une phase à réaliser avec soin, car des données erronées produisent des résultats erronés ;
- § La transcription informatique du modèle qui constitue l'étape de programmation ;
- § La vérification du modèle qui consiste à vérifier que le programme correspond bien au modèle conçu par le programmeur (on vérifie pour soi) ;
- § La validation du modèle qui consiste à confirmer que le modèle correspond bien à celui spécifié par le cahier des charges (on valide pour les autres) ;
- § La planification stratégique et tactique de la simulation qui permet d'optimiser les expériences à réaliser pour avoir des résultats significatifs du système (recours éventuel aux plans d'expériences) ;
- § L'exécution de la simulation où il s'agit de mettre en œuvre le plan de l'étape précédente ;
- § L'analyse et l'interprétation des résultats, ou il s'agit de valider les résultats obtenus et de les interpréter en vue de les traduire en décisions ;
- § Les modifications et les développements futurs du modèle issus essentiellement de l'étape d'analyse.

Ces étapes constituent un processus itératif qui, très souvent, n'est pas rigoureusement séquentiel [Bak96].

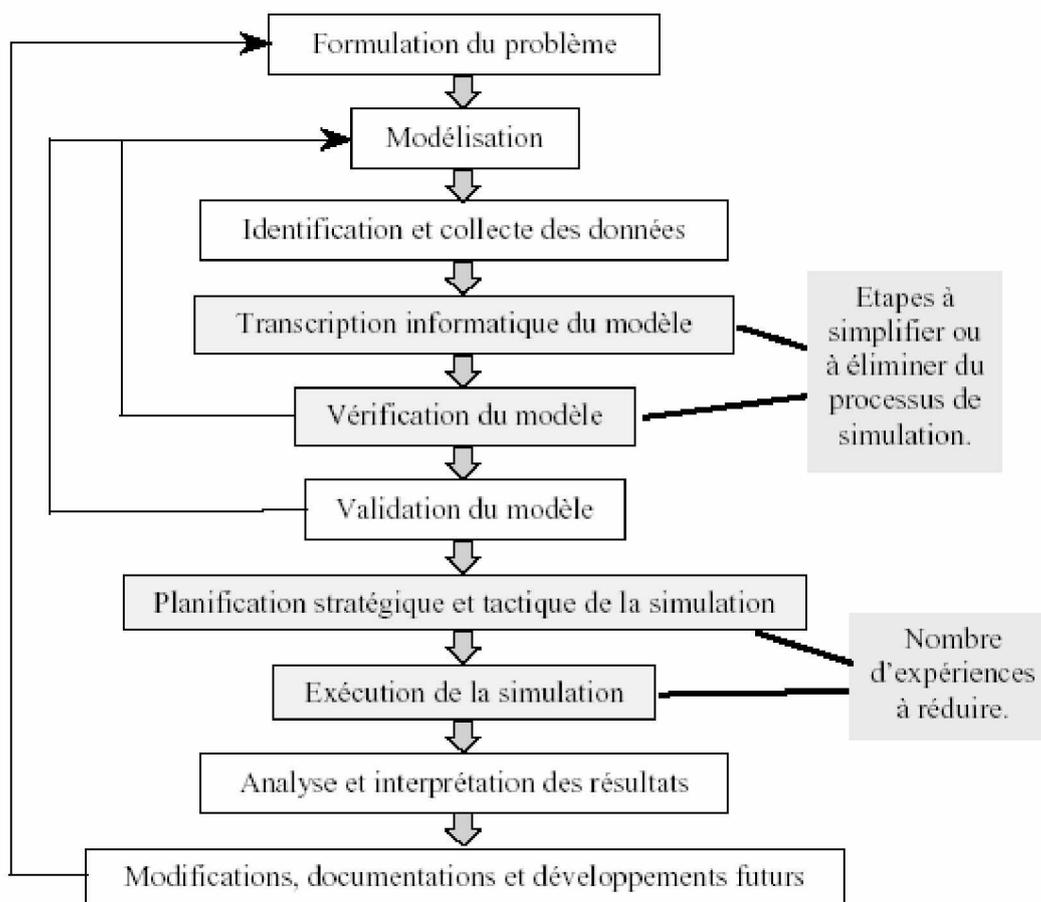


Figure 3.3 : Processus de simulation selon Pritsker [Hab01]

L'analyse du problème, cherche à construire un modèle qui soit le plus simple possible, tout en étant cohérent avec les objectifs de l'étude. C'est une phase difficile, où il faut trouver un compromis entre le prescripteur de l'étude, qui souhaite que l'ensemble des constituants du système soient finement représentés, et le concepteur du modèle qui cherche toujours la simplification afin de garder la maîtrise de ce dernier.

La construction du modèle, comprend la modélisation logico-mathématique qui peut être facilitée par un outil graphique et la programmation proprement dite. Cette phase doit conduire à un modèle facilement modifiable.

Un principe important, lors de la modélisation en vue d'une simulation est le *principe de parcimonie* [Cas04], *Il n'est pas nécessaire de faire appel à un modèle de granularité élevée pour résoudre un problème s'il s'avère qu'un modèle doté d'une granularité inférieure est capable de lui trouver une solution.*

Un premier corollaire de ce principe est le *principe de réductionnisme* [Cas04], *Avant de faire appel à un modèle d'une granularité donnée pour résoudre un problème, il convient de vérifier qu'un modèle de granularité inférieure n'est pas en mesure de lui donner une solution.*

Un deuxième corollaire est le *principe d'incrémentalité* [Cas04], *On ne doit faire appel à un modèle d'une certaine granularité que si les modèles de granularité inférieure sont incapables de donner une solution au problème posé.*

La modélisation systémique doit aider à comprendre les objectifs de la simulation et permettre le dialogue entre le demandeur de l'étude et le spécialiste de la simulation.

Nous avons alors un modèle qui fonctionne. L'étape de validation qui intervient alors doit permettre de s'assurer de la cohérence entre le comportement du modèle de simulation et le système réel qu'il est censé représenter. Si ce système existe déjà, cette phase pourra se faire en comparant une trace du comportement du système réel avec celui du modèle de simulation. Lorsque, et c'est souvent le cas, le système étudié n'existe pas encore, cette validation est beaucoup plus délicate.

Lors de l'étape planification stratégique et tactique, on définit les conditions d'utilisation du modèle, la stratégie (nombre d'expériences, durée, plans d'expérience, ...) et la tactique (conditions initiales, types de résultats, ...). L'intégration des plans d'expériences au processus de simulation permet l'optimisation de cette étape. La méthode des plans d'expériences [Kle87], [Car94], [Sén95] et [Hab96], planifie de façon efficace et rigoureuse les essais en vue d'un objectif parfaitement défini. Elle réduit le nombre d'essais en permettant une interprétation rapide et sans équivoque des résultats des essais, en fournissant un modèle théorique du système étudié. Si la simulation est associée à cette technique, nous pourrons éviter certaines opérations répétitives et ainsi gagner en efficacité et en rapidité. Les avantages de la simulation sont largement connus, cependant des problèmes apparaissent principalement dans la planification des expériences et l'analyse des résultats. La méthodologie utilisée peut être décrite en trois étapes :

- § configuration des plans d'expériences (choix des conditions initiales, des facteurs et de leurs niveaux, des variables et indicateurs de sortie),
- § modélisation du système, lancement des expériences selon l'étape précédente, et enregistrement des résultats,
- § exploitation et analyse des résultats (calcul des effets et interactions des facteurs, calcul de la réponse théorique, calcul des résidus, analyse de la variance, transformation de la réponse expérimentale, présentations graphiques des résultats).

Conformément au plan d'expérimentation établi, la simulation (jeu de simulation) est exécutée. Après chaque simulation, les résultats sont enregistrés avant leur analyse. L'analyse personnelle des résultats est possible à l'aide des indicateurs de performance sous forme de tableaux, courbes, graphiques, histogrammes, ... Le recours à des outils d'analyse statistiques est parfois nécessaire (analyse de la variance). Cette interprétation permet soit :

- § **dans le cas de résultats non satisfaisants**, d'émettre des recommandations, comme la remise en question des paramètres ou le cas échéant, des objectifs [Hab96]. Dans ce cas, ces recommandations (hypothèses de plan d'action) sont encore à tester et donc à réintroduire dans le modèle de simulation. Il faut ensuite à nouveau effectuer une simulation avec ce nouveau paramétrage, et cela, jusqu'à satisfaction des résultats.
- § **dans le cas de résultats satisfaisants**, de mettre en œuvre les plans d'action sur le système réel (nous passons alors à l'étape suivante).

3.3 – La modélisation par approche processus (Process Interaction)

Quatre approches de modélisation du système de production ont été identifiées¹ :

- F Approche orientée événements (event scheduling) ;
- F Approche orientée activités (activity scanning) ;
- F Approche orientée processus (process interaction) ;
- F Approche orientée objets.

Dans le cadre de cette étude nous avons opté pour l'approche la plus utilisée dans les langages de simulation, à savoir : l'approche processus. C'est celle que nous décrirons dans ce chapitre.

Il s'agit d'une approche qui cadre naturellement avec les systèmes manufacturiers qui comprennent plusieurs parties devant interagir [Gar86], qui peuvent être décomposés en objets passifs et actifs (entités et ressources) [Pec92], ou qui ont souvent des processus identiques [Méb95]. Elle consiste à décrire le fonctionnement d'un système comme une interaction de plusieurs processus, à travers des primitives, des blocs ou des fonctions, conçus au préalable. Chaque type de primitive (bloc ou fonction) décrit un processus élémentaire et générique du système à modéliser. Souvent, on considère dans ce type de logique (modélisation) la notion de file d'attente qui introduit certains problèmes dans la modélisation des systèmes sans stocks.

¹ Ces méthodes sont détaillées dans l'annexe 2.

De nombreux logiciels, et c'est le cas de SIMAN [Peg90], privilégient l'approche processus. Un processus est une séquence de transformations que subit une entité pendant son séjour dans le système. Une entité est un objet dont l'état est modifié par le processus qu'il traverse. Les changements d'état nécessitent souvent l'utilisation de ressources. Un modèle est constitué par un ensemble de processus qui interagissent entre eux.

Dans le cas d'un atelier de fabrication par exemple, les entités sont les pièces à produire. Elles entrent dans le système dans un certain état (pièces brutes) et en sortent dans un autre (produits finis). Entre temps, elles ont été peu à peu transformées par divers processus d'usinage, de contrôle, de montage, d'expédition, de manutention.... Ces divers processus consomment du temps et nécessitent le plus souvent l'utilisation de ressources de stockage (les files d'attente), de fabrication (machines, outillage, personnels), de transport (chariot, convoyeurs, ponts roulants robot, personnels).

La construction du modèle logique orienté processus peut dès lors s'articuler en plusieurs étapes logiquement successives :

F Etape 1 : Identifier les entités

Les entités physiques sont en général facilement repérables, les questions à se poser sont : qu'est-ce qui est transformé par le système ? Quel est le flux qui le traverse ? Pièces dans un atelier, clients dans un magasin, automobiles dans une station service....

F Etape 2 : Identifier les processus

Il n'y a pas de principe absolu puisqu'à l'évidence à chaque système correspondent des processus spécifiques. Cependant, un certain nombre de règles générales peuvent être mises en évidence :

- § Tout modèle comporte au moins un processus d'entrée dans lequel sont créés les entités physiques dans leur état initial.
- § Tout modèle contient au moins un processus de sortie sans le quel les entités, une fois parvenues à leur état final, sont détruites, après d'éventuelles prises de mesures statistiques.
- § Tout modèle comporte, entre une entrée et une sortie, un certain nombre de processus de transformation qui interagissent les uns avec les autres, en particulier à travers l'utilisation des ressources partagées.

F Etape 3 : Identifier les ressources

Ce sont, au sens large, tous les objets dont les entités ont besoin au cours de leur transformation : ressources de stockage dans lesquelles sont mises en attente d'un événement, et les ressources de transformation à proprement parler qui dépendent du processus étudié.

F Etape 4 : Identifier les variables d'état

Elles caractérisent le système dans son évolution au cours du temps et elles ont une double utilité. Tout d'abord, elles interviennent dans la commande du système, par exemple la gamme de fabrication d'une pièce va déterminer les décisions d'envoi de cette pièce sur les machines de l'atelier pour y subir les opérations appropriées. Ce cheminement est en général caractérisé par deux variables par pièce, l'une est statique et désigne la gamme à proprement parler, l'autre est dynamique et indique à chaque instant la position courante de la pièce dans sa gamme.

La deuxième fonction des variables d'état est la production de mesures à partir desquelles seront évaluées les performances du système étudié. Elles concernent en général les durées de séjours des entités, les taux d'utilisation des diverses ressources, le niveau des encours.

Dans de nombreux logiciels de simulation, un certain nombre de variables d'état sont gérées automatiquement, sans que l'utilisateur n'ait besoin de le faire explicitement dans le modèle : c'est le cas en particulier de toutes celles qui concernent les ressources et les files d'attentes. On se préoccupe que de deux types de variables :

§ Les attributs : ce sont des variables spécifiques à une entité donnée et qu'elle comporte en elle pendant sa durée de vie dans le système (type d'entité, gamme opératoire...). Ces variables sont locales.

§ Les variables globales : sont celles qui, au contraire, sont connues de tous les processus.

F Etape 5 : Décrire les processus

A ce stade, il ne reste plus qu'à assembler tous les éléments précédemment définis dans un modèle logique approprié composé de processus parcourus par des entités utilisant les ressources et se synchronisant entre eux. Il importe, dans la représentation choisie, de distinguer clairement :

- § Le sous-système physique constitué des processus d'entrée, de transformation et des entités physiques ;
- § Le sous-système de pilotage constitué des variables d'état et des règles de pilotage des processus parcourus par les entités,

Cette distinction est d'autant plus nécessaire, que l'on est souvent conduit, dans la recherche d'une meilleure solution, à modifier l'un (en particulier la commande), sans toucher à l'autre.

3.4 – Le modèle Arena pour un atelier de production

Pour la modélisation et la simulation de l'atelier flexible circulaire, objet de notre étude, nous avons opté pour le logiciel SIMAN/Arena [Are02], développé par « *Systems Modeling Corporation* ». Il est notamment dédié à la modélisation, simulation et animation de systèmes de production. Le logiciel est basé sur les concepts de simulation orientée processus et de modélisation hiérarchique, utilisant la puissance et la flexibilité de modélisation du système SIMAN/Cinema [Dra98].

Le système ARENA est un support de modélisation intégré permettant de construire des modèles plus ou moins détaillés pour un large éventail d'applications possibles. A l'aide d'Arena on peut développer un projet complet de simulation. Arena est un support intégré pour l'analyse des données d'entrée, la construction du modèle, l'exécution interactive, l'animation, la traçabilité et la vérification de l'exécution et l'analyse des sorties.

Tous les modules d'Arena sont élaborés à partir de composants SIMAN, l'utilisateur peut créer ses propres modules, en utilisant l'édition professionnelle d'Arena, et les regrouper dans des bibliothèques privées. De plus, Arena permet des animations graphiques dans le même espace de travail ce qui est nécessaire dans une analyse ou une conception statistique, afin d'aboutir à une bonne simulation [Kel89].

Les constructions de SIMAN peuvent être utilisées avec des modules plus élaborés issus d'une autre bibliothèque, permettant d'allier la flexibilité de Siman et la performance des autres modules. Lorsque le besoin se présente, l'utilisation d'algorithmes de décision complexes ou l'utilisation de programmes externes peut être réalisée. Une ou plusieurs parties du modèle peuvent être programmées dans un langage procédural tel que Visual Basic, Fortran, ou C/C++ et peuvent prendre place dans la même interface graphique [Sab01].

3.4.1 – Structure du logiciel ARENA 7.1

Pour modéliser un système de production par le logiciel ARENA, nous utilisons les modules fournis par ce dernier, un module d'ARENA matérialise un changement d'état du système, il reçoit en entrée une ou plusieurs entités (pièces, informations,...), en sortie le bloc délivre des entités transformées par sa fonction caractéristique.

Un modèle de simulation programmé par ARENA se compose d'une succession de modules (ou block) liés entre eux par des connexions logiques. Chaque système de fabrication a son modèle de simulation spécifique et par conséquent il a ses propres paramètres et données. Dans un programme de simulation d'un système de production l'entité doit être créée, transformée puis détruite.

Tous les modules se trouvent stockés dans des bibliothèques du logiciel. Chaque bloc est constitué des éléments suivants [Tri99] :

- F Une icône représentative de l'activité représentée.
- F Des connecteurs pour assurer la liaison entre les blocs.
- F Une boîte de dialogue.
- F Un programme.
- F Un fichier d'aide

Pour la facilité d'affichage et d'organisation, les modules d'ARENA sont groupés en fonction de leurs types dans des panneaux. ARENA 7.1 possède treize panneaux, mais les six panneaux suivants suffisent pour la réalisation de n'importe quel modèle² [Are02] :

F **Basic Process** : contient des modules *flowchart* et des *data modules* pour créer, définir, disposer, et manoeuvrer des entités³. Il contient également des modules pour allouer (affecter) des ressources, ordonnancer et d'autres outils semblables. Il fournit des modules de haut niveau.

F **Advanced Process** : contient des modules de manipulation avancée d'entité et de modélisation. Il contient des modules de niveau plus bas (comparés au *Basic Process*) qui peuvent aider à aborder des questions plus avancées telles que connecter (lire et écrire un fichier) un fichier et diffusion des messages (signaux).

F **Advanced Transfer** : contient des modules pour le cheminement, envoie, stockage, transfert, transport, et convoyage des entités.

² Les différents panneaux sont détaillés dans les tableaux A.3.2 de l'annexe 3.

³ Dans Arena, les entités dénotent les objets mobiles dans le système.

F **Report** : produisant des rapports à la fin de chaque simulation. Il peut être donnée soit selon les réplifications ou les catégories (ressources, processus, entités, les files d'attentes...).

F **Blocks** : se sont les blocks de plus bas niveau, les autres modules des autres panneaux sont à base de ces blocks.

F **Elements** : ce sont des data modules associés aux modules du panneau **Blocks**. Toutes les données utilisées dans les Blocks y sont déclarées (attributs, variables, ressources, entités...).

Il y a deux types de modules dans Arena : les *Flowchart* et les *Data modules*. Les modules *Flowchart* sont des modules qui peuvent être traînés et déposés dans la fenêtre de modélisation. Ils forment l'organigramme. D'autre part, les *Data modules* ne peuvent être traînés dans la fenêtre modèle mais nécessitent l'emploi d'une interface tableau pour y introduire des données.

3.4.2 – Modéliser avec Arena 7.1

Comme mentionné ci-dessus, Arena a plusieurs modules⁴ pour la modélisation. La construction de modèle se fait par la spécification des propriétés des modules et en les reliant.

3.4.2.1 – Modélisation statique des systèmes de production

F Modélisation des entités

Les entités circulant dans un système de production sont créées et définies (le type) par le module **Create** et détruites par le module **Dispose**.

Elles sont déclarées dans le module *Data module Entity*. Selon le cas étudié, ces entités peuvent représenter des pièces à produire ou à assembler, des individus dans le système ou bien des documents (rapport, fax, email...).

F Modélisation des ressources

Toutes les transformations subies par les pièces sur des ressources de transformation sont modélisées par le module **Process** ou bien par la combine **Sieze-Delay-Release**. Les ressources de transformation sont déclarées au niveau du *Data module Ressource* ou bien **Ressources Elements**.

Les ressources de mise attente sont modélisés par **Queue** (le block ou le module). La déclaration de ces ressource se fait dans le *Data module Queue* ou **Queues Elements**.

⁴ Les différents modules sont définis dans l'annexe 3.

Les ressources de stockage sont modélisées par le block *Store*. Ces éléments sont déclarées au niveau du Data module *Stores* ou *Stores Elements*.

Les ressources de transport sont présentée par les *Data modules Conveyor* et *Transporter* (dans le cas des chariot, camion, AGV, palettes....).

F Les variables d'état

L'ensemble de variables et attributs nécessaires à la modélisation d'un système de production associé aux entités par le module *Assign*. La déclaration des variables utilisées se fait dans le *Data module Variables*.

3.4.2.2 – Modélisation dynamique des systèmes de production (Animation du modèle)

Les différentes composantes du modèle d'animation d'un système de production se trouvent dans la barre d'outil d'Animation. Les bibliothèques d'images Arena proposent toutes sortes d'images possibles à utiliser dans un modèle et offre même la possibilité d'en créer (Arena's picture editor).

Les pièces utilisées dans le système peuvent être représentées par des images contenues dans les bibliothèques Basic Process, General, Medical, Equipment, Objects, Office, Office Equipment, People, Vehicles. Les différentes transformations subies par les pièces peuvent être modélisées par un changement d'image après chaque transformation.

La représentation graphique des files d'attente et des stocks est automatiquement générée par *Animate/Queue* et *Animate Transfert/Storage*. Pendant la simulation, la visualisation du défilement des pièces dans les files d'attente et stock est possible.

La représentation graphique d'une ressource de transformation est automatiquement générée par *Animate/ressource*. Selon la nature de la transformation, Elle peut être représentée par une image des bibliothèque Machines, Equipment, Factory.

La représentation graphique d'un transporteur est automatiquement générée par *Animate transfert/Transporteur*), *Animate transfert/distance* dans le cas des circuits à cheminement libre et *Animate transfert/Network distance* dans le cas des circuits à cheminement guidé (AGV). Selon la nature du système de transfert, Les moyens de transfert peuvent être représentés par des images contenues dans les bibliothèques Vehicles, Workers, People, Factory, Medical...

Les autres circuits physiques de transfert sont automatiquement générés par *Animate transfert/Route* dans les cas de cheminements simples et *Animate transfert/segment* dans les cas d'utilisation de convoyeurs de configurations particulière.

3.5 – Rappel du problème étudié

Dans le cadre de ce mémoire, nous étudions le comportement d'une cellule flexible d'assemblage dont la typologie est circulaire, et dont le problème d'ordonnement considéré est du type Open shop. Sachant que ces types de problèmes d'ordonnement sont déjà NP-difficile dans le cas général [Gue97], la considération des ressources de transfert et la préemption non autorisée le rend encore plus difficile. De plus, la typologie circulaire de la cellule rend le problème plus combinatoire par rapport aux lignes d'assemblage conventionnelles. Ainsi, ce problème devient NP-difficile au sens fort. Dans le but de prendre en considération tous les paramètres de cette étude sans s'imposer aucune restriction du problème nous avons opté pour une approche empirique de prise en charge de ce problème dont la simulation sera le support principal.

Dans une cellule flexible d'assemblage dont les stations sont conçues autour d'un convoyeur en boucle, nous nous essaierons de réduire les temps de séjour des produits finis en recourant aux gammes non linéaires ne tenant pas compte des contraintes de précédence associées à des règles de priorité.

Le transfert des palettes sur le convoyeur est du type asynchrone. Les pièces nécessaires à l'assemblage d'un produit fini sont contenues sur la palette. En cas de conflit lors de la sortie d'une pièce d'une station donnée, la priorité est donnée à celles circulant sur le convoyeur.

Selon Finke et Dupont [Fin93], l'association d'un ordonnancement selon la règle FIFO aux gammes non linéaires n'apporte presque pas d'amélioration au performance d'un tel système, mais que l'intérêt est dans la manipulation de plan d'assemblage non linéaire d'ou l'acquisition d'une flexibilité dans l'ordre de passage des tâches et le cas extrême est l'*Open shop* où chaque ordre des opérations d'assemblage est possible. Suivant ces constats, notre objectif est d'étudier l'impact sur les performances du système l'application des règles de priorité au niveau des stations de travail du système associées à des plans d'assemblage non linéaire non prédéterminés. De ce fait, le problème d'ordonnement que nous nous proposons d'étudier est du type Open Shop ou à cheminements libre et notre fonction objectif est la minimisation du temps total de séjours.

Dans la résolution de ce type de problème, en plus de la recherche des meilleures séquences des opérations au niveau d'un poste de travail (le robot) il est d'abord nécessaire de déterminer le routage de la pièce à travers le système afin de compléter son assemblage. Ces deux problèmes sont simultanément résolus. Au fur et à mesure, la prochaine destination

de la palette (chargée de tout le nécessaire à l'assemblage complet du produit fini) est déterminée par la plus proche station libre ou disposant de place dans sa file d'attente d'entrée. L'ordonnancement des opérations au niveau des postes est fait par application de règles de priorité.

3.6 – Mise en œuvre du processus de simulation

3.6.1 – Formulation du problème

Sur la base du rappel du problème précédant, nous procédons à la caractérisation de la cellule selon les éléments suivant :

- Le convoyeur en boucle ou les palettes y circulent à la même vitesse et sans arrêt ;
- Les stations annexées au convoyeur tout en assurant l'entrée des palettes (solidaires aux pièces à assembler);
- Les pièces et les palettes présentes sur le convoyeur ;
- Les règles de priorité choisies au niveau des stations.
- Les files d'attente d'entrée et de sortie à capacité limitée dans les stations.
- Les conditions d'entrée dans les stations suivant une logique Open Shop.
- Les conditions de sortie de stations afin de donner la priorité aux palettes circulantes sur le convoyeur ;

Dans le cadre de cette formulation nous avons retenu les hypothèses ci-après :

§ Les stations supports des robots sont:

- indépendantes les unes des autres et disponibles en un seul exemplaire chacune ;
- disponibles pendant toute la période de l'ordonnancement : il n' y a pas d'arrêt ou de panne ;
- mono-opération: elles exécutent une seule opération à un instant donné.

§ Les opérations sont :

- non-préemptives : une opération en cours d'exécution ne peut être interrompue ;
- les temps de préparation des machines sont négligeables ;
- associées à des temps opératoires déterministes.
- telles que les durées de transport entre deux opérations sont considérées et elles représentent l'un des paramètres considérés dans la minimisation de la fonction objectif c'est-à-dire le temps de séjours.

§ Convoyeur en boucle à vitesse régulière.

Le contexte de l'ordonnancement recherché est de type dynamique : l'ensemble des jobs à ordonnancer est connu à l'avance : il n'y a pas d'aléas, ni d'occurrences de nouveaux jobs au cours de cet ordonnancement mais la décision de l'ordonnancement et le routage des opérations d'un travail sont décidés en temps réel. Les paramètres considérés à chaque instant sont :

- Le nombre de tâches sur le convoyeur ainsi que le nombre des palettes correspondant ;
- Les états des postes de travail : occupé ou non ;
- Le nombre d'opérations en attente dans les files d'attente des postes de travail ainsi que les durées opératoires correspondantes ;
- La règle d'ordonnancement appliquée au niveau des postes ;
- Chaque produit possède une gamme opératoire non linéaire conçue de l'ensemble des postes à visiter associés à des durées opératoires.
- Le routage des opérations d'une tâche (produit) donnée, se fait selon la disponibilité de la station (place dans la file d'attente d'entrée ou robot disponible) la plus proche.

3.6.2 – Identification et collecte de données

Les données du problème sont essentiellement issues des hypothèses de la formulation et des configurations arrêtées et testés lors de la planification stratégique et tactique de la simulation (cf chapitre 4).

3.6.3 – La construction du modèle (la modélisation)

3.6.3.1 – Analyse du système d'assemblage (présentation de la cellule de production)

Les stations de travail sont arrangées dans un ordre circulaire autour d'un convoyeur en boucle non bloquant à vitesse régulière. Les pièces à assembler sont toujours montées sur des palettes. Ces palettes sont associées aux pièces à assembler tout au long de leur présence dans le système et elles ne sont déchargées qu'au moment de la sortie des pièces assemblées (produit fini) du système. Ces palettes circulent en permanence sur le convoyeur. Lorsqu'une palette arrive à un point de branchement d'une station, un dispositif de lecture vérifie si la prochaine opération à effectuer est dans la station considérée, si c'est le cas, la palette pénètre dans la file d'attente d'entrée si sa capacité n'est pas saturée. Dans les autres cas, elle continue à circuler. À la fin de l'assemblage d'un produit fini ou semi-fini, la palette correspondante est déchargée au niveau de la sortie du système et tout de suite réintégrée à l'entrée du système

pour une réutilisation. Le cheminement des palettes à travers le système est représenté sous forme d'un organigramme dans la figure 3.4.

Dans cette configuration, la priorité est au convoyeur c'est-à-dire que les palettes ne quittent pas les boucles périphériques si les sorties des stations sur le convoyeur sont occupées. La capacité des files d'attente d'entrée est d'au moins de deux unités. La capacité des files d'attente de sortie est d'au moins d'une unité pour éviter tout blocage [Fin93].

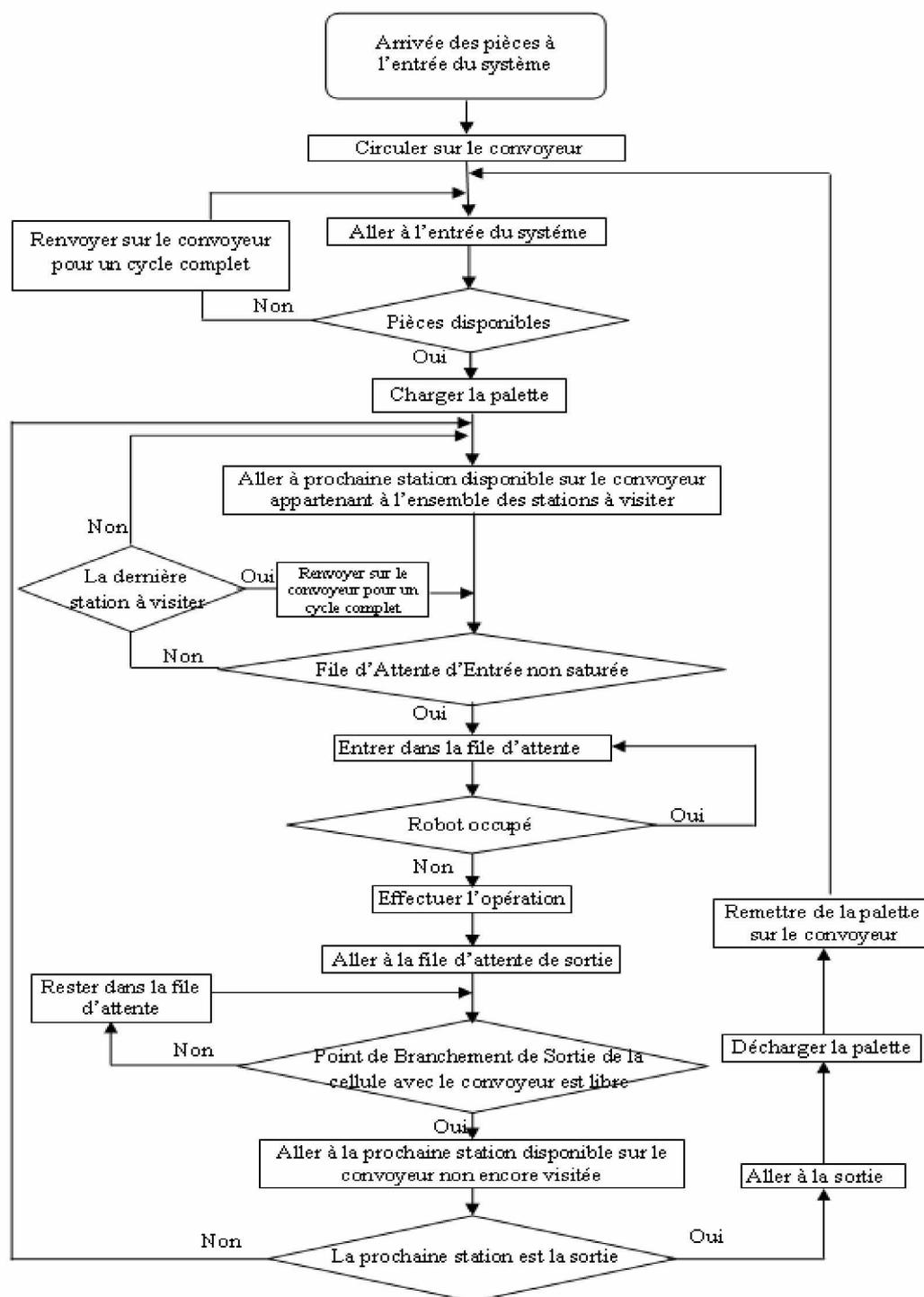


Figure 3.4 : Le cheminement d'une palette à travers la cellule d'assemblage

3.6.3.2 – Modélisation logicomathématique

- § Modélisation des palettes d'un nombre limité circulant en permanence sur le convoyeur.
- § Modélisation des stations avec leurs files d'attente et les points de branchement au convoyeur.
- § Modélisation des entités : les palettes transportant les pièces nécessaires à l'assemblage dans les différentes stations de la cellule.
- § Dimensionnement de l'entrée du système.
- § La gestion des robots c'est-à-dire les règles d'ordonnancement, les temps de chargement et déchargement ne sont pas pris en considération du moment que toutes les pièces nécessaires à l'assemblage des produits finis se trouve sur les palettes.
- § Déclaration des variables et des attributs.
- § L'enregistrement des statistiques.

3.6.3.3 – Modélisation de l'évolution de la cellule

La cellule d'assemblage cyclique étudié est détaillée dans la figure 3.5. Elle est constituée de :

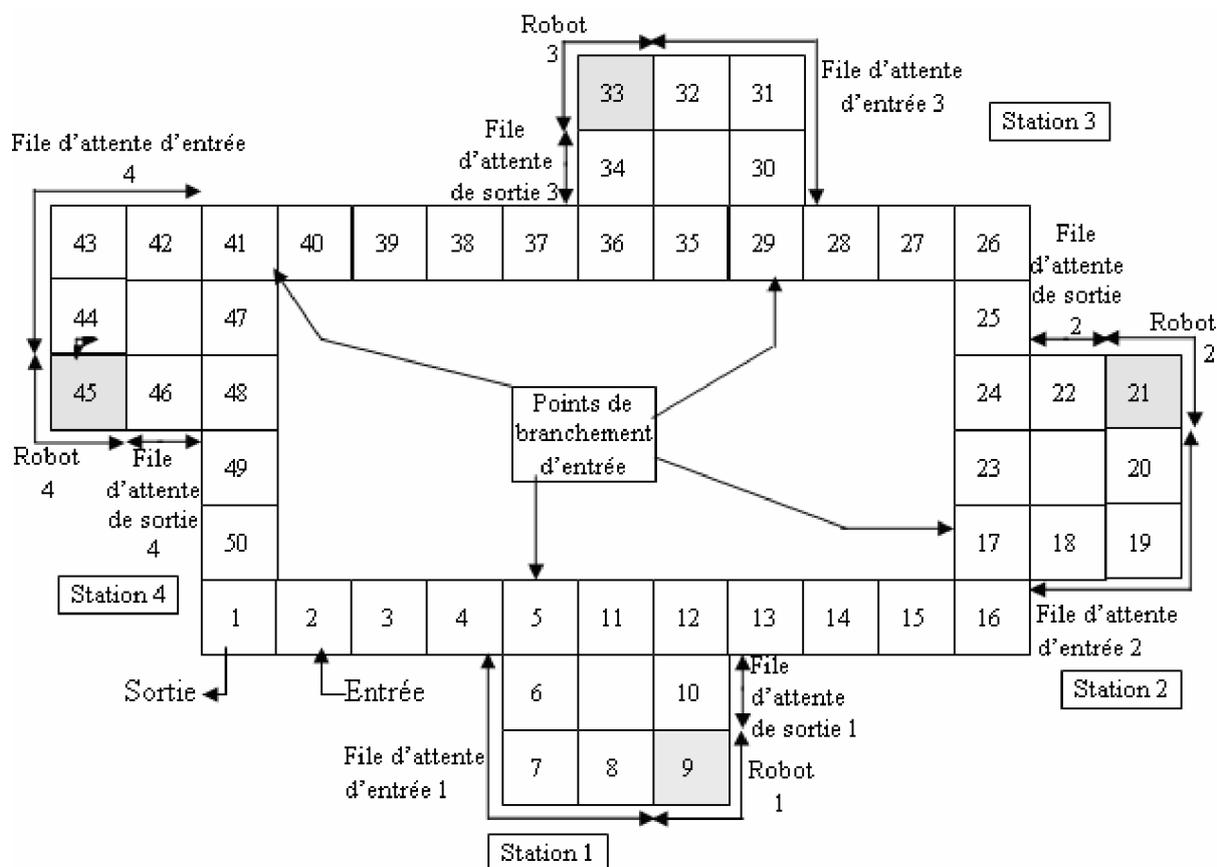


Figure 3.5 : Modélisation du système cyclique d'assemblage

§ Un convoyeur en boucle dont la dimension est choisie de façon à ce qu'elle soit un multiple de la dimension des palettes. Ainsi, soit l la longueur de la palette tel que $l = 1$, et L longueur du convoyeur de tel que $L = 30$.

§ Un nombre fini de palettes (les temps de chargement ou de déchargement sont négligés). Soit N_p le nombre de Palettes dans le système.

§ Modélisation de la circulation non stop des palettes sur le convoyeur.

§ Les points d'entrées et de sorties du système :

- entrée du système ;
- sortie du système ;
- les M entrées des M stations ;
- les M sorties des M stations.

§ Les stations sont données en boucles attachées au convoyeur, chacune d'elles est définie par:

- Le type du robot qui exécute l'opération élémentaire et son temps d'exécution;
- Le temps opératoire total (considérée par les gammes opératoires des produits);
- Positionnement des entrées et sorties des stations :
 - 1- Entrée de la station vers la file d'attente ;
 - 2- Entrée du robot à partir de la file d'attente d'entrée ;
 - 3- Sortie du robot vers la file d'attente de sortie ;
 - 4- Sortie de la station à partir de la file d'attente de sortie.
- La capacité N_{fae} Files d'Attente d'Entrée (FAEs) devant chacun des robots.
- La capacité N_{fas} Files d'Attente de Sortie (FASs) de chacun des robots.
- Points de branchements avec le convoyeur :
 - à l'entrée de chacune des stations (test d'entrée);
 - à la sortie de chacune des stations (priorité du convoyeur).

§ Les paramètres considérés pendant la simulation sont :

- La taille des commandes,
- Nombre de palettes dans le système ;
- La longueur du convoyeur ;
- La capacité des files d'attente d'entrée et des files d'attente de sortie dans les stations ;
- Le nombre de tâches dans le système ;
- Les durées opératoires dans les robots ;

3.6.3.4 – Modélisation par l'approche processus du système de production

3.6.3.4.1 – Identification des entités

L'entité considérée dans ce système est l'association des entités (représentant les pièces à assembler) entrantes à leurs palettes.

3.6.3.4.2 – Identification des processus

Nous avons recensé six processus :

- F Un processus d'entrée ;
- F Un premier processus de transformation : la première station ;
- F Un second processus de transformation : la seconde station ;
- F Un troisième processus de transformation : la troisième station ;
- F Un quatrième processus de transformation : la quatrième station ;
- F Un processus de sortie.

3.6.3.4.3 – Identification des ressources

F **Les ressources de transformation** : nous avons quatre robots, chacun dans une station portant le même indice.

F **Les ressources de stockage** : nous avons neuf files d'attente, une à l'entrée du système (FAE), deux files d'attentes propres à chaque station : une d'entrée (FAE1, FAE2, FAE3 et FAE4) et autre de sortie (FAS1, FAS2, FAS3 et FAS4).

F **Les ressources de transport** : un convoyeur en boucle reliant toutes les stations, quatre petits convoyeurs reliant l'entrée de chaque station à son robot et enfin quatre autres petits convoyeurs reliant le robot de chaque station à sa sortie.

3.6.3.4.4 – Identification des variables

Pour chaque entité, nous avons associé huit attributs :

F Pièce Index : cet attribut est propre au type de l'entité c'est-à-dire au travail qu'elle représente (Job1, Job2, Job3 et Job4).

F DO1 : durée opératoire de l'entité par rapport au premier robot.

F DO2 : durée opératoire de l'entité par rapport au deuxième robot.

F DO3 : durée opératoire de l'entité par rapport au troisième robot.

F DO4 : durée opératoire de l'entité par rapport au quatrième robot.

F NumberOut : cet attribut représente le nombre de produit fini sortant de la cellule. Il est initialisée à zéro et s'incrémente à chaque sortie d'un produit fini.

F NBE : cet attribut représente le nombre d'opérations d'assemblage effectuées. Il est initialisée à zéro et incrémentée à chaque sortie d'un robot.

F DO : cet attribut représente la somme de toutes les durées opératoires à effectuer par l'entité à travers la cellule. Il est mis à jours à chaque sortie d'un robot (soustraction de la durée effectuée).

Remarques :

§ Les deux attributs NBE et DO sont utilisés dans la définition des règles d'ordonnement dans les files d'attente. Le premier représente le travail restant à faire en terme d'étapes d'assemblage et le second en terme de temps opératoires dans les stations.

§ L'attribut NumberOut est utilisé comme un seuil du nombre de pièces à traiter, de telle sorte que ce seuil représente le nombre de pièce constituant un commande. Le but est d'arrêter la simulation dès que l'assemblage d'une commande (ensemble de pièces) est achevé.

3.6.4 – La transcription informatique du modèle par ARENA 7.1

Suivant la description précédente du système étudié, nous avons conçu un programme sous Rockwell ARENA 7.1. Cette étape du processus de simulation est la plus délicate de toutes, car en plus du fait de la création d'un modèle informatique fidèle au système étudié et de la reproduction exacte de son comportement ainsi que de ses composantes, la version du logiciel utilisé est une version académique. Une version académique Rockwell ARENA 7.1 est limitée par :

- le nombre de modules utilisés, pas plus de 150 blocks sachant qu'un module est conçu d'une association de blocks.
- Nombres d'objets SIMAN, pas plus de 250 des composants du types Blocks ou Elements.
- Le nombre des objets cinéma, pas plus de 150 objets

Ceci nous a poussé à recourir des artifices de modélisation afin de contourner ces limitations imposées par ARENA (ce qui nous a pris beaucoup de temps particulièrement dans le choix adéquat du type de modules à utiliser). Le programme entier est présenté en annexe 4.

Dans le but de modéliser à tout instant, un nombre limité de palettes dans la Cellule (par la suite limitation du nombre des pièces), nous avons préféré l'utilisation du Data module *Transporters* qui nous permettra d'imposer le nombre d'unités transporteur circulant simultanément dans la cellule. Chacune des unités transporteur modélise une palette.

3.6.4.1 – Modélisation statique de l'atelier d'assemblage

Les différentes conditions sont présentées par des Blocks **Branch** aux entrées et des sorties des stations.

3.6.4.1.1 – Modélisation de l'entrée du système : Création des pièces et leurs entrées

L'entrée de la cellule est conçue tel que montré dans la figure 3.6.

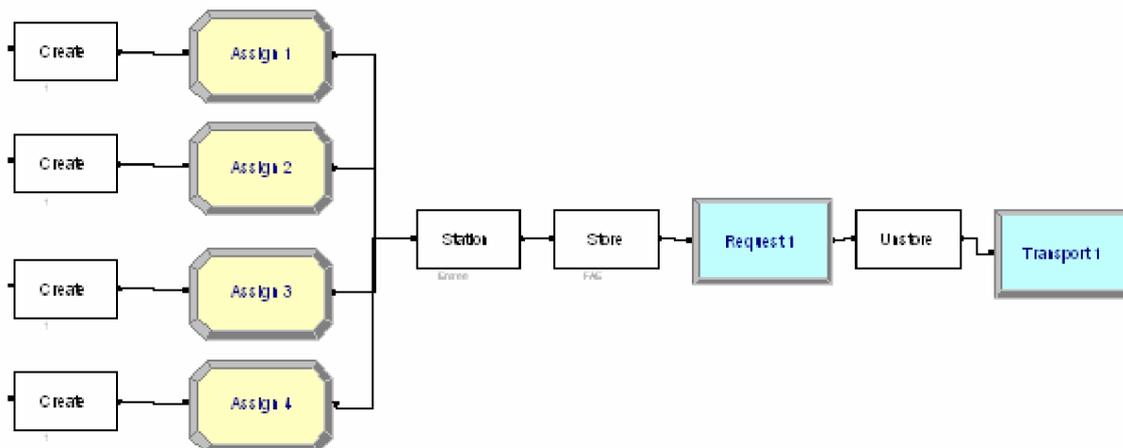


Figure 3.6 : Entrée des pièces dans la cellule

Nous avons utilisé quatre combinaisons des modules **Create-Assign** afin de créer quatre différents types de pièces. Ils représentent nos quatre travaux (Jobs) considérés dans cette étude : *Pièces 1*, *Pièces 2*, *Pièces 3* et *Pièces 4*.

Grâce au module **Assign**, nous avons affecté différents attributs aux entités créées.

- Le premier attribut *PieceIndex* représente l'index de l'entité créée.
- Le second attribut *TimeIn* représente le moment d'entrée dans la cellule.
- Le troisième attribut *NBE* représente le nombre d'opérations (étapes) d'assemblage effectuées. C'est une variable initialisée à zéro et qui sera ensuite incrémentée à chaque étape d'assemblage d'une pièce c'est-à-dire à chaque sortie d'un module **Process**.
- Les quatre attribut suivant *DO1*, *DO2*, *DO3*, et *DO4* représentent les différentes durées opératoires assignées à l'entité. Ces durées sont associées aux robots des stations portant le même indice.
- Un huitième attribut *DO* représente la somme des durées opératoires associées à une entité donnée et qui sera mis à jour à chaque étape d'assemblage (soustraction de la durée effectuée).
- Le dernier attribut assigne une image propre à l'entité

Une fois les entités créées, nous les stockons dans une file d'attente d'entrée nommée FAE par le module *Store* où elles y restent jusqu'à ce qu'une palette libre Arrive (*Request*). Dès que la palette est arrivée l'entité est directement mise en mouvement vers la première station (*Unstore-Transport*).

Remarque : Une fois l'entité est associée à une palette (transporteur), ARENA leur attribue un seul et unique indice c'est-à-dire qu'ils sont confondus.

3.6.4.1.2 – Modélisation d'une station

La cellule est composée de quatre stations, chacune contenant une file d'attente d'entrée, un robot et une file d'attente de sortie. Une station est modélisée en trois étapes :

- L'entrée de la station (figure 3.7);
- Le Robot ainsi que les deux files d'attente d'entrée et de sortie (figure 3.8) ;
- La sortie de la station (figure 3.9).

a. Modélisation de l'entrée d'une station :

Afin de suivre la logique d'un comportement d'une organisation d'atelier Open Shop, une série de tests d'entrée est effectuée à chaque entrée de station dans le but de vérifier si l'entité doit être traitée dans cette station ou pas (le premier modules *Branch*).

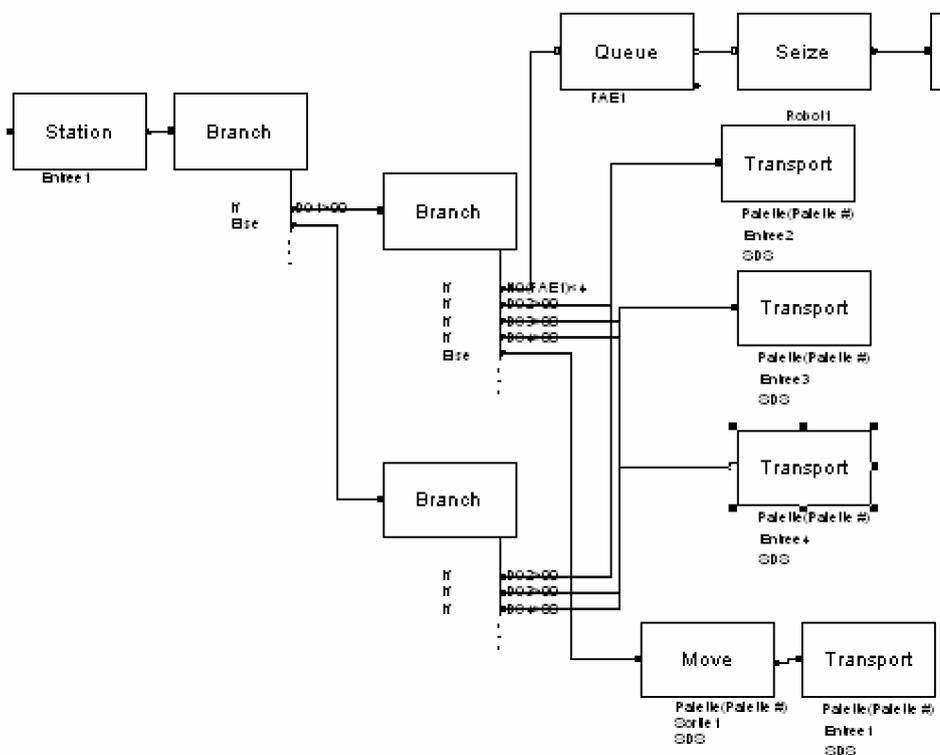


Figure 3.7 : Modélisation de l'entrée d'une station

Selon la station i , nous vérifions si l'attribut durée opératoire associé DO_i est nul ou pas par les conditions $IF DO1 > 0$, $IF DO2 > 0$, $IF DO3 > 0$ et $IF DO4 > 0$. Si la condition est vérifiée alors nous examinons le nombre de pièces en attente dans la file d'attente d'entrée de la station i par la condition : $IF NQ(FAE_i) < 4$ (**Branch 1** : 1ère condition). Dans ce cas où la capacité de la file d'attente (FAE_i) est de quatre, si la condition est vérifiée alors la pièce est mise dans la file d'attente et traitée dès que le robot est libre, si non elle est renvoyée vers les autres postes où elle n'a pas été traitée (**Branch 1** : 2ème, 3ème et 4ème conditions). Dans le cas où cette opération est la dernière dans le processus d'assemblage de la pièce considérée, alors elle est automatiquement renvoyée sur le convoyeur pour y faire un cycle complet et revenir à nouveau dans cette station.

b. Modélisation de la station d'assemblage

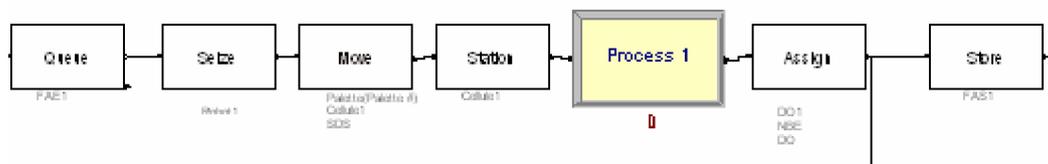


Figure 3.8 : Modélisation de la station (FAE, Robot, FAS)

Une fois, l'entité est admise dans la file d'attente elle y reste jusqu'à ce que le robot soit libéré. Selon la règle de priorité appliquée au niveau de la file d'attente, la pièce prioritaire est traitée (**Queue, Seize, Move, Station, Process**). Dès le traitement de la pièce est fini, elle est mise dans une file d'attente de sortie FAS_i (**Store**) et la durée opératoire effectuée est tout de suite assignée à zéro pour marquer le passage de la pièce dans cette station (**Assign** : $DO_i=0$).

c. Modélisation de la sortie de la station :

Une fois l'entité est dans la file d'attente de sortie, elle n'en sort que si le point de branchement entre la sortie de la station et le convoyeur n'est pas occupé sachant que la priorité revient aux pièces sur convoyeur (**Branch**). Si ce point de branchement est libre alors la pièce est tout de suite remise sur le convoyeur central si non elle reste dans la file d'attente de sortie de la station (**Move, Station**). La prochaine station est choisie selon les postes déjà visités (**Branch** : les trios premières conditions), si c'est la dernière alors la prochaine station est la sortie du système (**Branch** : la dernière condition).

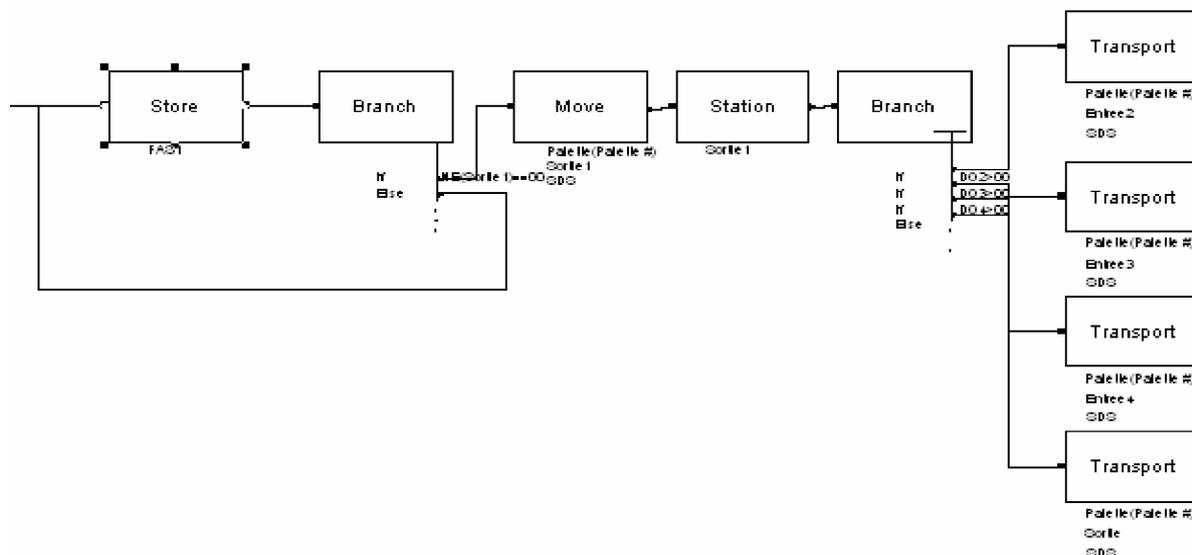


Figure 3.9 : Modélisation de la sortie d'une station.

3.6.4.1.3 – Modélisation de la sortie de la cellule d'assemblage

La sortie est représentée dans la figure 3.10.

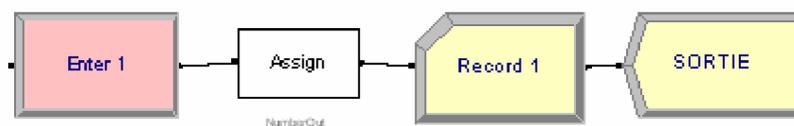


Figure 3.10 : Sortie de l'atelier

A la fin de l'assemblage d'une pièce, elle est tout de suite orientée vers la sortie du système. La sortie du produit est modélisée par la destruction de l'entité représentative (*Dispose*). A la sortie de chaque entité, la variable *NumberOut* est incrémenté de 1 par le block *Assign* ($NumberOut == NumberOut + 1$), ainsi la simulation est arrêtée dès que cette variable atteint la taille d'une commande. Dans le cas d'une commande de 120 pièces, la condition d'arrêt de la simulation, portée au niveau *Run/Setup/Replication Parameters/Terminating Condition*, est $NumberOut == 120$.

3.6.4.2 – Modélisation Dynamique de la cellule d'assemblage

Le schéma graphique de l'atelier par ARENA est présenté dans la figure 3.11.

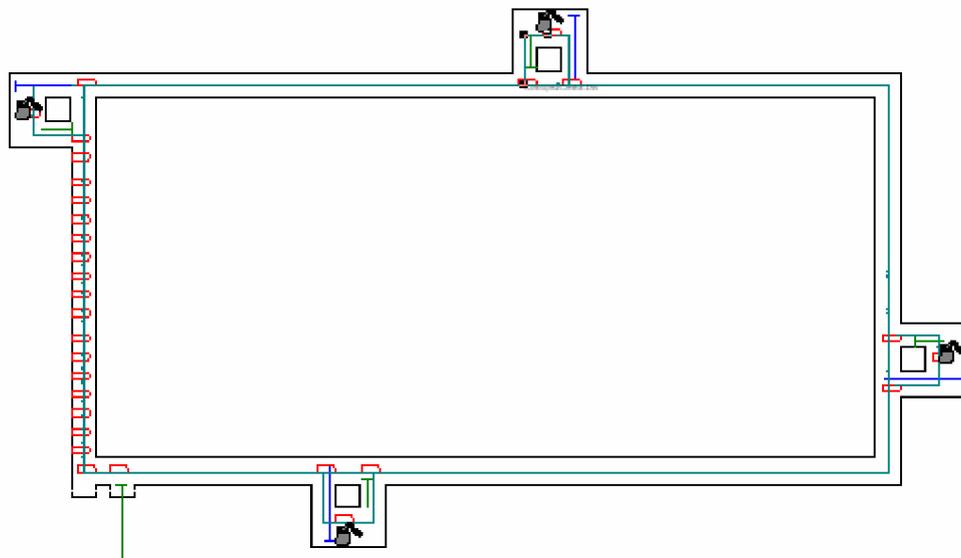


Figure 3.11 : La représentation graphique de la cellule par RockWell Arena 7.1

Nous avons représenté les différents points d'entrée et de sortie des stations par *AnimateTransfer/Station*, comme montré dans la figure 3.12.a.

Nous avons représenté les différentes files d'attente d'entrée (FAEi) des stations par *Animate/Queue* (figure 3.12.b) et les différentes files d'attente de sortie des stations (FASi) et d'entrée de la cellule (FAE) par *AnimateTransfer/Storage* (figure 3.12.c).

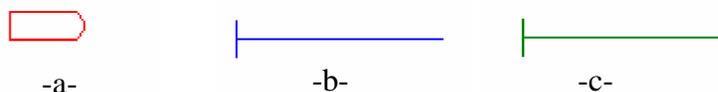


Figure 3.12 : a. Station, b. file d'attente d'entrée des stations : Queue,
c. file d'attente de sortie des station : Storage

Les ressources sont générées automatiquement par *Animate/Ressource* et nous les avons représenté par des figures de robot ramenées de la bibliothèque d'images *Machine.plb* (figure 3.13). Dans notre cas de figure, le robot n'admet que deux états : occupé (a) ou inoccupé (b).

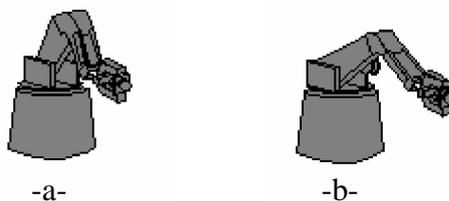


Figure 3.13 : La représentation graphique des robots

Les palettes sont représentées par des transporteurs générés dans le module *Transporter* (Figure 3.14).

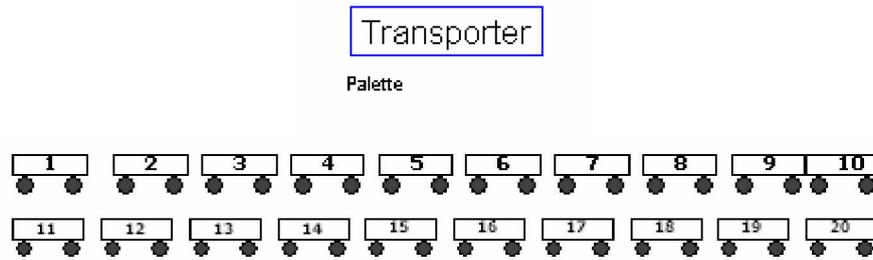


Figure 3.14 : modélisation des Palette par des transporteurs

Le convoyeur est modélisé par le circuit associé au module *Transporter* du type à cheminement libre composé de tronçons nommés *Distances* (figure 3.15).



Figure 3.15 : modélisation d'un tronçons du circuit par *Distances*

La figure 3.16 représente une image du système en plein évolution. On y voit des palettes sur le convoyeur, des pièces dans les files d'attente ainsi que des robot en plein exécution.

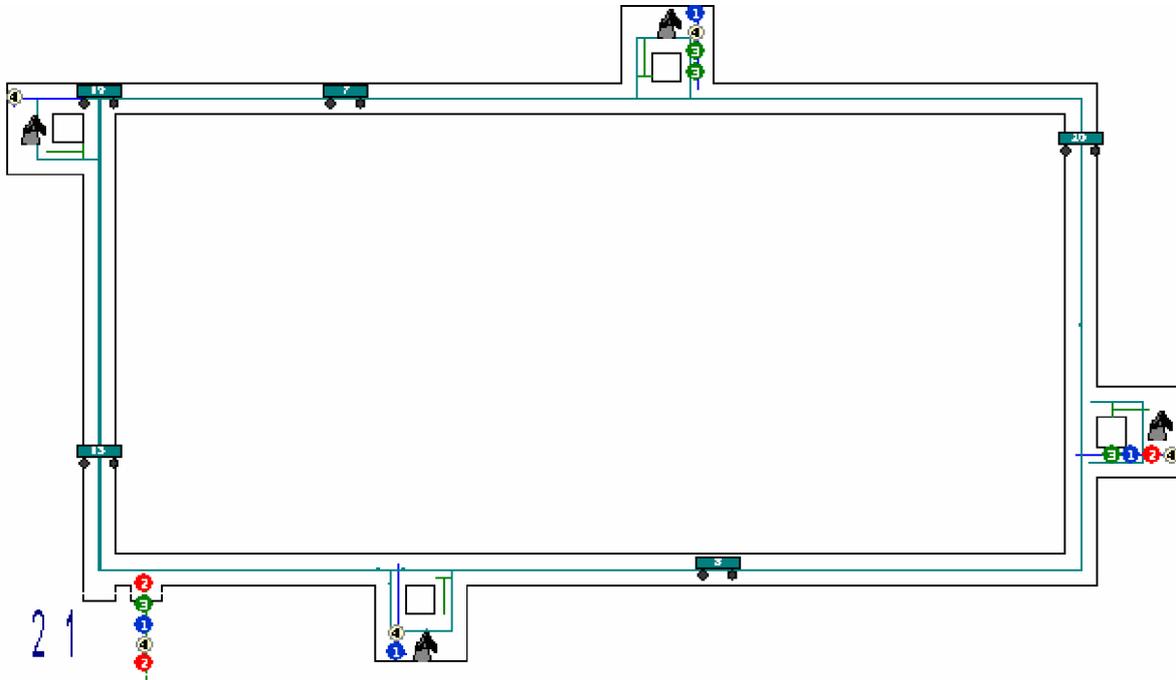


Figure 3.16 : le système en plein évolution

3.6.5 – Vérification du modèle

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du modèle et de sa robustesse, nous lui avons fait subir des tests extrêmes. Déjà, pendant la conception du modèle, nous testions à chaque étape les composants modélisés. D'abord le convoyeur et ses palettes circulants en boucle, par la suite le convoyeur et une station et en fin le convoyeur et deux stations (les interactions station-convoyeur : différentes conditions d'entrée et de sortie). Parmi ces tests nous citons :

- F La capacité d'une file d'attente infinie,
- F La capacité d'une file d'attente à un, durées opératoires unitaires avec une seule palette pour s'assurer de sa trajectoire sur le convoyeur.
- F Des durées opératoires importantes de l'ordre des 10^6 au niveau d'un seul poste dans le but de tester les boucles d'entrée moyennant quatre palettes dans une cellule de quatre palettes (donc quatre entités).

3.7– Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons réalisé les cinq premières étapes du processus de simulation telles présentées par Pritsker [Pri86].

Nous avons commencé ce chapitre par la présentation des concepts de base de la simulation afin de le structurer autour de notre objectif (réalisation d'un modèle de la cellule d'assemblage). La création d'un modèle fidèle au système étudié et sa transcription informatiques sont les deux étapes les plus délicates d'un processus de simulation et c'est sur lesquelles qu'une grande partie du temps a été consacré (en cas de modèle erroné c'est tout le travail qui l'est). Nous avons d'abord présenté l'outil utilisé, ARENA 7.1, par la suite, nous avons conçu un modèle de la cellule étudiée, ce qui n'était pas facile à cause des limitations et contraintes imposées par la version académique du logiciel utilisé. Enfin, nous avons testé le modèle par un ensemble de tests (d'abord simples par la suite extrêmes). Une fois le modèle validé, nous procédons à l'application des cinq étapes restantes du processus de simulation dans le cadre du prochain chapitre. La prochaine étape est la planification stratégique et tactique de la simulation.

Chapitre 4 :

Simulation et tests des différentes stratégies d'ordonnancement proposées

4.1 – Introduction

La simulation consiste à construire un modèle d'un système réel et à conduire des expériences sur ce modèle afin de comprendre le comportement de ce système et d'en améliorer les performances. Un modèle de simulation permet de prévoir les performances du futur système de production en fonction des choix qui sont faits tant en ce qui concerne le dimensionnement du système physique que de la conception du système de commande. Ce modèle de simulation entre dans une boucle d'améliorations progressives permettant par modifications successives, d'affiner la solution du problème posé.

Le logiciel de simulation ARENA comporte toutes les fonctions nécessaires à l'évaluation des performances par simulation, telles que l'animation, l'analyse des données d'entrée (analyse de l'input), la vérification du modèle et l'analyse de résultats (analyse de l'output), dans un seul environnement de modélisation.

Dans ce chapitre, nous mettons en oeuvre des étapes restantes du processus de simulation, telles que définies par Pritsker [Pri86], c'est-à-dire la planification stratégique et tactique de la simulation, son exécution selon l'étape précédente et enfin l'analyse et l'interprétation des résultats. Ainsi, la première section du chapitre est consacrée à l'élaboration du plan d'expérimentation par simulation. Pour ce faire, nous commencerons par définir une configuration de base à partir de laquelle nous développons, par la suite, les différentes variantes composant notre plan d'expérimentation. La seconde section est consacrée à l'analyse et l'interprétation des résultats. Nous y analyserons les temps de séjour d'une commande de pièces ainsi que les temps de séjours moyens des pièces dans la cellule. Comme un temps de séjour est composé du temps d'attente, des temps de traitement et du temps de transfert, les cinq sous-sections suivantes sont consacrées à l'analyse de ces temps (attente et transfert). La dernière sous-section est consacrée à l'analyse des taux d'utilisation des robots. La troisième et dernière section est une conclusion sur les principaux résultats de ce chapitre

4.2 – La planification stratégique et tactique de la simulation

Après les étapes de modélisation et de transcription informatique, cette étape est, sans doute, la plus critique et la plus délicate du processus de simulation. Selon l'objectif, arrêté, de l'étude, l'approche n'est pas toujours simple à mettre en oeuvre car les paramètres à considérer lors de l'étude de la cellule d'assemblage sont très nombreux et chacun d'eux peut avoir son influence sur la performance globale de la cellule. Ceci constitue une situation

combinatoire qui pourrait « exploser » exponentiellement. A titre d'exemple, nous pouvons étudier l'influence des paramètres suivants : La longueur du convoyeur central, le nombre des stations, la capacité des files d'attente d'entrée, le nombre de palettes, le nombre de tâches, la tailles des commandes, la fréquence d'entrée des pièces dans la cellule, ... (chaque paramètre pouvant faire l'objet de variations diverses). Dans la pratique, il n'existe pas de méthodes directes permettant de définir de façon optimale les types et le nombre d'expériences à mener en vue de bien cerner un problème ou un système étudié. Toutefois, une planification judicieuse des expériences à mener pourrait permettre une couverture suffisante du problème. Ceci peut se faire par recensement des paramètres à varier d'une part, et la détermination de l'intervalle et le pas de variation pour chaque paramètre d'autre part.

Pour ce faire, nous avons commencé par arrêter une configuration de base de la cellule, en définissant : la dimension du convoyeur, le nombre de stations, et le nombre de palettes. Conformément aux hypothèses arrêtées lors de la formulation (cf. chapitre 3), la dimension du convoyeur sera un multiple du nombre de palettes.

Pour chaque expérience, nous avons considéré :

- ☞ Les durées opératoires sur les robots qui sont fonction des types de pièces traitées ;
- ☞ Les dimensions des Files d'Attente d'Entrée (FAEs)¹ (possibilité de réduction des temps de transfert sur le convoyeur central en augmentant les capacités des files d'attente, et par conséquent de réduction des temps de séjours) ;
- ☞ Les règles de priorité (possibilité de réduction des temps d'attente des pièces par un ordonnancement plus efficace au niveau des stations).

Nous testerons, également, des règles de priorité, pour en déduire des conclusions générales, et choisir une stratégie d'application de ces règles propre au contexte de l'application. Nous avons choisi les règles de priorité minimisant les temps de séjours des pièces dans la cellule ; c'est-à-dire minimisant $\sum_{i=1}^n (c_i - r_i)$ où c_i est la date fin de l'opération i , r_i est la date d'arrivée de l'opération i et n est le nombre d'opérations à ordonnancer [Chu99].

Les règles choisies sont :

- La SPT (Shortest Processing Time),
- La LPT (Longest Processing Time),
- La MWKR (Most Work Remining First),
- La LWKR (Least Work Remining First).

¹ Par la suite les Files d'Attente d'Entrée dans les stations sont nommées **FAEs**.

Ces règles sont d'abord appliquées chacune toute seule, dans un premier temps, par la suite, et selon les résultats obtenus, nous testerons des combinaisons de ces règles.

Remarque : les deux règles la LWKR et la MWKR sont appliquées en deux étapes :

- ☞ MWKR1 et LWKR1 selon la durée d'exécution totale restante;
- ☞ MWKR2 et LWKR2 selon le nombre d'étapes d'assemblage restantes.

4.2.1 – Le choix d'une configuration

La configuration arrêtée pour l'expérimentation est une cellule composée de quatre stations, dont le nombre de palettes est de 20 et la longueur du convoyeur est de 500 palettes. Les distances entre les différentes stations sont représentées dans le tableau 4.1.

	Sortie	Entrée	Entrée1	Sortie1	Entrée2	Sortie2	Entrée3	Sortie3	Entrée4	Sortie4
Sortie	500	1	49	51	199	201	319	321	449	451
Entrée	499	500	48	50	198	200	318	320	448	450
Entrée1	451	452	500	2	150	152	270	272	400	402
Sortie1	449	450	498	500	148	150	268	270	398	400
Entrée2	301	302	350	352	500	2	120	122	250	252
Sortie2	299	300	348	350	498	500	118	120	248	250
Entrée3	181	182	230	232	380	382	500	2	130	132
Sortie3	179	180	228	230	378	380	498	500	128	130
Entrée4	51	52	100	102	250	252	370	372	500	2
Sortie4	49	50	98	100	248	250	368	370	498	500

Tableau 4.1 : Les distances entre stations

Dans un souci de maintien de l'équilibre entre les stations (Line balancing), les durées opératoires ont été choisies de sorte que les différences entre les durées des travaux (jobs) ne dépassent pas les 25 %. Ces durées sont données dans le tableau A5.2 de l'annexe 5.

Finalement le problème considéré est $O4|\tau_j|F$, tel que τ_j représente les temps de transport entre les stations et F le temps de séjour total (Total Flow Time).

4.2.2 – Le plan d'expérimentation

Sachant qu'un temps de séjours d'une pièce dans la cellule est composé des temps d'attente dans les files d'attente, des durées opératoires sur les différents postes de travail ainsi que des temps de transfert entre les stations (les temps de chargement et déchargement sont considérés nuls), sa minimisation fera intervenir plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres la capacité des FAEs (un temps d'attente dans une FAE peut être beaucoup plus petit qu'un tour complet sur le convoyeur central).

Les paramètres pris en considération pendant la simulation sont :

- Le nombre de travaux que nous avons arrêté à quatre.
- Le nombre de gammes non-linéaires testées est de 50.

La capacité des FAEs des stations choisies sont 3, 4, 5, 10, et 20². Une dimension supérieure à 20 n'aura pas de sens du moment qu'il ne peut y avoir simultanément que 20 palettes et par conséquent 20 pièces dans la cellule. Les trois premiers choix de la capacités des FAEs sont faits de sorte que le nombre d'emplacements d'attente globale dans les stations de la cellule soit proche du nombre de palettes en circulation sur le convoyeur central (3×4=12, 4×4=16, 4×5=20). En additionnant le nombre des postes de charge (considérés comme emplacement de stockage momentané), ces chiffres deviennent 16, 20 et 24. Les deux derniers choix sont des situations extrêmes. Par ce point, nous voulons tester si la capacité des files d'attente d'entrée pouvait avoir une influence sur les temps de séjours des pièces dans la cellule par la diminution des temps de transfert sur le convoyeur central.

Sur la base de ce qui précède, le nombre d'expériences est de 5×50 c'est-à-dire 250. En considérant les règles d'ordonnement (les règles de priorité), ce dernier nombre est multiplié par sept ce qui ramène le nombre final d'expériences à **1750**. Les différentes expériences sont notées dans le plan d'expérimentation contenu dans le tableau A5.1 de l'annexe 5.

Lors de l'élaboration de notre plan d'expérimentation, nous avons d'abord arrêté le nombre des expériences en arrêtant les configurations physiques (disposition des points d'entrée et de sortie des stations de la cellule ainsi que leurs FAEs et les FASs³) de la cellule. Pour ce faire, nous avons commencé par varier la capacité des FAEs selon les variantes déjà arrêtées (3, 4, 5, 10 et 20). Ainsi cinq expériences ont été définies. Par la suite, pour chacune des ces expériences, nous avons fait varier les durées opératoires (contenues dans le tableau A5.2 de l'annexe 5) afin d'obtenir les différentes variantes de produits ce qui nous donne 50 cas possibles pour chacune des expériences. Enfin, nous avons fait varier les règles de pilotage qui nous donne 7 expériences pour chaque combinaison variante de produit/capacité de file d'attente. Ainsi pour chacune des expériences nous obtenons 350 tests pour une capacité donnée de la FAE, ce qui nous ramène aux 1750 expériences recensées au paragraphe précédent. Le tableau 4.2 ci après reprend clairement le plan d'expérimentation :

² Nous nous arrêtons à ces cinq valeurs afin d'éviter une explosion exponentielle du nombre d'expériences à effectuer.

³ FASs sont les Files d'Attente de Sortie.

N° Expérience	Capacité des FAEs	Durées opératoires (DOs)	Règle d'ordonnancement : règle de priorité
1	3	50 combinaisons de 4 produits à assembler, chacun d'eux est représenté par une combinaison de 4 durées opératoires → divisées en 50 cas	Test des 7 règles d'ordonnancement : FIFO (référence), SPT, LPT, LWKR1 (DOs), LWKR2 (étapes), MWKR1 (DOs), MWKR2 (étapes) → fractionnés en 350 cas
2	4	50 combinaisons de 4 produits à assembler chacun d'eux est représentées par une combinaison de 4 durées opératoires → divisé en 50 cas	Test des 7 règles d'ordonnancement : FIFO (référence), SPT, LPT, LWKR1 (DOs), LWKR2 (étapes), MWKR1 (DOs), MWKR2 (étapes) → fractionné en 350 cas
3	5	50 combinaisons de 4 produits à assembler, chacun d'eux est représenté par une combinaison de 4 durées opératoires → divisé en 50 cas	Test des 7 règles d'ordonnancement : FIFO (référence), SPT, LPT, LWKR1 (DOs), LWKR2 (étapes), MWKR1 (DOs), MWKR2 (étapes) → fractionné en 350 cas
4	10	50 combinaisons de 4 produits à assembler, chacun d'eux est représenté par une combinaison de 4 durées opératoires → divisé en 50 cas	Test des 7 règles d'ordonnancement : FIFO (référence), SPT, LPT, LWKR1 (DOs), LWKR2 (étapes), MWKR1 (DOs), MWKR2 (étapes) → fractionné en 350 cas
5	20	50 combinaisons de 4 produits à assembler, chacun d'eux est représenté par une combinaison de 4 durées opératoires → divisé en 50 cas	Test des 7 règles d'ordonnancement : FIFO (référence), SPT, LPT, LWKR1 (DOs), LWKR2 (étapes), MWKR1 (DOs), MWKR2 (étapes) → fractionné en 350 cas
Le but de l'étape	Influence de la capacité des FAEs sur la minimisation des temps de transfert.	Influence des durées opératoires des produits à assembler sur la performance de la cellule : apparition d'un phénomène de stabilité de performance.	Influence des règles d'ordonnancement sur la performance de la cellule : diminution des temps d'attente dans les FAEs des stations (ordonnancement judicieux des files d'attente)

Tableau 4.2 : Résumé du plan d'expérimentation contenu dans le tableau A5.1 de l'annexe 5

Suivant les rapports de simulation ARENA que nous avons conçus, nous avons obtenu pour chacun de ces tests, les résultats à analyser, à savoir :

- ☞ Les temps nécessaires à l'assemblage d'une commande (C_{max}) ;
- ☞ Le temps de séjours moyen de chaque pièce (produit fini) dans la cellule : composé des temps d'attente dans les files d'attente d'entrée (de la cellule et des stations) auquel on additionne les temps de transfert et les temps d'exécution des opérations sur les stations ;

Comme nous l'avons précisé ci-dessus, les temps de séjour sont composés de temps d'attente, temps de transfert et du temps d'exécution, ainsi nous nous sommes intéressés de plus près à d'autres résultats (d'autres indicateurs) afin d'analyser l'impact des temps d'attente et de transfert des pièces sur leurs temps de séjours dans la cellule. De ce fait, et en vue de compléter notre étude, en plus des temps de séjours, nous étudierons les paramètres suivants :

- ☞ Les temps de transfert des pièces ;
- ☞ Le nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule ;

- ☞ Les temps d'attente dans les FAEs ;
- ☞ Le nombre de pièces en attente dans les FAEs ;
- ☞ Les taux d'utilisation des robots.

4.2.3 – Les indicateurs de performance à analyser

Pendant la phase d'analyse des résultats, pour chaque expérience, nous calculerons les taux d'amélioration entre les résultats obtenus en FIFO et ceux obtenus par les autres règles.

Dans la première partie (§4.3.1), les temps étudiés sont les temps de séjours d'un ensemble de pièces correspondant à une commande dans la cellule. L'amélioration correspond à une réduction du temps de séjour d'une commande. Les taux d'amélioration des temps de séjours d'un lot dans la cellule $\tau_{TSCR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{TSCR\grave{e}gle} = \frac{(T_{SCFIFO} - T_{SCR\grave{e}gle})}{T_{SCFIFO}} * 100$$

tels que : $T_{TSCFIFO}$ est le temps de séjours d'une commande sous un pilotage FIFO ;

$T_{TSCR\grave{e}gle}$ est le temps de séjours d'une commande sous un pilotage de la Règle utilisée.

Dans la seconde partie (§4.3.2), les temps étudiés sont les temps de séjours moyens des pièces dans la cellule (sous ARENA, ces temps sont nommés Total Time (Entity)). L'amélioration correspond à une réduction de ces temps. Les taux d'amélioration des temps de séjour $\tau_{TSR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{TSR\grave{e}gle} = \frac{(T_{SFIFO} - T_{SR\grave{e}gle})}{T_{SFIFO}} * 100$$

tels que : T_{TSFIFO} est le temps de séjours d'une pièce sous un pilotage FIFO ;

$T_{TSR\grave{e}gle}$ est le temps de séjours d'une pièce sous un pilotage de la Règle utilisée.

Dans la troisième partie (§4.3.3), les temps étudiés sont les temps de transfert moyens des pièces dans la cellule (sous ARENA, ces temps sont nommés Transfert Time (Entity)). Une amélioration correspond à une réduction des temps de transfert. Les taux d'amélioration des temps de transfert $\tau_{TTR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{TTR\grave{e}gle} = \frac{(T_{TFIFO} - T_{TR\grave{e}gle})}{T_{TFIFO}} * 100$$

tels que : T_{TTFIFO} est le temps de transfert d'une pièce sous un pilotage FIFO ;

$T_{TTR\grave{e}gle}$ est le temps de transfert d'une pièce sous un pilotage de la Règle utilisée.

Dans la quatrième partie (§4.3.4), le paramètre étudié est le nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule (ce nombre est obtenu par la division du temps maximal de transfert

d'une pièce par la longueur du convoyeur). L'amélioration correspond à une réduction du nombre cycles. Les taux d'amélioration du nombre de cycles des pièces dans la cellule $\tau_{NCR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{NCR\grave{e}gle} = \frac{(N_{CFIFO} - N_{CR\grave{e}gle})}{N_{CFIFO}} * 100$$

tels que : N_{CFIFO} est le nombre maximal de cycles des pièces dans la cellule sous un pilotage FIFO ;

$N_{CR\grave{e}gle}$ est le nombre maximal de cycles des pièces dans la cellule pour de la Règle utilisée.

Dans la cinquième partie (§4.3.5), les temps étudiés sont les temps d'attente moyens des pièces dans les files d'attente d'entrée des stations de la cellule (sous ARENA, ces temps sont nommés Waiting Time (Queue)). Une amélioration correspond à une réduction de ces temps. Les taux d'amélioration des temps d'attente dans les FAEs $\tau_{TAFR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{TAFR\grave{e}gle} = \frac{(T_{AFFIFO} - T_{AFR\grave{e}gle})}{T_{AFFIFO}} * 100$$

tels que : T_{AFFIFO} est le temps d'attente d'une pièce dans une FAE sous un pilotage FIFO ;

$T_{AFR\grave{e}gle}$ est le temps d'attente d'une pièce dans une FAE sous un pilotage de la Règle utilisée.

Dans la sixième partie (§4.3.6), les données étudiées sont le nombre moyen de pièces en attente dans les files d'attente d'entrée des stations de la cellule (sous ARENA, ces temps sont nommés Number Waiting (Queue)). Une amélioration correspond à une réduction de ce nombre. Les taux d'amélioration du nombre de pièces en attente dans les FAEs $\tau_{NAFR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{NAFR\grave{e}gle} = \frac{(N_{AFFIFO} - N_{AFR\grave{e}gle})}{N_{AFFIFO}} * 100$$

tels que : N_{AFFIFO} est le nombre de pièces en attente dans une FAE sous un pilotage FIFO ;

$N_{AFR\grave{e}gle}$ est le nombre de pièces en attente dans une FAE sous un pilotage de la Règle utilisée.

Dans la huitième partie (§4.3.8), les données étudiées sont les taux moyens d'utilisation des robots de la cellule (sous ARENA, ces données sont nommés Instantaneous Utilization (Resource)). Une amélioration correspond à une augmentation de ces taux. Les taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots $\tau_{URFR\grave{e}gle}$ sont calculés comme suit :

$$\tau_{TURR\grave{e}gle} = \frac{(T_{URR\grave{e}gle} - T_{URFIFO})}{T_{URFIFO}} * 100$$

tels que : T_{URFIFO} est le taux d'utilisation du robot R_i sous un pilotage FIFO ;

$T_{URR\grave{e}gle}$ est le taux d'utilisation du robot R_i obtenu par la Règle utilisée.

Remarque : les rapports générés automatiquement par ARENA 7.1 ne contiennent pas toujours les données que nous voulons étudiées. Il n'est pas évident d'introduire les modules d'analyse pour tous les paramètres arrêtés à cause des limitations imposées par la version académique du logiciel utilisé (cf. §3.8.4 du chapitre 3).

4.3 – Analyse et interprétation des résultats

Conformément au plan d'expérimentation arrêté précédemment (cf. tableau A5.1 de l'annexe 5), nous avons mis en oeuvre les différentes configurations et relevé les résultats que nous avons analysés par la suite. Avant d'étudier les temps de séjours des pièces dans la cellule, nous avons, dans un premier temps, tenté de définir la performance globale induite par l'application des règles d'ordonnancement. Pour ce faire, nous avons commencé par étudier les temps de séjour dans la cellule d'un ensemble de pièces correspondant à une commande. Le nombre des pièces arrêté est de 120 (dans notre cas, c'est le nombre maximal de pièces autorisé par la version académique d'Arena 7.1).

L'analyse des résultats s'est faite par la lecture des graphes en considérant, soit le type de pièces tel que dans la figure 4.1.a, soit la capacité des FAEs (3, 4, 5, 10, 20) c'est-à-dire par les expériences 1, 2, 3, 4, 5 (tableau 4.2) conformément à la figure 4.1.b.

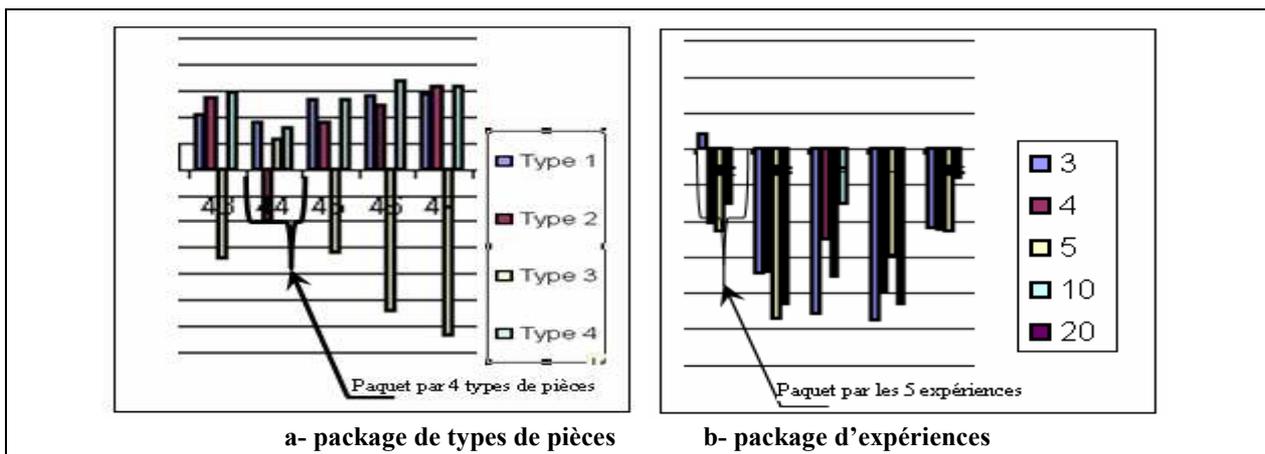


Figure 4.1 : Lecture des graphes

Lors des lectures par package de types de pièces, il est primordial de garder en vue les conséquences des interactions entre les pièces présentes simultanément dans la cellule c'est-à-

dire qu'un taux d'amélioration acquis pour un type peut être perdu pour un autre (taux de retard acquis). On serait ainsi en présence d'un phénomène de compensation.

4.3.1 – Analyse des temps d'assemblage d'une commande de pièces : minimisation du C_{max}

Conformément aux figures 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7, les règles d'ordonnancement n'apportent aucune amélioration significative au temps d'assemblage des pièces d'une commande. Les taux d'amélioration ne dépassent pas les 5%. Les cas de dégradation de performance sont plus nombreux et plus importants sous les pilotages LWKR1 (figure 4.4) et MWKR2 (figure 4.7).

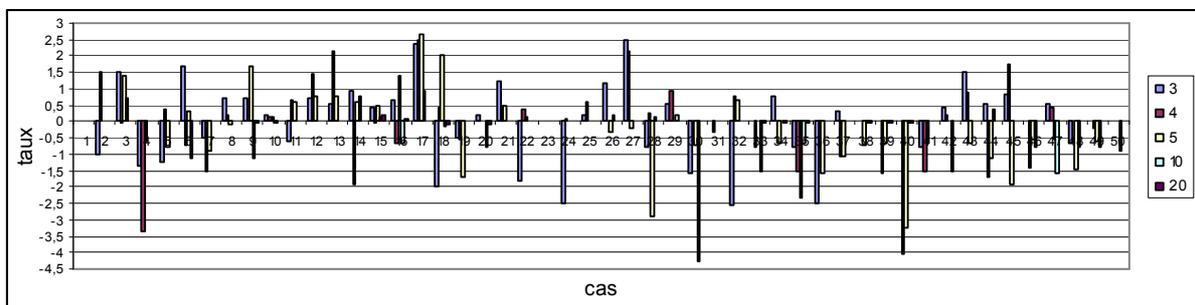


Figure 4.2 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle SPT

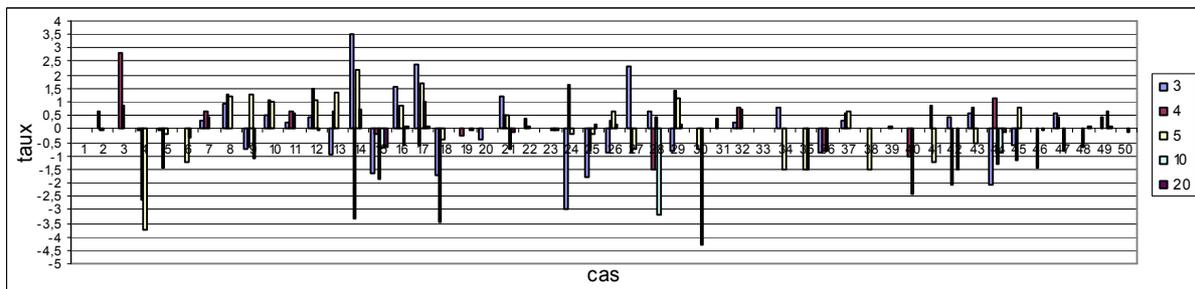


Figure 4.3 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LPT

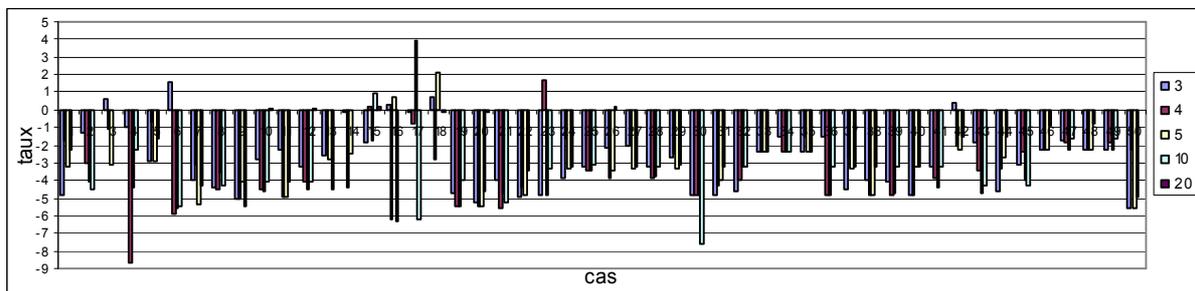


Figure 4.4 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LWKR1

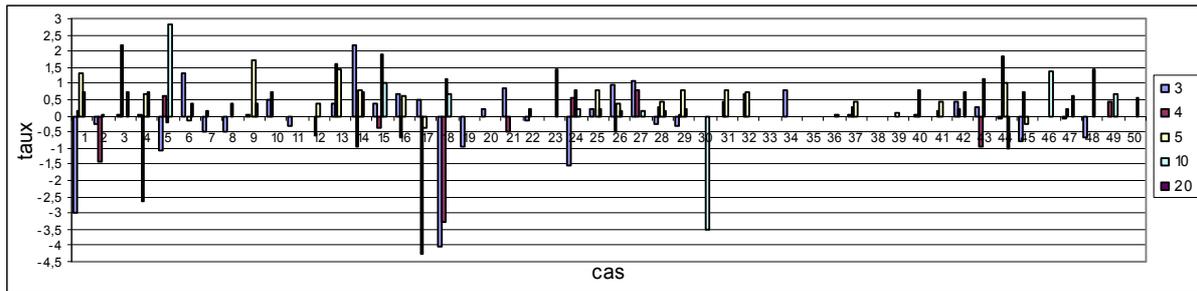


Figure 4.5 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle LWKR2

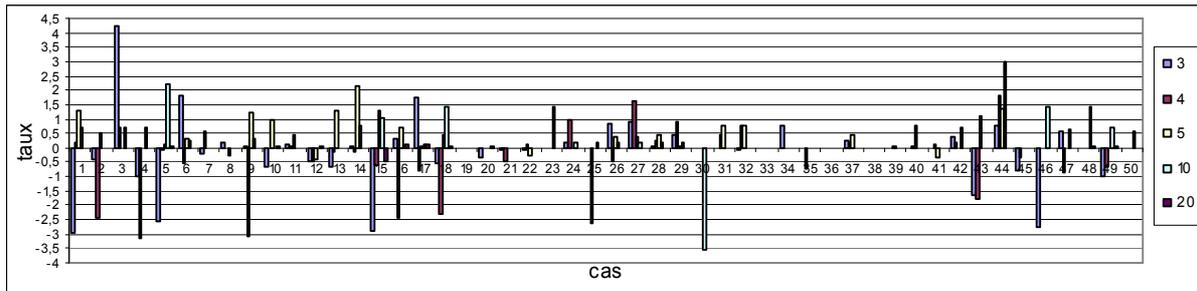


Figure 4.6 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle MWKR1

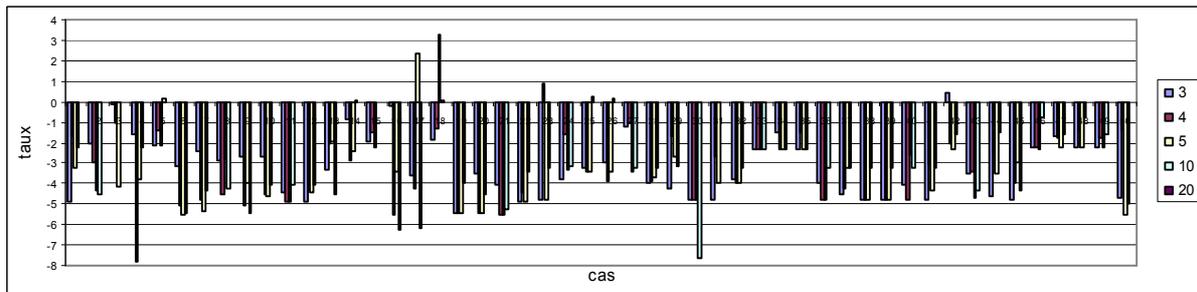


Figure 4.7 : Les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande par la règle MWKR2

✚ En résumé (voir figure 4.8), la moyenne des taux d'amélioration dans les cinq expériences ne dépassent pas 0.4% pour un écart type de l'ordre de 2.3% obtenu par des ordonnancements LWKR2 et de MWKR1 dans les cas dont la capacité des FAEs est de 5 et 10 (elle atteint à peine les 0.02% \pm 1.12% dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3 sous un pilotage LPT). Dans les quatre autres expériences, les cas de mauvaises performances sont obtenus par les règles LWKR1 et la MWKR2. Pour les six règles d'ordonnancement, les taux d'amélioration les plus faibles sont obtenus dans les configurations dont la capacité des FAEs est de 20 (souvent nuls). Nous déduisons de ce qui précède que pour chacune des règles, l'impact des capacités des files d'attente sur le Cmax est quasiment inexistant.

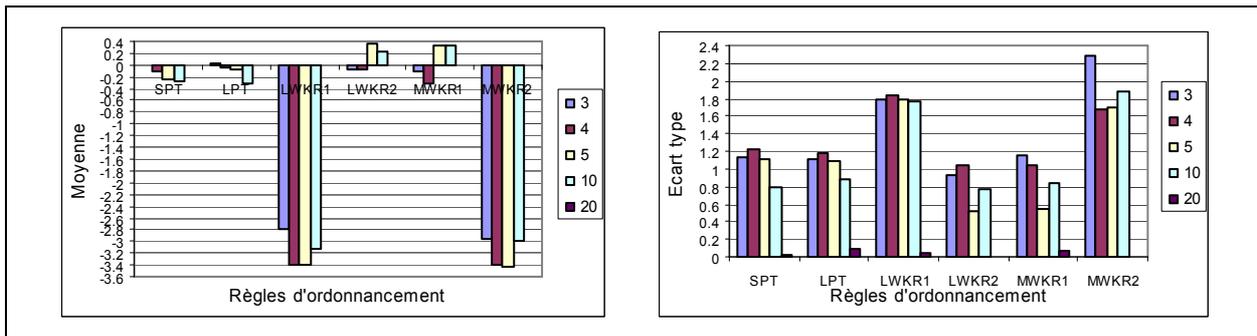


Figure 4.8 : Moyenne des taux de séjours d'une commande dans la cellule

Conformément à la figure 4.9, dans les quatre premières expériences, les règles SPT, LPT, LWKR2 et MWKR1 présentent un taux des cas améliorés ne dépassant pas les 50% (voir 60% pour la MWKR1 : figure 4.9.d) et aucune robustesse n'est apparue c'est-à-dire qu'aucune des règles ne présente des signes de performance régulière et continue par rapport aux autres. Dans ces expériences, Les plus faibles taux de cas améliorés sont obtenus par des ordonnancement LWKR1 et MWKR2.

Dans la dernière expérience (figure 4.9.e), vu la capacité des FAEs (capable d'absorber toutes les palettes à la fois), nous retrouvons un comportement Flow Shop car toutes les palettes passent par les stations selon leurs ordre de disposition. Ainsi le taux des cas non améliorés est plus important que les autre cas. Les règles LRWK2 et MRWK2 perdent leurs sens, car dans un poste d'assemblage, le nombre d'étapes d'assemblage effectuées est le même pour toutes les pièces. Les pièces sont d'ailleurs traitées en FIFO. Les règles LPT et MWKR1 présentent un taux des cas améliorés ne dépassant pas les 36% pendant que la SPT et LWKR1 arrivent à peine à 10 %.

Remarque : dans ce dernier cas (capacité des FAEs à 20), les deux règles SPT et LWKR1 sont presque identiques car les deux favorisent les durées opératoires minimales, de même pour la LPT et la MWKR1, elles favorisent les durées opératoires maximales.

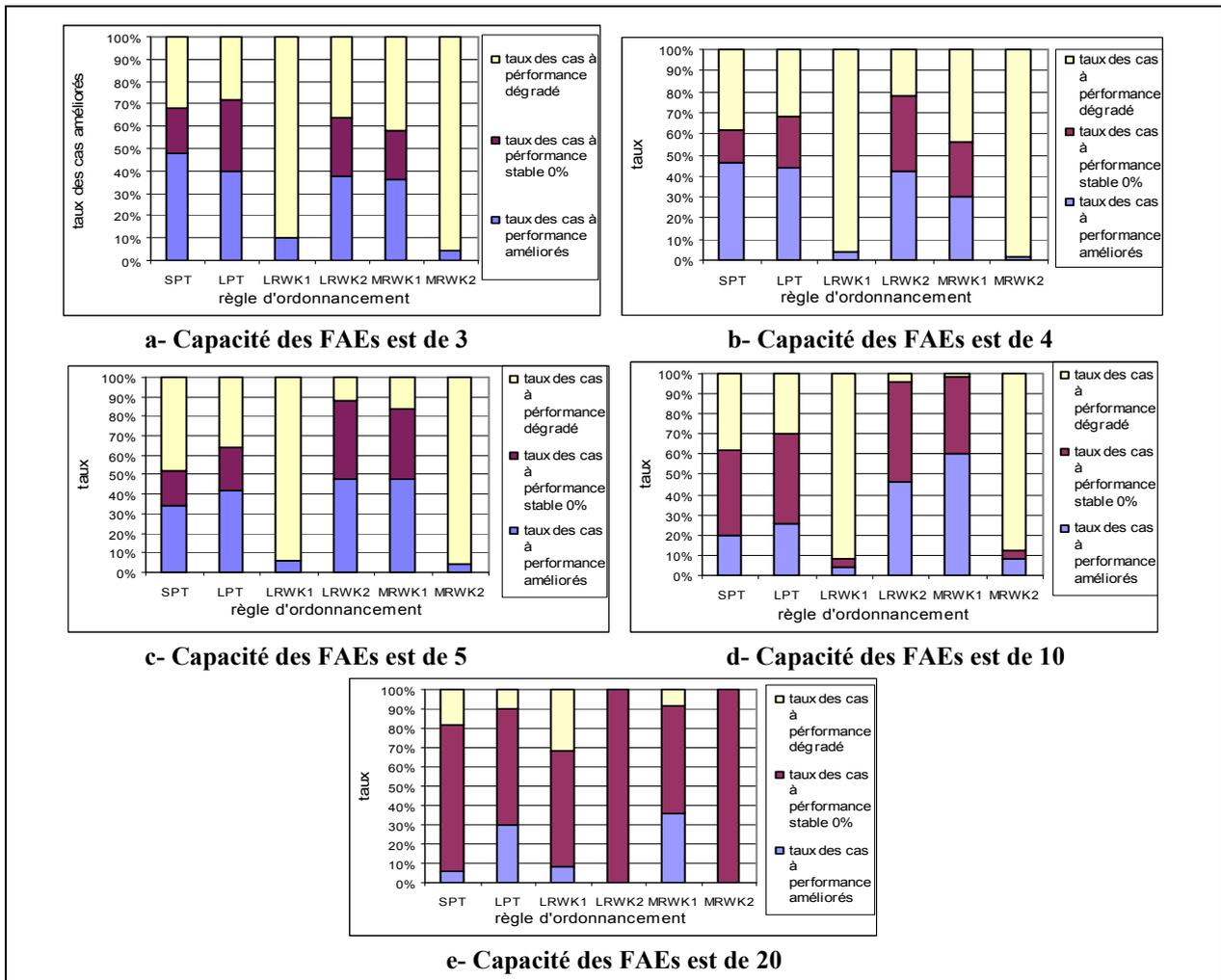


Figure 4.9 : Les taux de nombre des cas améliorés

Lors de l'analyse des taux d'amélioration des temps de séjours d'une commande dans la cellule, nous avons constaté que l'amélioration du temps de séjour reste toujours insignifiante. La moyenne des taux de réduction ne dépassent pas 0.5% avec un écart type de l'ordre de 2%, obtenus par les règles LWKR2 et MWKR1. La moyenne des taux d'amélioration dans les cas ordonnancés par les règles SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2 est négative.

4.3.2 – Analyse des temps de séjour moyens des pièces dans la cellule d'assemblage

4.3.2.1 – Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT

Selon la capacité des FAEs (figures 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14), la distribution des taux est relativement plus concentrée vers le haut de l'axe des abscisses. Les taux d'amélioration par la règle SPT des temps de séjour ne dépassent pas les 18 %. Ils augmentent dans le même sens que la capacité des FAEs : 9%, 13%, 15% et 18% pour les deux dernières expériences. Dans tous les cas, les taux de détérioration sont plus importants (de 8% à 47%).

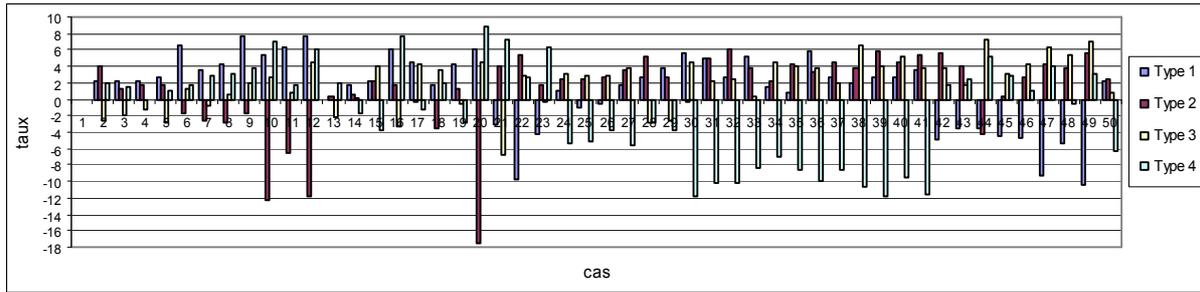


Figure 4. 10 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3

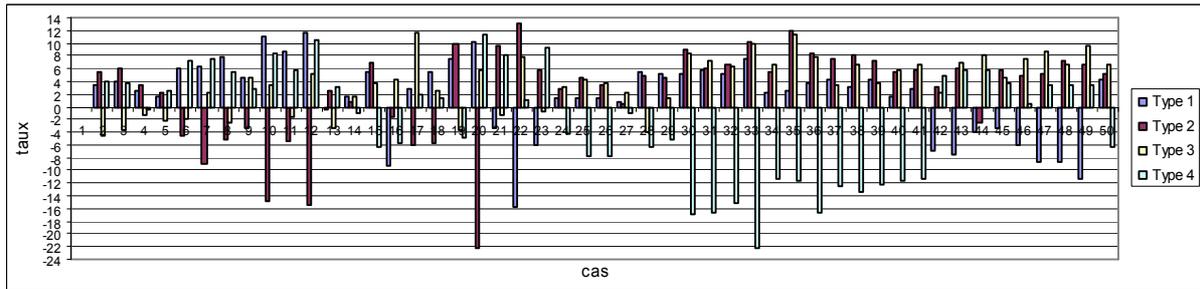


Figure 4. 11 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4

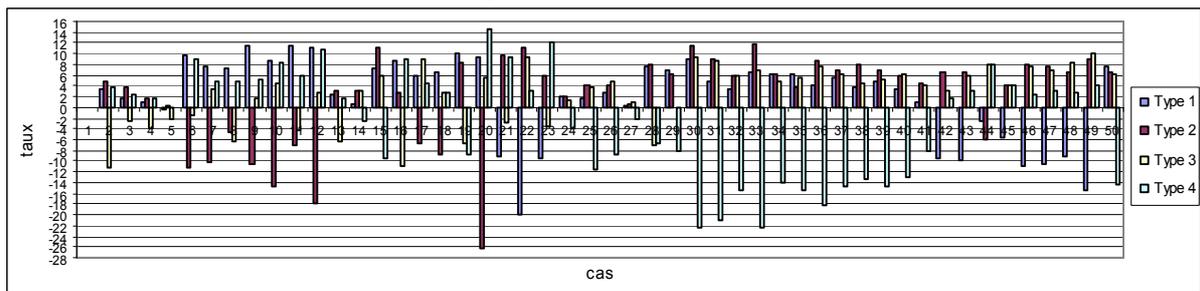


Figure 4. 12 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5

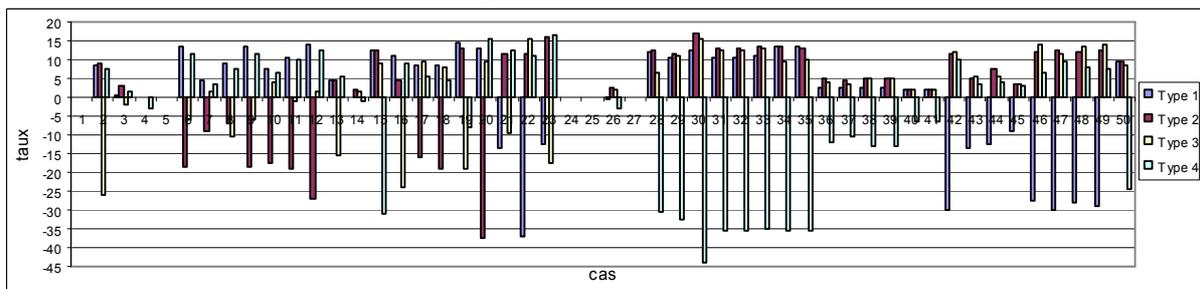


Figure 4. 13 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10

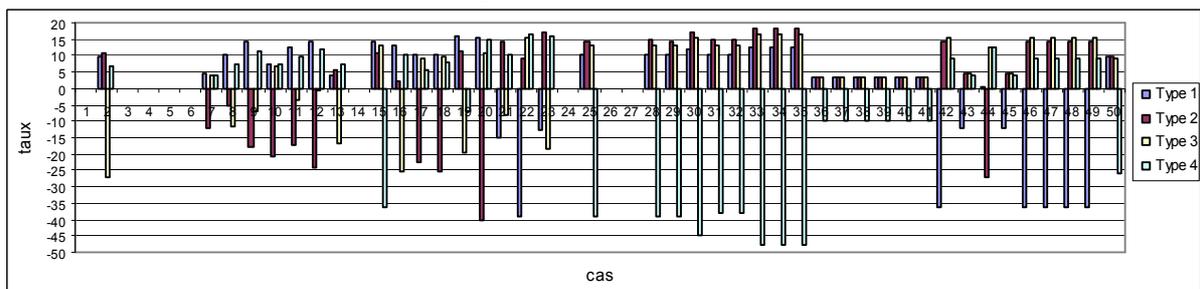


Figure 4. 14 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle SPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20

En résumé (figure 4.15), les moyennes des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces dans la cellule apporté par un pilotage SPT ne dépassent pas 1.4% avec un écart type de l'ordre de 1.1% obtenu dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4. La réduction des temps de séjour par l'ordonnement SPT est obtenue pour les cinq configurations.

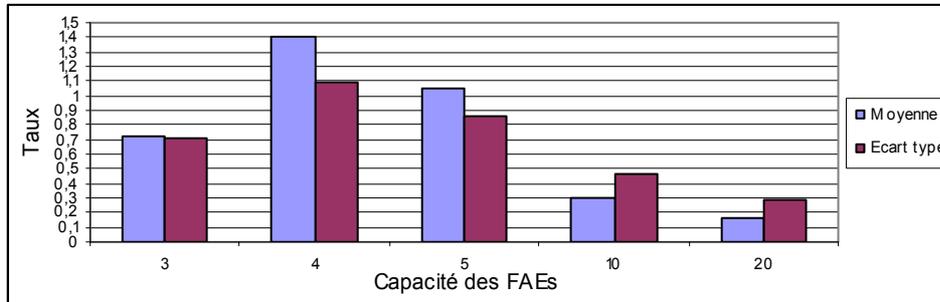


Figure 4.15 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours Moyens des pièces par la règle SPT

4.3.2.2 – Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LPT

Par l'application de la règle LPT, la distribution des taux d'amélioration est concentrée sur la partie supérieure de l'axe des abscisse mais l'amélioration des temps de séjours ne dépasse pas pour chacune des expériences les 15%, 12%, 16% 18% et 11%, pendant que la détérioration atteint les 16%, 23%, 38%, 47% et 13% (dans l'ordre des figures 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 et 4.20).

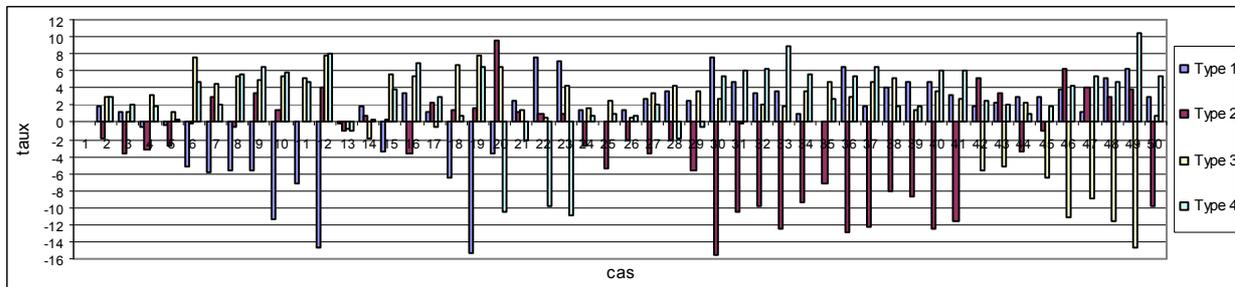


Figure 4.16 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3

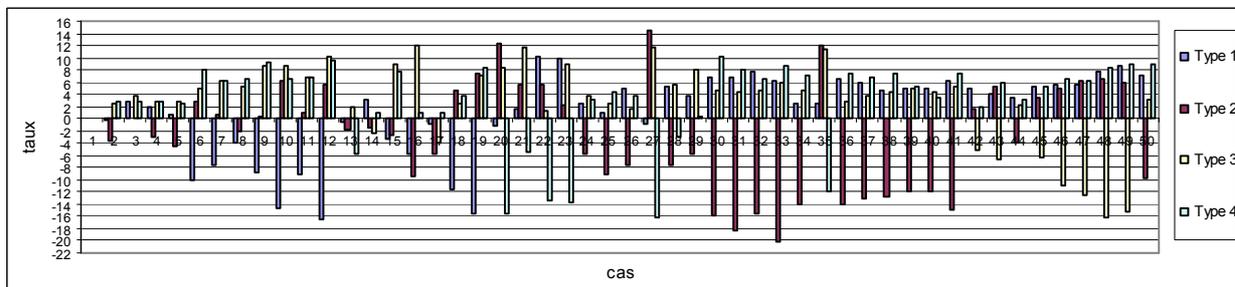


Figure 4.17 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4

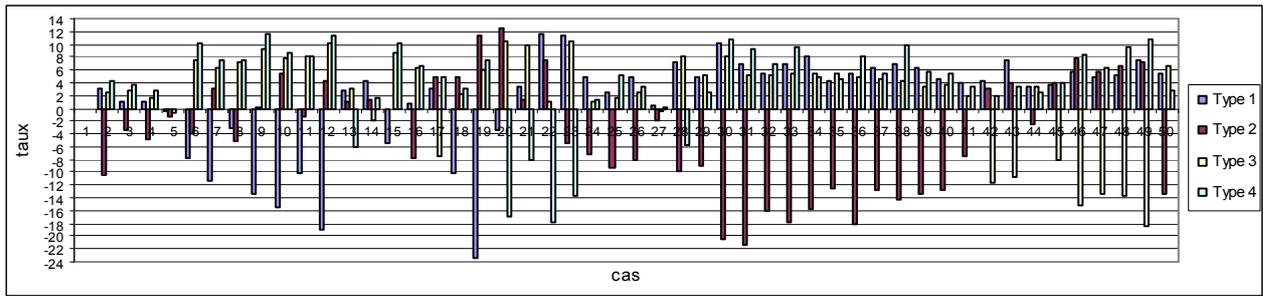


Figure 4.18 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5

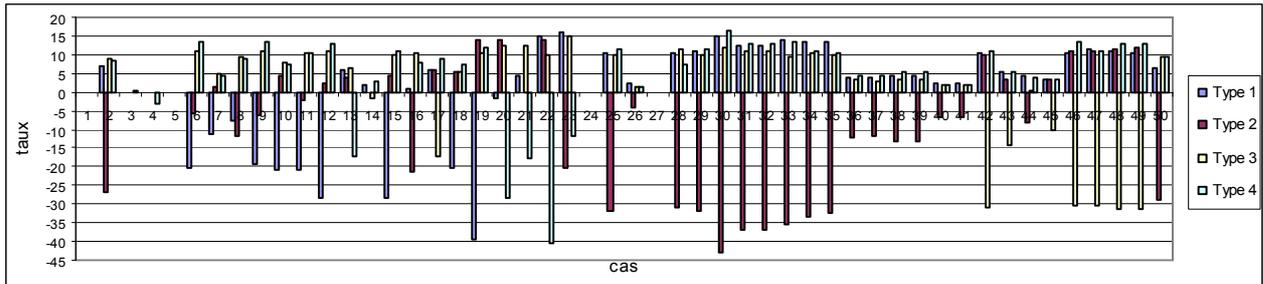


Figure 4.19 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10

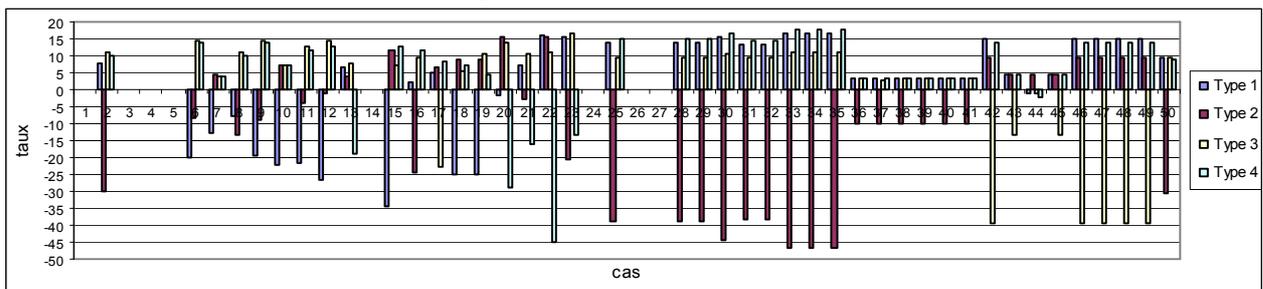


Figure 4.20 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20

En résumé (figure 4.21), les taux d'amélioration par la règle LPT ne dépassent pas 1.1% avec des écart type de l'ordre de 1.1%. La réduction des temps de séjour dans le cas d'ordonnancement LPT est obtenue dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4, 5 et 3 dans un ordre décroissant.

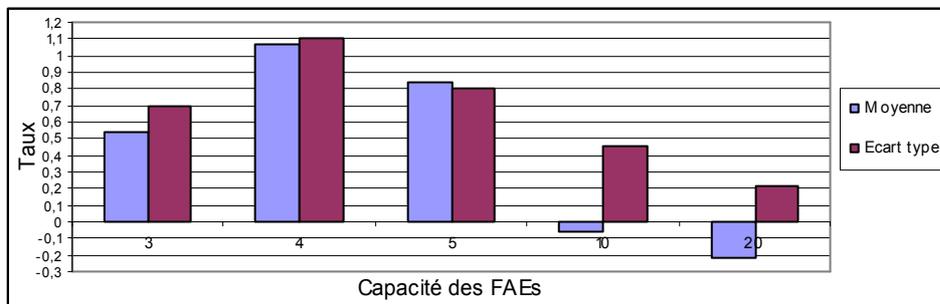


Figure 4.21 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LPT

4.3.2.3 – Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR1

La distribution est plus dense vers le haut (figures 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 et 4.26), mais les taux sont plus importants vers le bas de l'axe des abscisses. Les taux d'amélioration des temps de séjours des pièces dans la cellule par la règle LWKR1 ne sont pas très importants, ils varient de 11 à 20 % alors que la détérioration atteint les 48%.

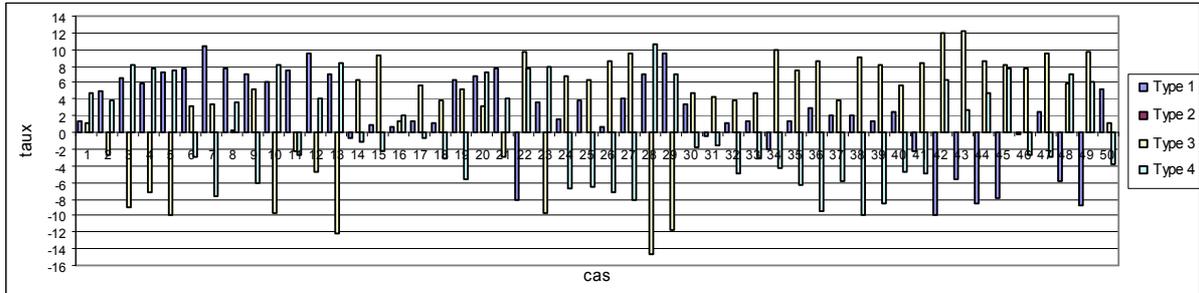


Figure 4.22 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3

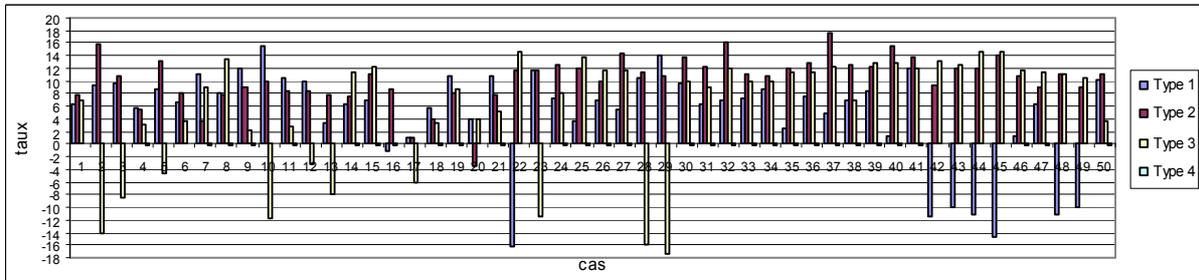


Figure 4.23 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4

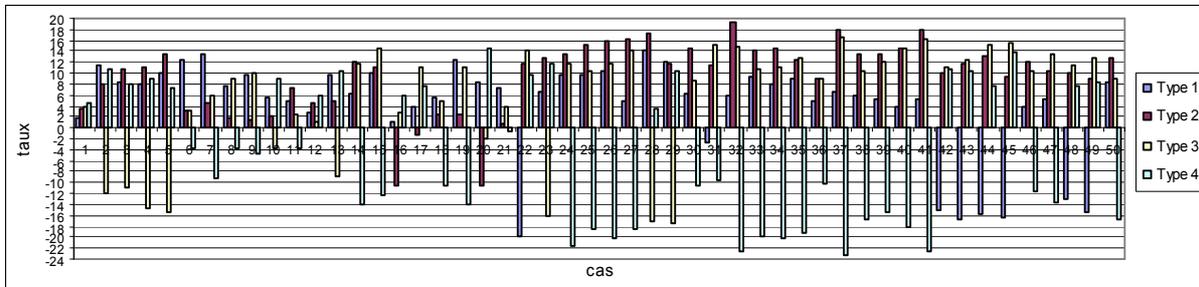


Figure 4.24 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5

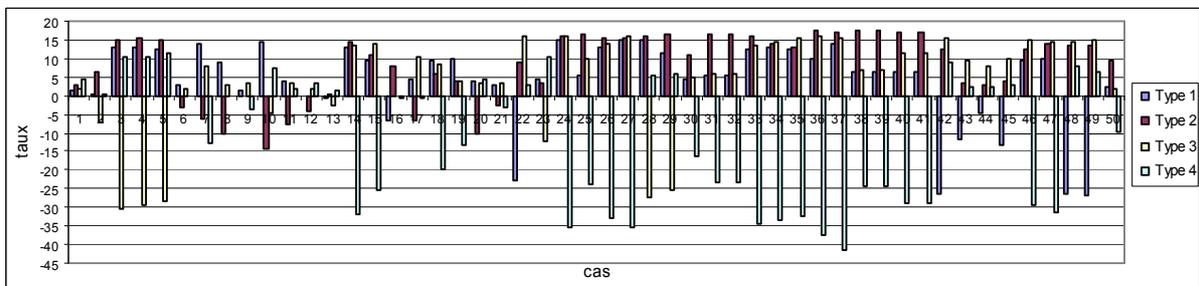


Figure 4.25 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10

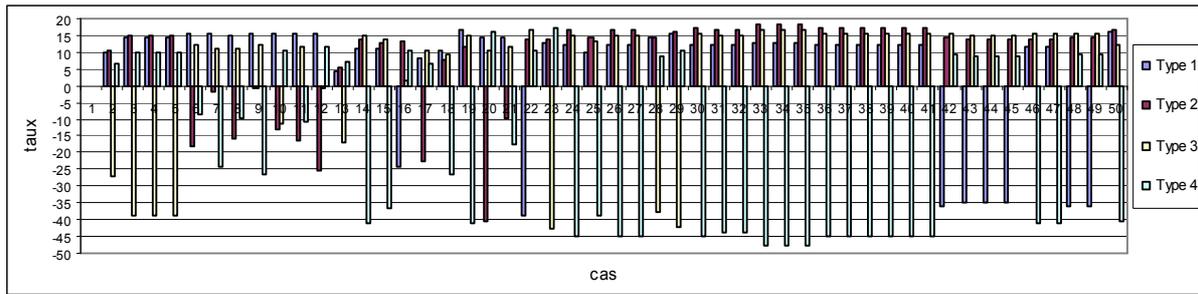


Figure 4.26 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR1 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20

En résumé (figure 4.27), les moyennes des taux d'amélioration par la règle LWKR atteignent 5.25% avec un écart type de l'ordre de 2.5% (dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4). Par cette règle, les temps de séjours moyens des pièces sont réduits pour les cinq cas.

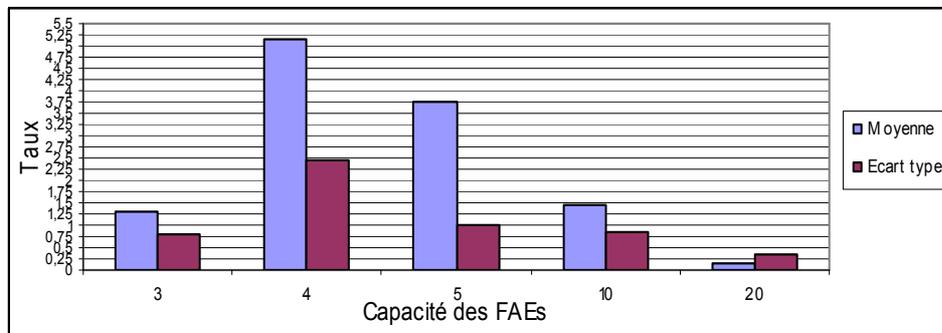


Figure 4.27 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR1 par rapport à la capacité des FAEs

4.3.2.4 – Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle LWKR2

Dans le cas d'un pilotage LWKR2, les taux d'amélioration sont négligeables, ils ne dépassent pas les 4%. La distribution de ces taux est plus importantes vers le bas de l'axe des abscisses pour les quatre premières expérience (figures 4.28, 4.29, 4.30 et 4.31) ainsi il est beaucoup plus question de dégradation de performance (c'est-à-dire augmentation des temps de séjour). Pour la dernière expérience, il est question d'une performance stable c'est-à-dire aucune amélioration ou détérioration n'est obtenue (figure 4.32).

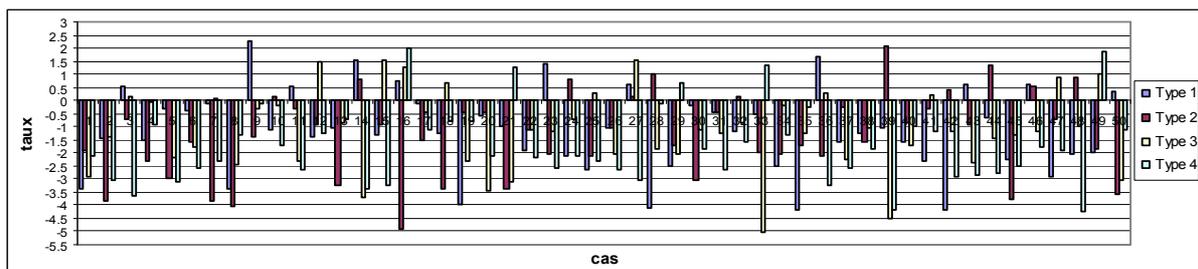


Figure 4.28 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3

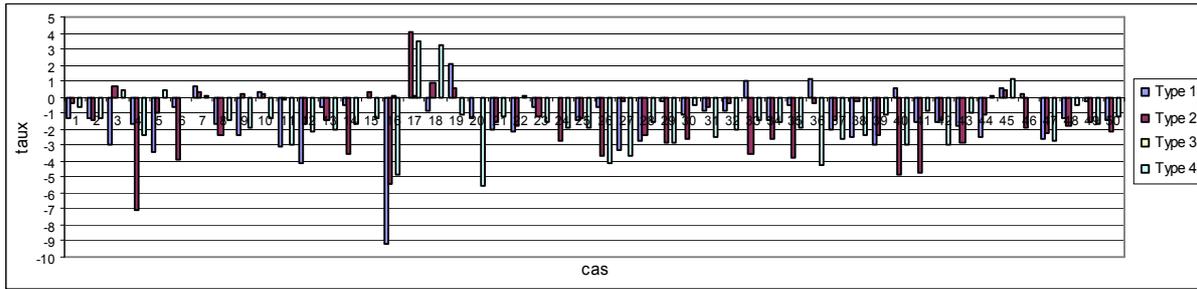


Figure 4.29 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4

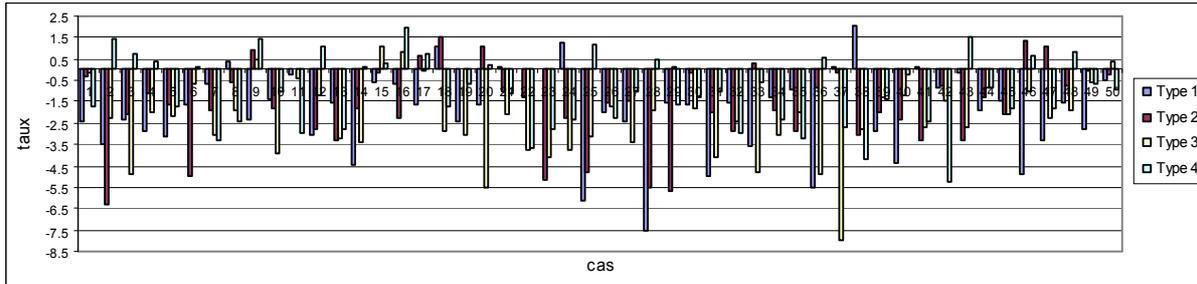


Figure 4.30 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5

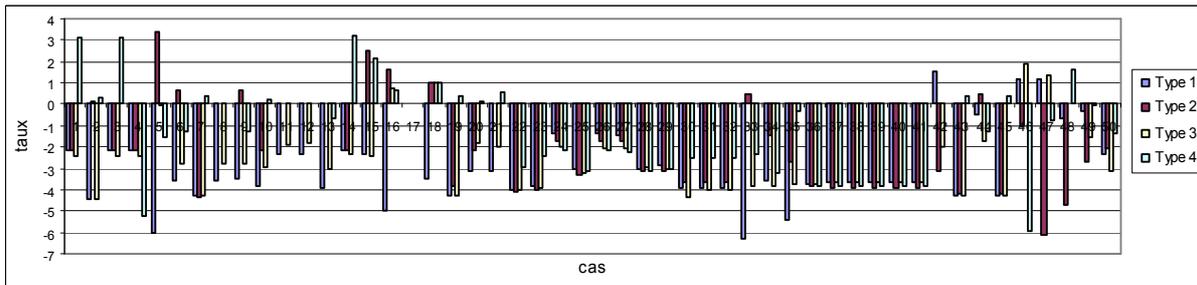


Figure 4.31 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10

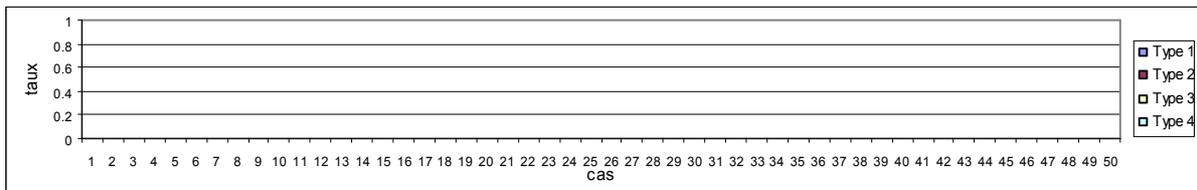


Figure 4.32 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20

Dans le cas d'ordonnancement par la règle LWKR2 (figure 4.33), il est question de détérioration plutôt que d'amélioration (les temps de séjour des pièces sont plus grands) sauf pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20, la réduction des temps de séjour des pièces dans la cellule est nulle (cas de performance stable).

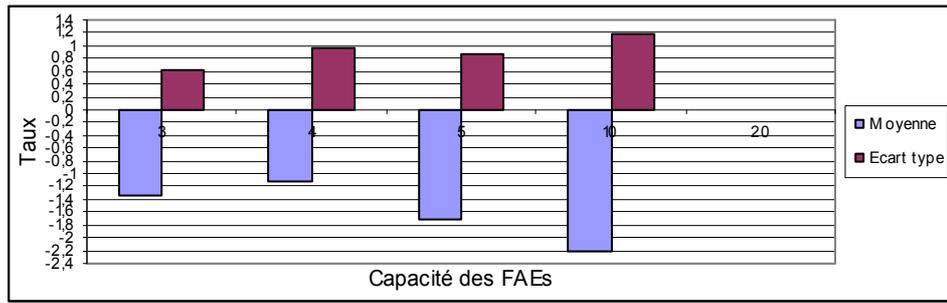


Figure 4.33 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces par la règle LWKR2

4.3.2.5 – Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR1

Par l'application de la règle MWKR1 dans les trois premières expériences (figures 4.34, 4.35 et 4.36), la distribution des taux est plus dense dans la partie inférieure des axes des abscisses des graphes, ce qui implique une dégradation de performance qui peut atteindre 21% alors que les cas améliorés sont beaucoup moins importants ainsi que leurs taux d'amélioration (pas plus de 9%).

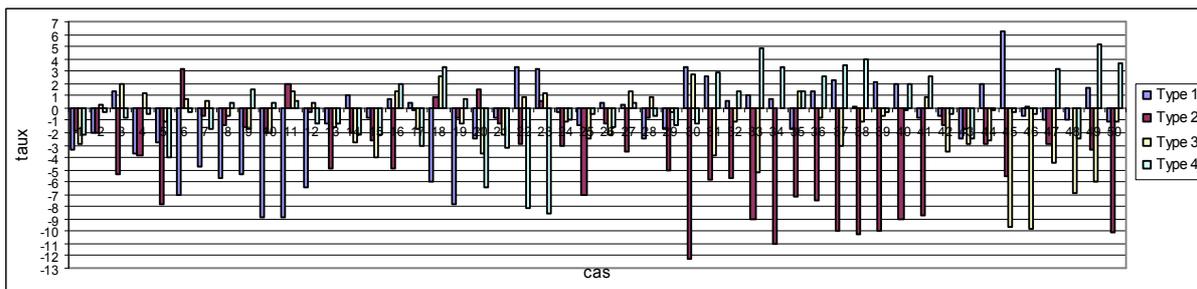


Figure 4.34 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 3

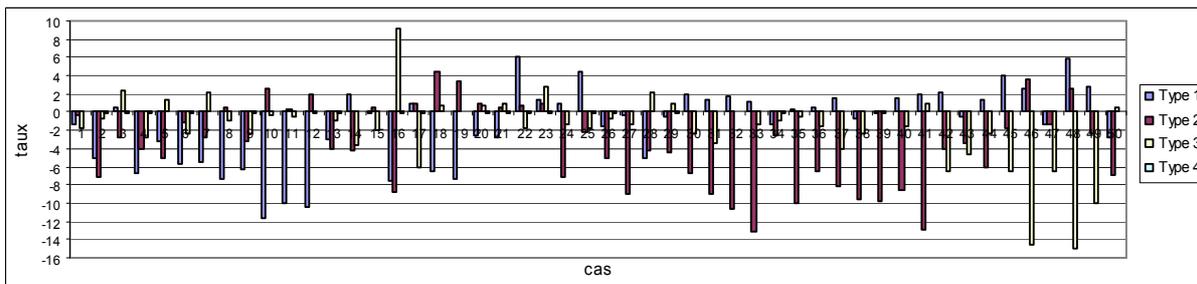


Figure 4.35 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 4

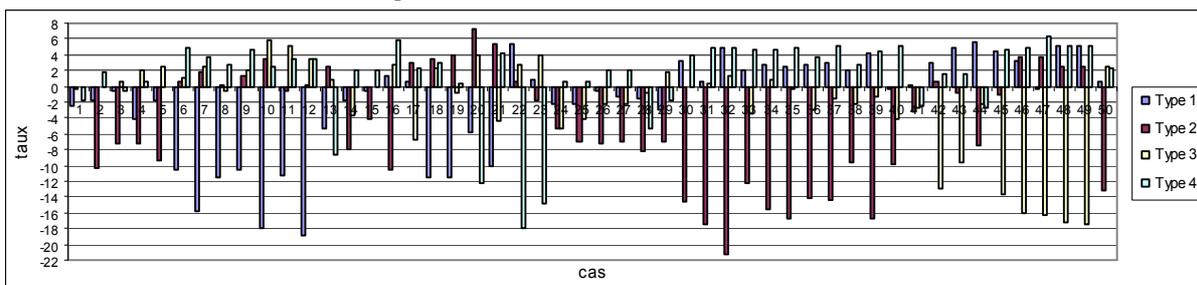


Figure 4.36 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 5

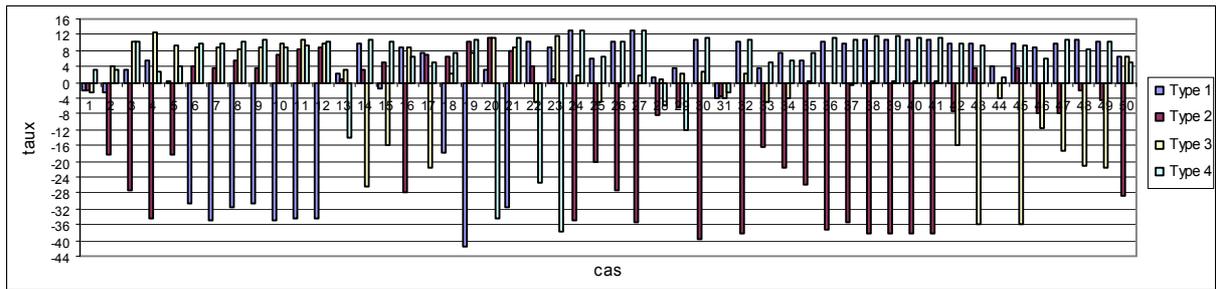


Figure 4.37 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 10

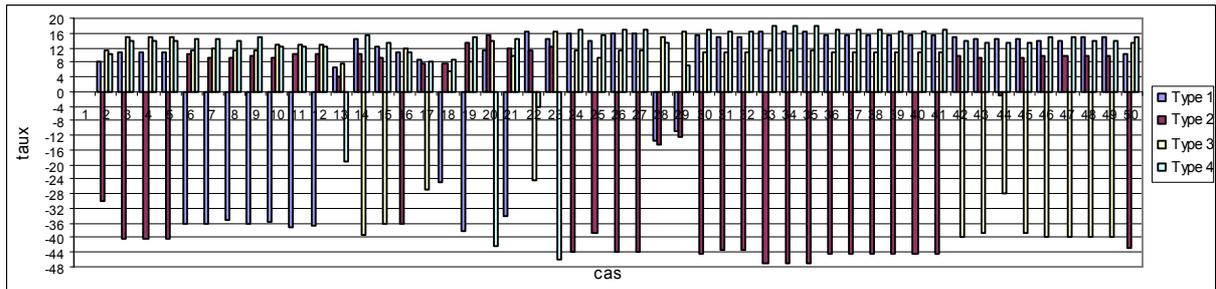


Figure 4.38 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR1 pour les cas dont la capacité des files d'attente d'entrée est de 20

Dans les deux dernières expériences (figures 4.37 et 4.38), la partie supérieure des graphes est plus dense mais toujours moins importante en valeur. Les taux d'amélioration atteignent selon l'ordre des figures 4.37 et 4.38 les 14% et 16 % alors que les taux détérioration atteignent 41% et 47%.

Sous un pilotage MWKR1 (figure 4.39), les temps de séjour moyens sont réduits pour aucun des cinq cas. Il est question de détérioration, les temps d'assemblage des pièces sont plus grands.

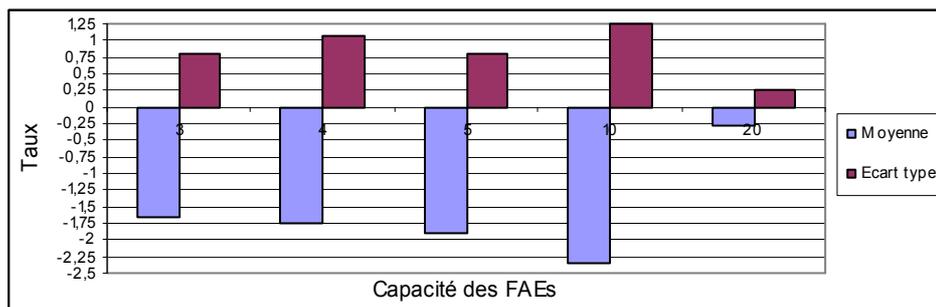


Figure 4.39 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR1

4.3.2.6 – Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR2

Selon les figures 4.40, 4.41 4.42 et 4.43, les taux d'amélioration des temps de séjours des pièces dans la cellule sous un pilotage MWKR2 ne dépassent pas les 11%. La distribution est plus concentrée dans la partie supérieure de l'axe des abscisses. Ces taux sont nuls dans la dernière expérience (figure 4.44).

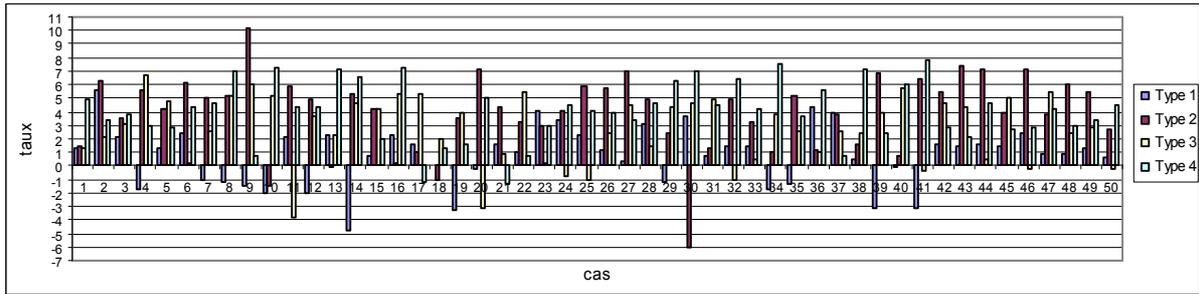


Figure 4.40 : Taux d'amélioration des temps de séjours des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 3

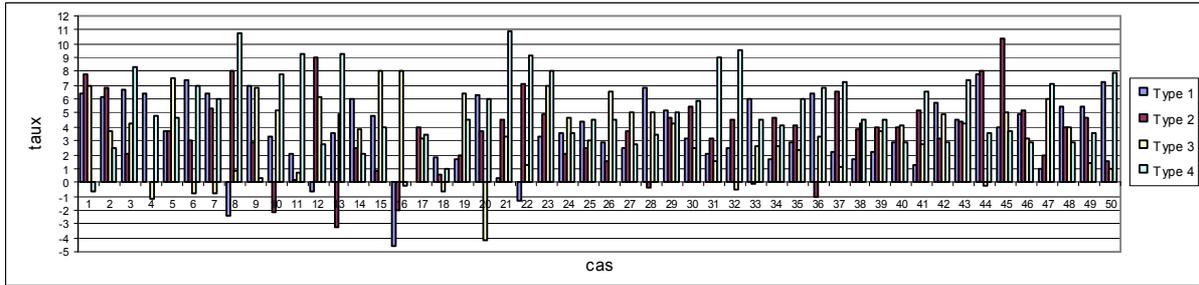


Figure 4.41 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4

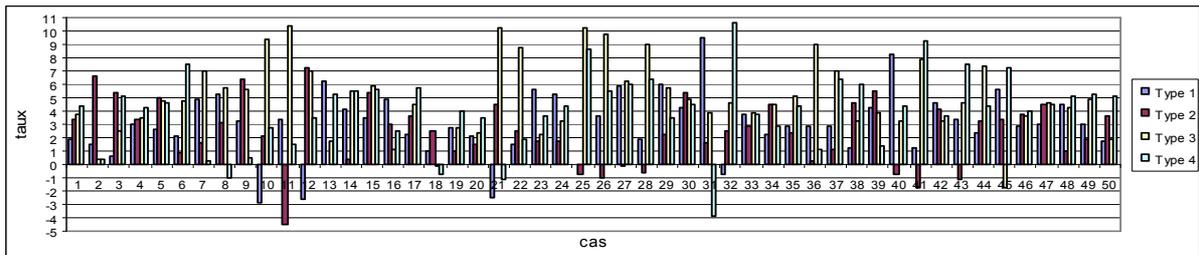


Figure 4.42 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 5

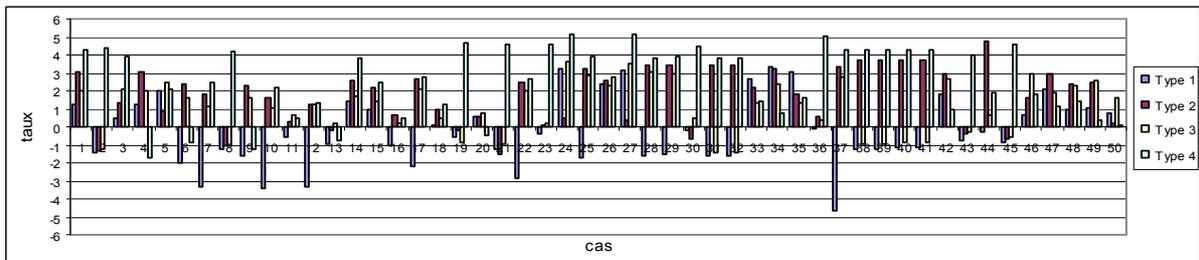


Figure 4.43 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 10

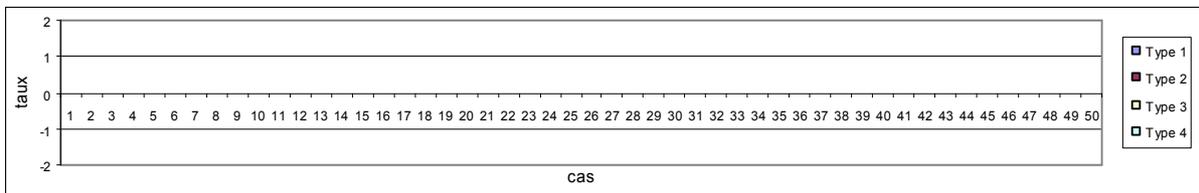


Figure 4.44 : Taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces la règle MWKR2 pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20

En résumé (figure 4.45), les moyennes des taux d'amélioration des temps moyens de séjours des pièces dans la cellule par la règle MWKR2 sont positifs. Elles ne dépassent pas

4% avec des écart types de l'ordre de 1% excepté pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20 (moyenne nulle).

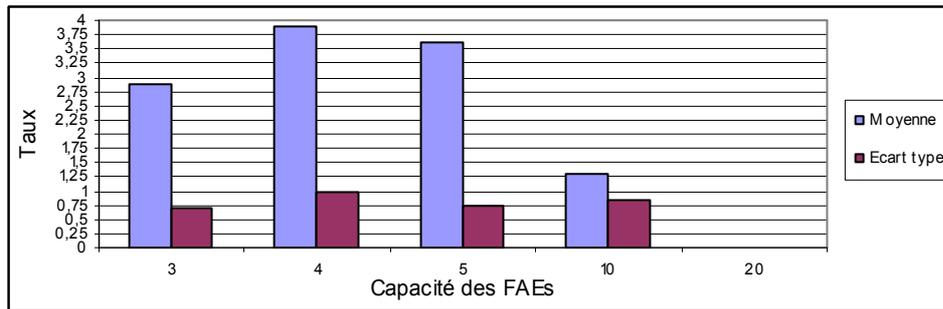


Figure 4.45 : Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces par la règle MWKR2

La figure 4.46 résume les moyennes taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces dans la cellule pour chacune des expériences suivant les règles d'ordonnancement utilisées. Les temps de séjours des pièces sont réduits par des ordonnancements LWKR1, MWKR2 et SPT pour les cas des quatre premières expériences mais ils ne dépassent pas 5.2% avec un écart type de l'ordre de 2.5%. Les meilleurs taux de réduction des temps de séjours sont obtenus par la configuration dont la capacité des FAEs est de 4 sous des pilotages LPT, SPT, MWKR2 et la LWKR1 (dans un ordre croissant), suivi de la configuration dont la capacité des FAEs est de 5. Les plus mauvaises performances sont obtenues dans les cas ordonnancés par les règles LWKR2 et la MWKR1.

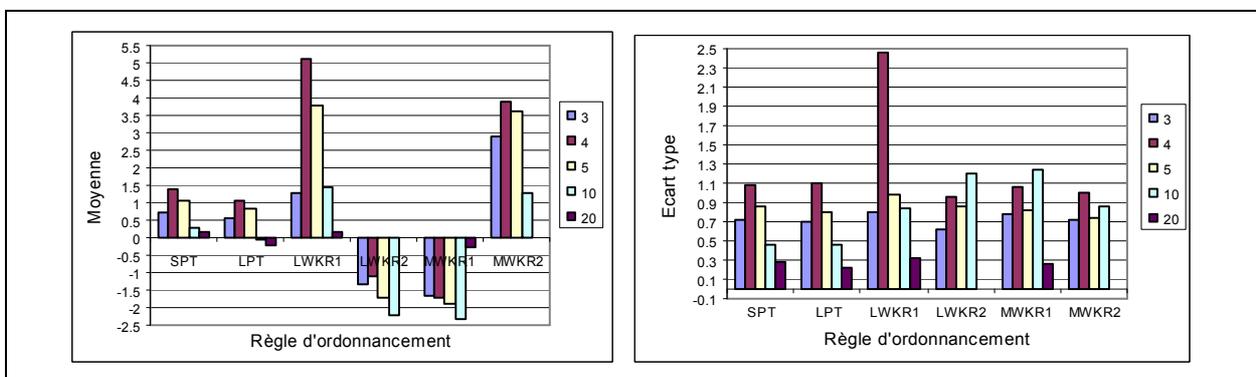


Figure 4.46 : Moyennes et écart type des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces dans la cellule par les règles d'ordonnancement (pour les quatre types de pièces confondus)

Les temps de séjours des pièces dans la cellule, sont réduits par des ordonnancements LWKR1 et MWKR2 dans les quatre premières expériences mais ils ne dépassent pas une moyenne de 5.2% avec un écart type de l'ordre de 2.5%. Mais par l'effet des interactions entre les pièces circulantes en même temps (dépendances de l'exécution de l'assemblage d'une pièce de celui des autres pièces circulantes sur les autres palettes), ces temps gagnés sur certaines pièces sont vite absorbés par les retards acquis par d'autres. Alors que par l'application des règles LWKR2 et MWKR1, il est question de détérioration plutôt que

d'amélioration sauf pour les cas dont la capacité des FAEs est de 20, la réduction des temps de séjour des pièces dans la cellule est nulle.

4.3.2.7 – Etude de la phase de démarrage

Les taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces dans la cellule, sont plutôt positifs comparés aux taux d'amélioration des temps de séjours d'une commande, voir contradictoire, mais ceci s'explique en étudiant les taux d'amélioration des temps de séjours des premières pièces sortantes de la cellule tel que c'est porté sur la figure 4.47. Les taux d'amélioration sont plus importants, ils atteignent les 45% avec des écarts type de l'ordre de 14%. C'est ce temps gagné au départ des opérations d'assemblage qui est vite absorbé par la suite (par les retards acquis plus tard).

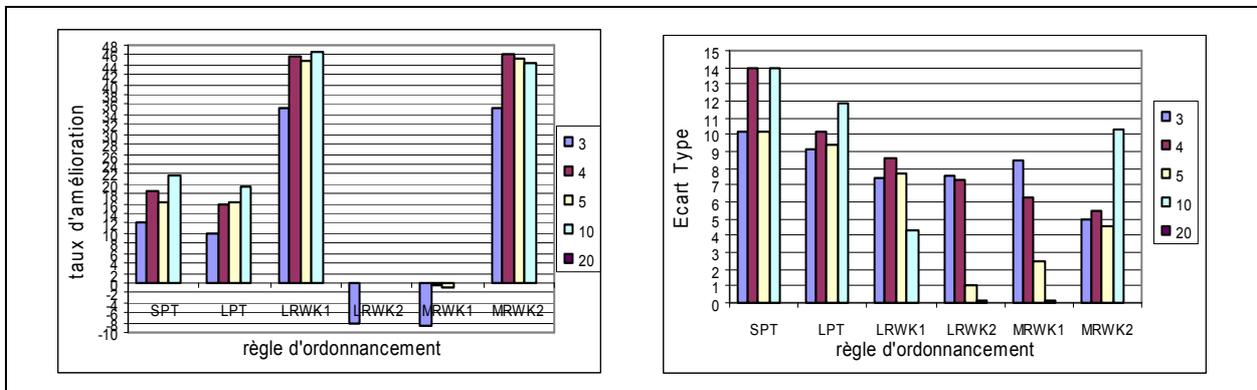


Figure 4.47 : Moyenne et écart type des taux d'amélioration des temps de séjours des premières pièces sorties de la cellule

✚ Nous clôturons cette première phase d'analyse des temps de séjours des pièces dans la cellule par l'analyse de la période de transition (ou démarrage). La figure 4.48 représente la moyenne des taux d'amélioration des temps de séjours des pièces d'abord des premières sorties, par la suite, les dernières sorties et en fin, des temps de séjours moyens. La différence des taux d'amélioration entre la première et la dernière pièce sortie du système est importante (moyennes variantes de $12\% \pm 7\%$ à $34\% \pm 20\%$ contre $0.15\% \pm 0.25\%$). En analysant ces figure (a, b et c), il est clair qu'il y a une correspondance de comportement entre les temps de séjour des premières pièces sorties et les temps de séjour moyens des pièces dans la cellule mais les temps gagnés au début de l'assemblage des pièces sont par la suite perdus.

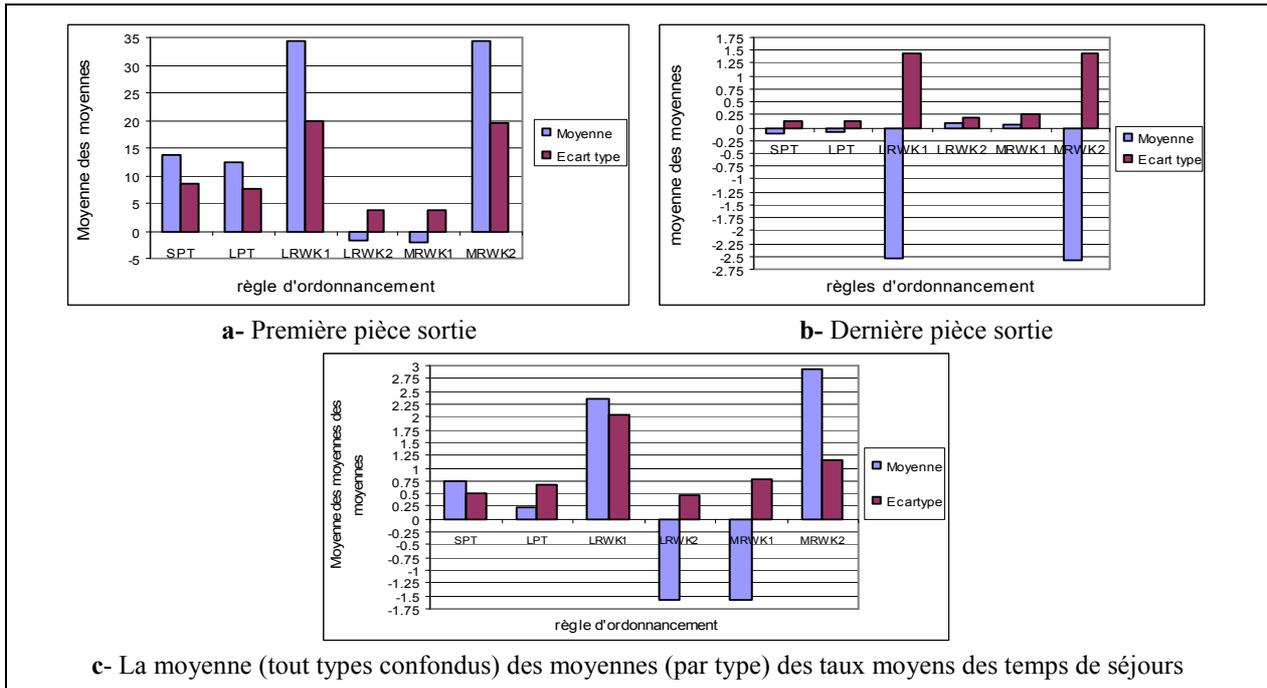


Figure 4.48 : Moyenne des moyennes des taux d'amélioration des temps de séjours des premières et dernières pièces sorties de la cellule

Les temps de séjour moyens des pièces sont directement dépendants des temps d'assemblage réalisés dans la phase de démarrage. Malgré les taux de réduction réalisés dans cette phase (atteignent 34% ±20%), la performance globale reste insuffisante (0.5%±2%). Ainsi la réduction des temps de séjour peut être considérable pour quelques pièces mais l'effet d'interaction entre pièces présentes simultanément dans la cellule fini toujours par l'absorber (retard acquis par les autres soit par renvois répétés sur le convoyeur ou attente prolongé dans les FAEs), provoquant ainsi la détérioration de la performance globale de l'ordonnancement par la règle de priorité.

Comme l'étude des temps de séjour des pièces dans la cellule par des ordonnancements selon des règles de priorité n'a abouti à aucune amélioration régulière et continue, nous avons voulu étudier des paramètres secondaires tels que les temps de transfert et les temps d'attente afin de définir les causes de détérioration de performances, et ainsi les paramètres susceptible de les améliorer et sur lesquels il faudrait se focaliser.

4.3.3 – Analyse des temps de transfert moyen des pièces dans la cellule d'assemblage

4.3.3.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3 (figure 4.49), les taux d'amélioration des temps de transfert des pièces à travers la cellule par les règles d'ordonnancement sont soit nuls (pilotage sous LWKR2) ou insignifiants (type 4 sous pilotage LWKR1). Sous les

pilotages de chacune des règles suivantes, il n'est question que de détérioration de performance pour les quatre types : SPT ($3\% \pm 11.5\%$ pour le type 2), LPT ($4.75\% \pm 13\%$ pour le type 2), LWKR1 ($6.65\% \pm 12\%$ pour le type 2) et la MWKR1 ($3\% \pm 10.5\%$ pour le type 3) et MWKR2 ($4.75\% \pm 15.5\%$ pour le type 2).

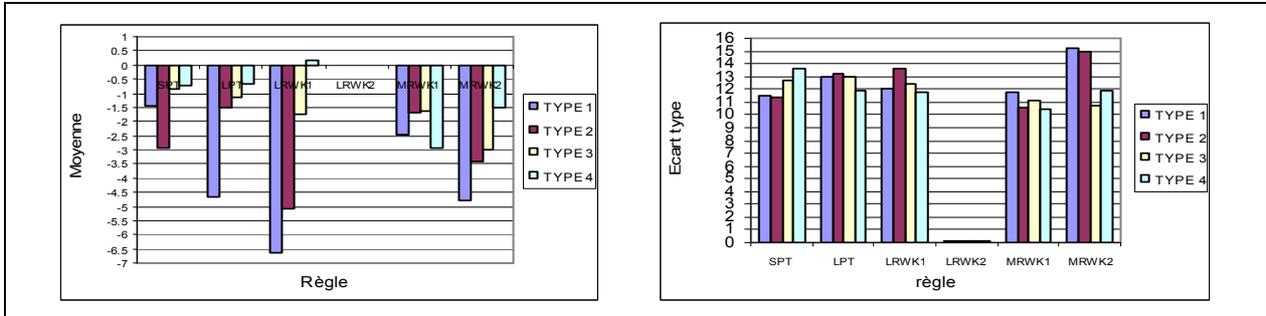


Figure 4.49 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est 3

4.3.3.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4

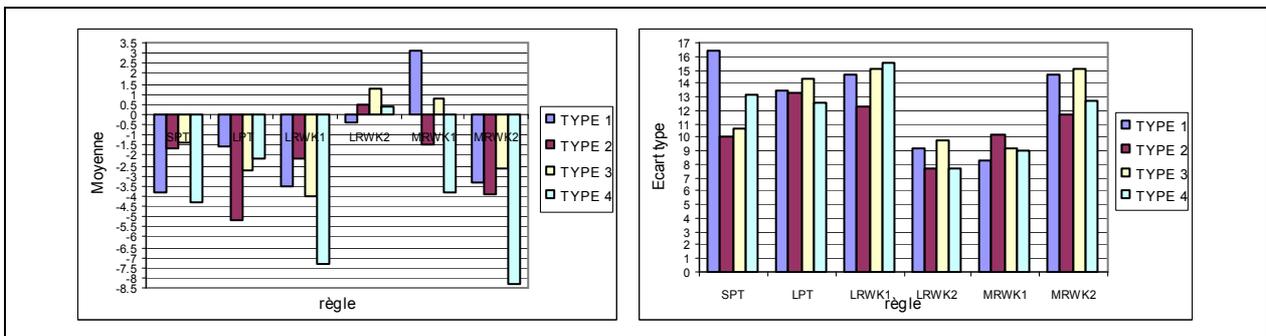


Figure 4.50 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4, la distribution est plus dense vers le bas de l'axe des abscisses. La réduction des temps de transfert n'est obtenue que sous les pilotage LWKR2 et MWKR1. Les moyennes d'amélioration ne dépassent pas les 3.5% avec des écarts type atteignant 10%.

4.3.3.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5

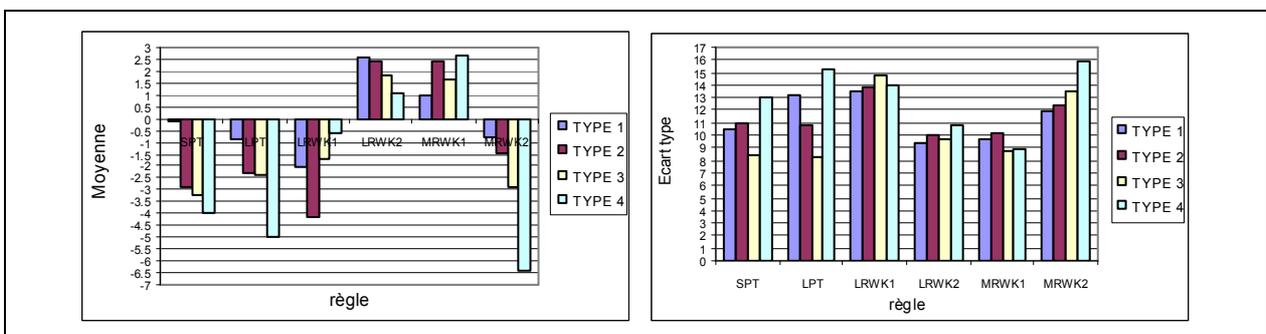


Figure 4.51 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 5

Les taux d'amélioration des temps de transfert des pièces des quatre types, sont améliorés par des pilotages LWKR2 et MWKR1. La moyenne des taux d'amélioration de ces temps ne dépassent pas les 3% avec des écart type atteignant $\pm 11\%$. Les temps de transfert des pièces dans la cellule sont plus lents sous des pilotages SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2. Les moyennes des taux de détérioration varient de 0.1% jusqu'à 6.5% avec des écart type allant de 8.5 jusqu'à 16%.

4.3.3.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10

Conformément à la figure 4.52, les temps de transfert sont améliorés sous des pilotages LWKR2 et MWKR1 pour les quatre types de pièces. Les moyennes des taux de réduction de ces temps varient de 3.8% jusqu'à 5.6% avec des écart type allant de $\pm 6.89\%$ à $\pm 9.8\%$. Sous un pilotage SPT, l'amélioration est insignifiante, la moyenne ne dépasse pas 1.2% avec un écart type de l'ordre de 5.3% pour le type 2 et même pas 0.2% pour le premier type. Pour les ordonnancements sous LPT, LWKR1 et MWKR2, les temps de transfert sont toujours plus lents qu'en FIFO.

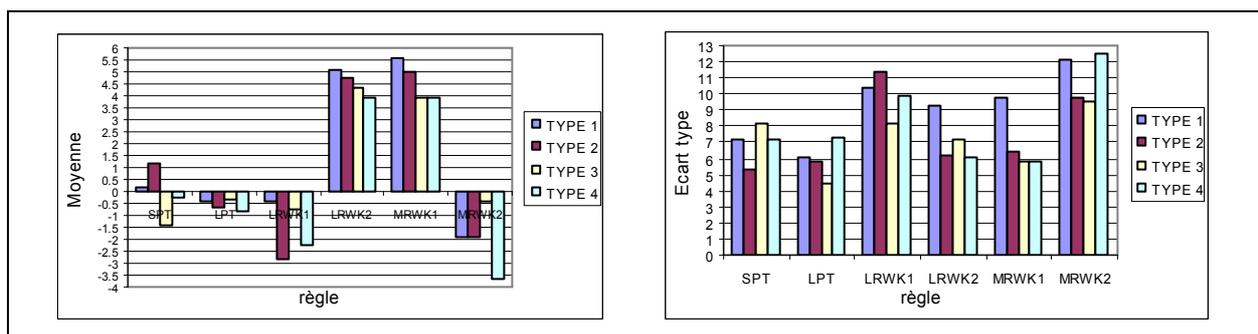


Figure 4.52 : Taux d'amélioration des temps de transfert moyens des pièces par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAEs est de 10

4.3.3.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20

Dans les cas dont la capacité des FAEs dans les stations est de 20, le temps de transfert est le même pour tous les cas à raison d'un seul cycle (un tour) sur le convoyeur, en fait, c'est la conséquence logique d'un comportement Flow Shop.

La figure 53 résume les moyennes d'améliorations des temps de transfert des pièces dans la cellule. Les temps moyen de transfert sont uniquement réduits par les règles LWKR2 et MWKR1 dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4 ($0.5\% \pm 0.7\%$), 5 ($1.5\% \pm 0.75\%$) et 10 (en moyenne de 4.5%). Cependant, cette amélioration ne dépasse pas les 5% avec un écart type de l'ordre de 1%.

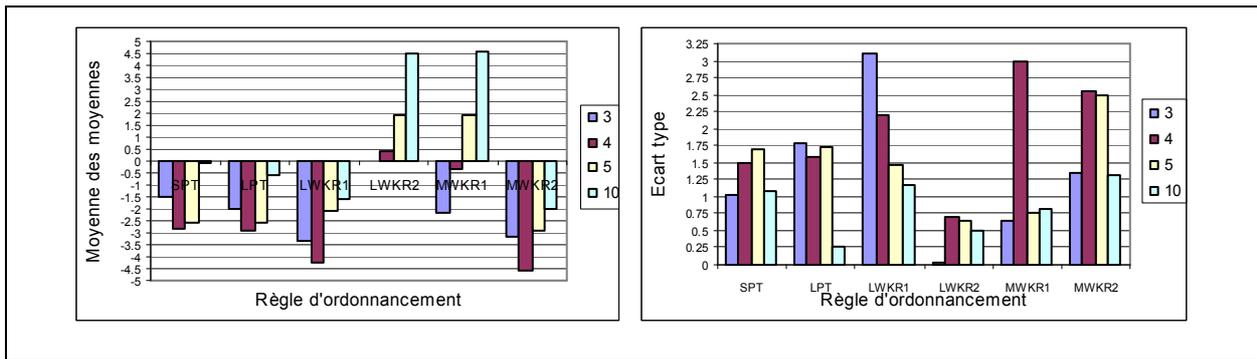


Figure 4.53 : Moyenne des moyennes des taux d'amélioration des temps de transferts moyens

Les taux d'amélioration des temps de transfert (réductions) sont insignifiants. En moyenne ils ne dépassent pas 5% avec un écart type de l'ordre de 1%. Ces réductions sont obtenues par l'application des règles LWKR2 et la MWKR2.

4.3.4 – Analyse du nombre de cycles des pièces dans la cellule

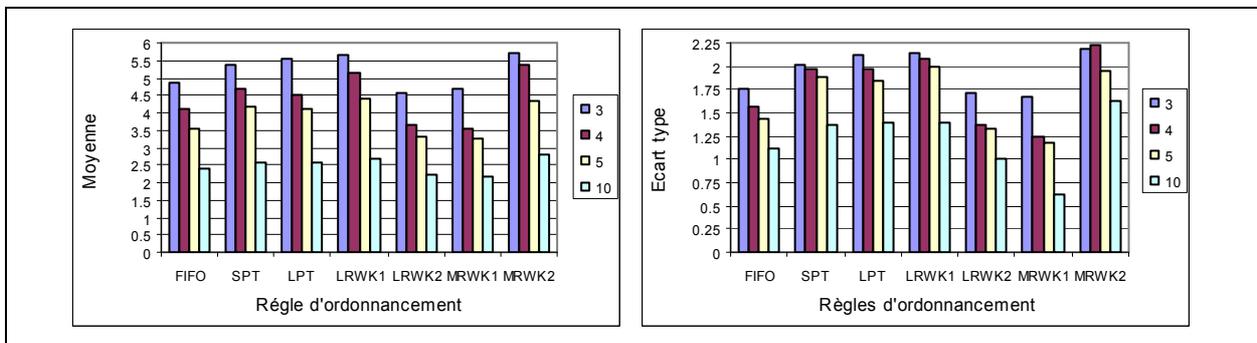


Figure 4.54 : La moyenne du nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule

Conformément à la figure 4.54, pour chacune des règles appliquées, le nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule diminue selon l'accroissement de la capacité des FAEs en forme d'escalier. Le nombre de cycles des pièces dans la cellule n'est réduit que par les règles LWKR2 (pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4, 10 et 3 dans un ordre décroissant) et la MWKR1 (pour les cas dont la capacité des FAEs est de 4, 10 et 5 dans un ordre décroissant). Les taux d'amélioration du nombre des cycle ne dépassent pas 5% avec un écart type de l'ordre de 44% obtenu dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4 (figure 4.55).

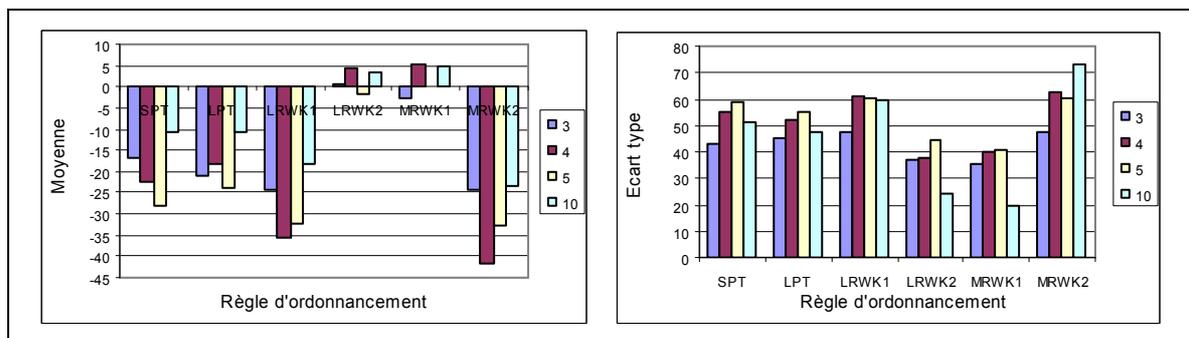


Figure 4.55 : La moyenne des taux d'amélioration du nombre de cycles maximal des pièces dans la cellule

Le nombre maximal de cycles des pièces dans la cellule n'est réduit que par les règles LWKR2 et la MWKR1 mais les taux de réduction ne dépassent pas 5% avec un écart type de l'ordre de 44% principalement obtenu dans les cas dont la capacité des FAE est de 4.

4.3.5 – Analyse des temps d'attente moyens des pièces dans les files d'attente d'entrée

4.3.5.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3

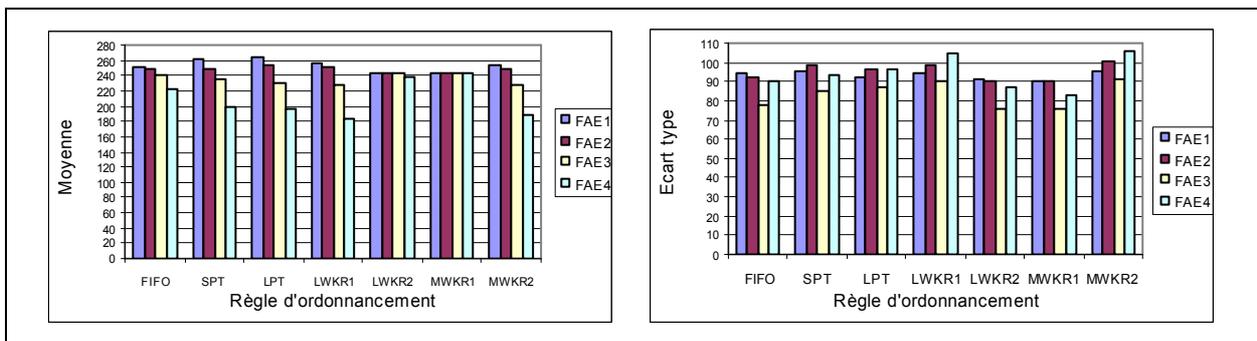


Figure 4.56 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnement dont la capacité est de 3

Dans les sept cas de pilotage (figure 4.56), Les temps d'attente moyens dans les FAEs se décroissent suivant l'ordre de positionnement des FAEs, ils sont plus importants dans la première (FAE1) et moins importants dans la dernière (FAE4). Conformément à la figure 4.57, les temps d'attentes des pièces sont réduits par les règles SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2 dans les files d'attente FAE3 (de 3.1 à 5.9%) et FAE4 (de 10.4 à 17.5%). Les règles LWKR2 et MWKR1 n'apportent presque aucune amélioration des temps d'attente dans les FAEs (même pas 3%).

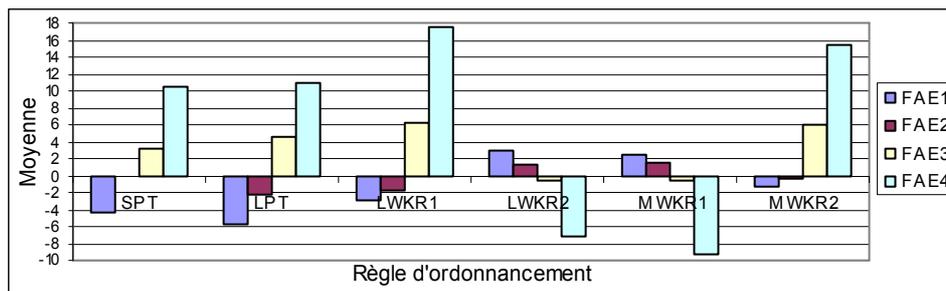


Figure 4.57 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnement

4.3.5.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4

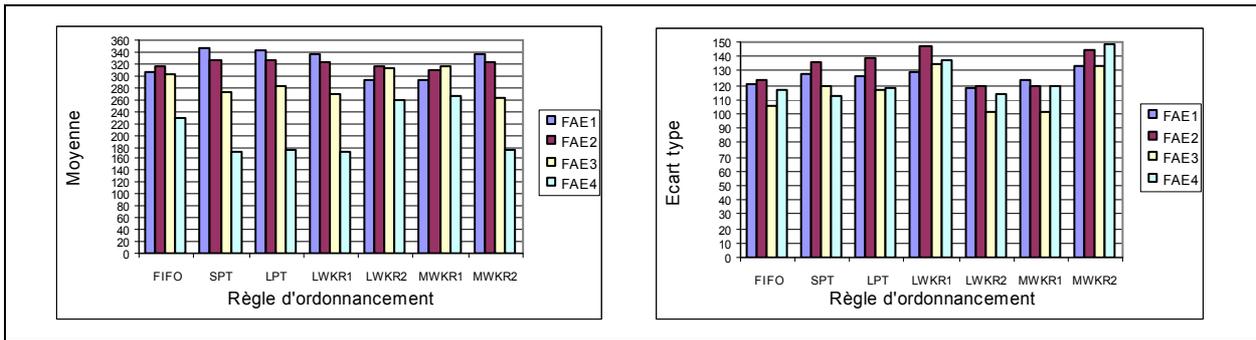


Figure 4.58 : Moyenne des taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnement dont la capacité est de 4

Sous les pilotages SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2, les temps d'attentes moyens dans les FAEs sont réduits principalement dans la FAE3 et la FAE4 (Figure 4.58). Ces réductions varient de 7.2 à 13.1% dans le FAE3 et de 24.2 à 26% dans la FAE4 (figure 4.59). Dans les cas d'ordonnement LWKR2 et MWKR1, la réduction de ces temps est obtenue dans les FAE1 et FAE2, mais elle ne dépasse pas les 5% ce qui reste insuffisant devant les retard acquis dans les deux autres FAEs atteignant les 16% (Figure 4.59).

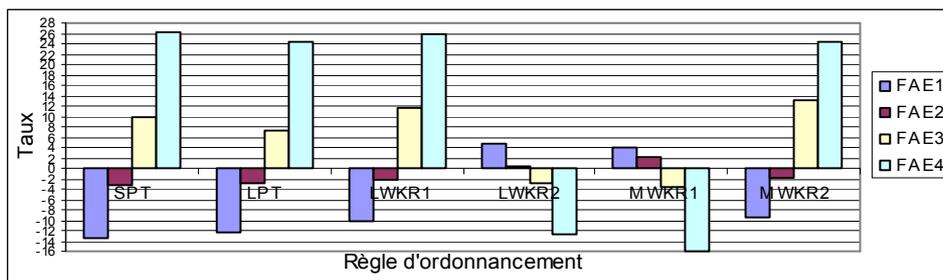


Figure 4.59 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnement

4.3.5.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5

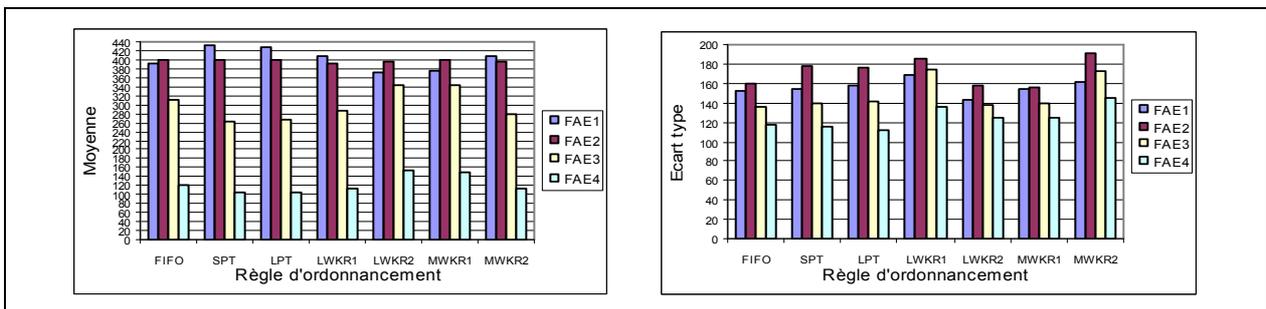


Figure 4.60 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnement dont la capacité est de 5

Les pilotages sous les règles SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2 réduisent les temps d'attente des pièces dans les FAE2, FAE3 et FAE4 (figure 4.60). Conformément à la figure 4.59, cette réduction est plus importante des la FAE3 (de 7.9 à 14.9%) et la FAE4 (de 7.9 à 14.7%). Cependant, sous des pilotages LWKR2 et MWKR1, les temps d'attente sont plus

importants, ils varient de 10% à 26% (figure 4.61)) alors que leurs réduction ne dépasse pas 6%.

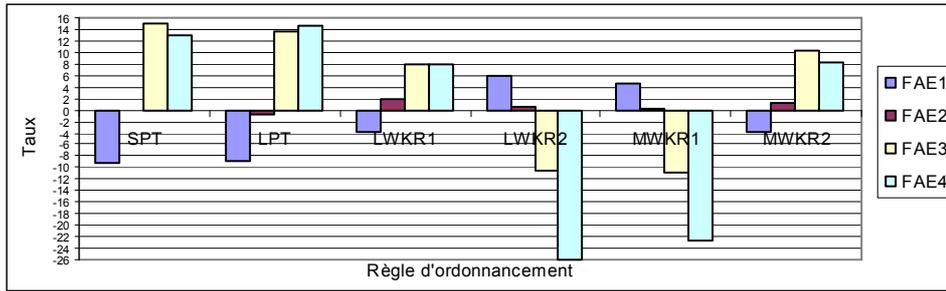


Figure 4.61 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAE dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnement

4.3.5.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10

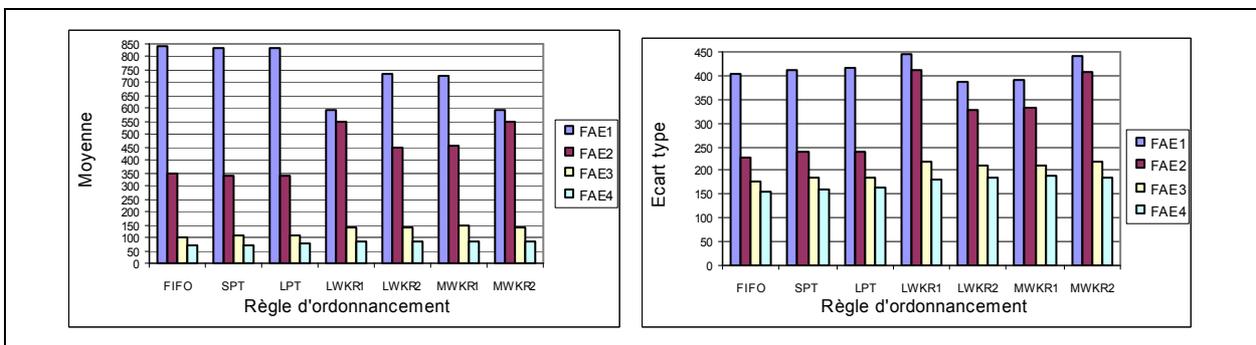


Figure 4.62 : Moyenne des temps d'attente moyens des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnement dont la capacité est de 10

Conformément à la figure 4.62, les temps d'attente sont plus importants dans les FAEs des deux premières stations : FAB1 (de 600 à 850 unités de temps) et FAB2 (de 350 à 550 unités de temps) alors que pour la FAB3, les temps d'attente ne dépasse pas les 150 unités de temps et même pas 100 unités de temps dans le cas de la FAB4. Les taux de détérioration des temps d'attente dans les FAEs des stations sont beaucoup plus importants que les taux d'amélioration (figure 4.63). Ils atteignent les 60% alors que la réduction de ces temps ne dépasse pas les 30% c'est-à-dire le double (la FAB1 sous des pilotages LWKR1 et MRWKR2).

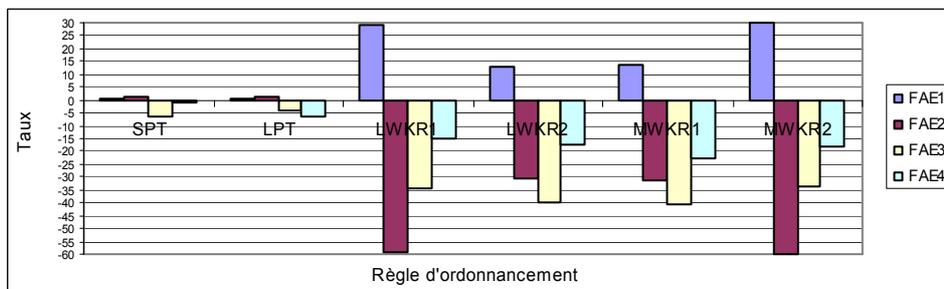


Figure 4.63 : Taux d'amélioration (en moyenne) des temps d'attente moyens des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnement dont la capacité est de 10

4.3.5.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20

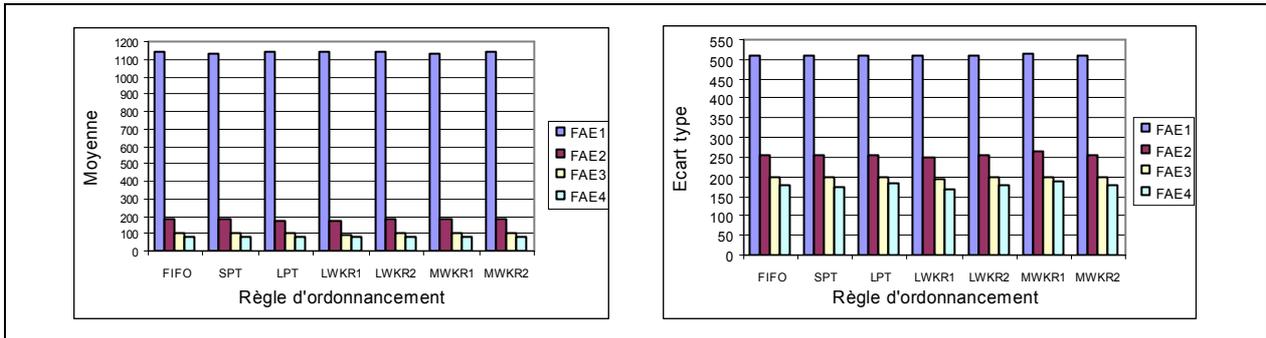


Figure 4.64 : Moyenne des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 20

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 20 (figure 4.64), les temps d'attente dans les FAEs sont plus importants dans la FAE de la première station (presque 6 fois le temps d'attente dans la FAE2 et 12 fois le temps d'attente dans les FAE3 et FAE4). Les taux d'amélioration des temps d'attente dans les FAEs ne dépassent pas les 5% (figure 4.65) voir nuls ou inexistant dans certains cas (application des règles LWKR2). La réduction des temps d'attente est obtenue par l'application des règles LWKR1 et la SPT. Les plus mauvaise performance est obtenue par l'application de la règle MWKR1.

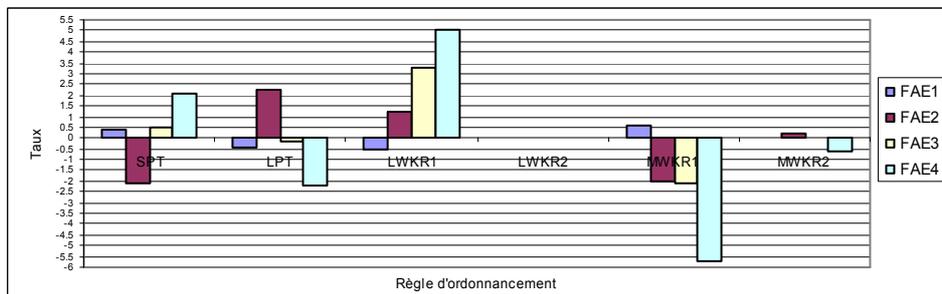


Figure 4.65 : Taux d'amélioration des temps d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement dont la capacité est de 20

En résumé, La figure 4.64 représente les moyennes des taux d'amélioration des temps d'attente dans les FAEs pour chacune des configurations étudiées suivant la capacité des FAEs. Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3, 4 et 5, la moyennes des taux d'amélioration des ces temps par les ordonnancements SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2 ne dépassent pas les 7% avec un écart type de l'ordre de 17%. Les cas de dégradation de performance sont donnés par les ordonnancements LWKR2 et MWKR1.

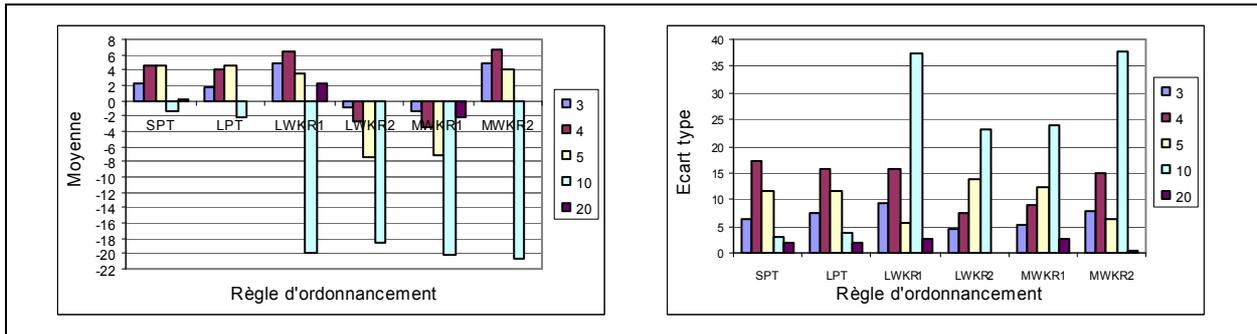


Figure 4.66 : Moyenne des taux d'amélioration des temps moyens d'attente des pièces dans les FAEs par les règles d'ordonnancement

La réduction des temps d'attente dans les FAEs est réalisée par des ordonnancements SPT, LPT, LWKR1 et la MWKR mais ne dépassent pas 7% avec un écart type de 16%. Dans les cas extrêmes, dont la capacité des FAEs est de 10 et 20, ces temps s'accroissent et atteignent une moyenne de 21% ±37%.

4.3.6 – Nombre moyen des pièces en attente dans les files d'attente d'entrée des stations

4.3.6.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3

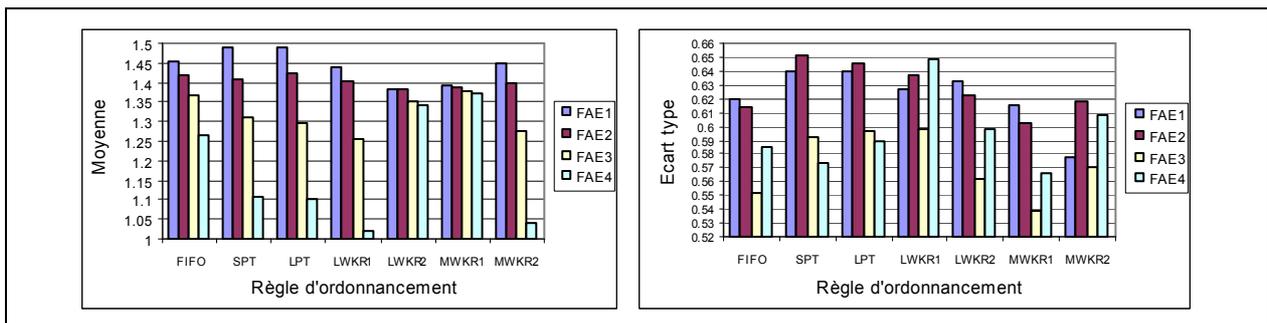


Figure 4.67 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnancement

Conformément à la figure 4.67, le nombre des pièces en attente décroît suivant l'ordre de positionnement des FAEs dans la cellule, il est plus important dans la FAE1 et moins dans la FAE4. Le nombre de pièces en attente est réduit sous des pilotages SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2, la réduction peut atteindre 8.3% dans la FAE3 et 19.2% dans la FAE4 (figure 4.68).

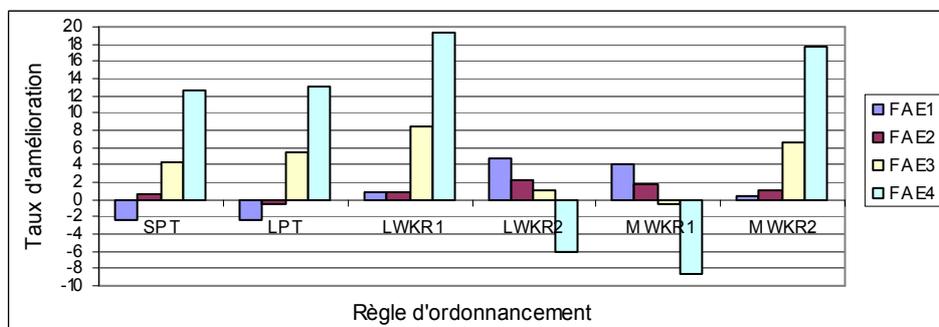


Figure 4.68 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 3 par les règles d'ordonnancement

4.3.6.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4

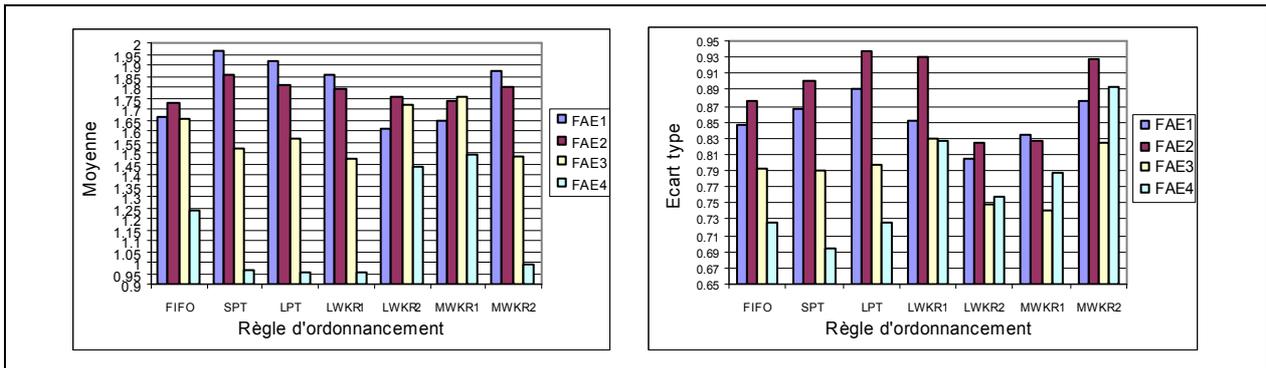


Figure 4.69 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnement

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 4, le nombre de pièces en attente dans la FAE1 et la FAE2 est plus important pour tous les ordonnancements appliqués comparés au FIFO (figure 4.69). Sous des pilotages SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2, ce nombre est réduit en moyenne de 5.4% à 10.6% dans la FAE3 et de 20% à 23% dans FAE4 (figure 4.70).

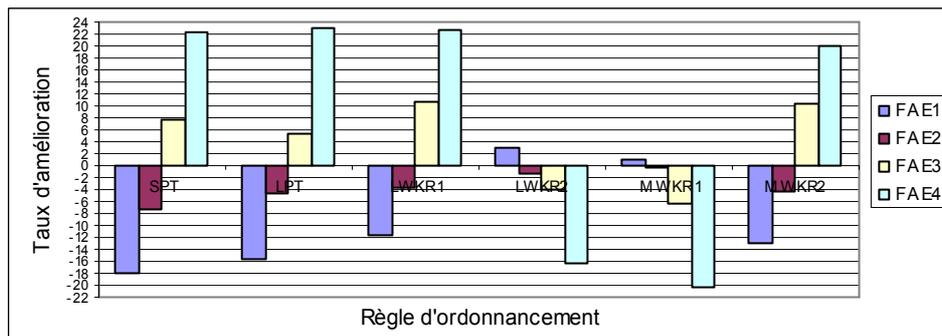


Figure 4.70 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 4 par les règles d'ordonnement

4.3.6.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5

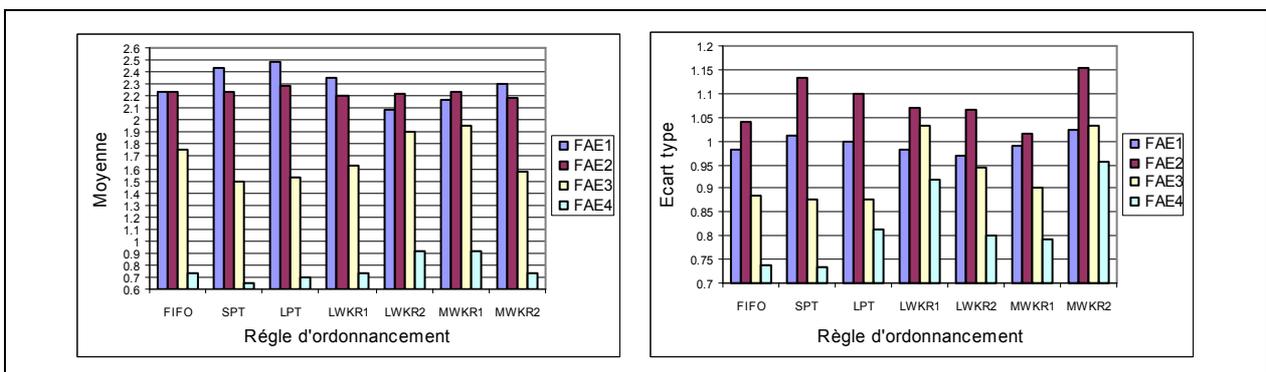


Figure 4.71 : Moyenne des nombres moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnement

Conformément à la figure 4.71, les moyennes du nombre de pièces en attente dans les FAEs sont plus importantes dans les FAE1 et FAE2. Dans les cas des ordonnancements SPT, LPT LWKR1 et MWKR2, la réduction du nombre de pièces en attente est souvent obtenue

dans la FAE3 et FAE4 avec des taux de réduction de l'ordre de 15% ±1.15%. Les cas de mauvaise performance sont obtenus par l'application des règles LWKR2 et MWKR1.

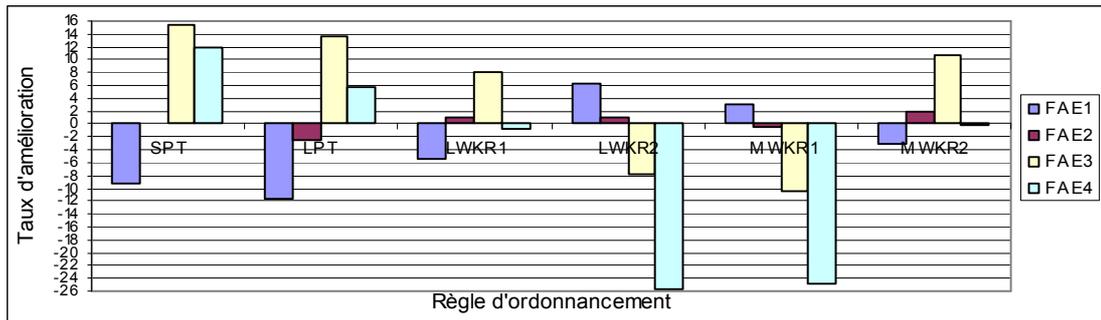


Figure 4.72 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 5 par les règles d'ordonnement

4.3.6.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10

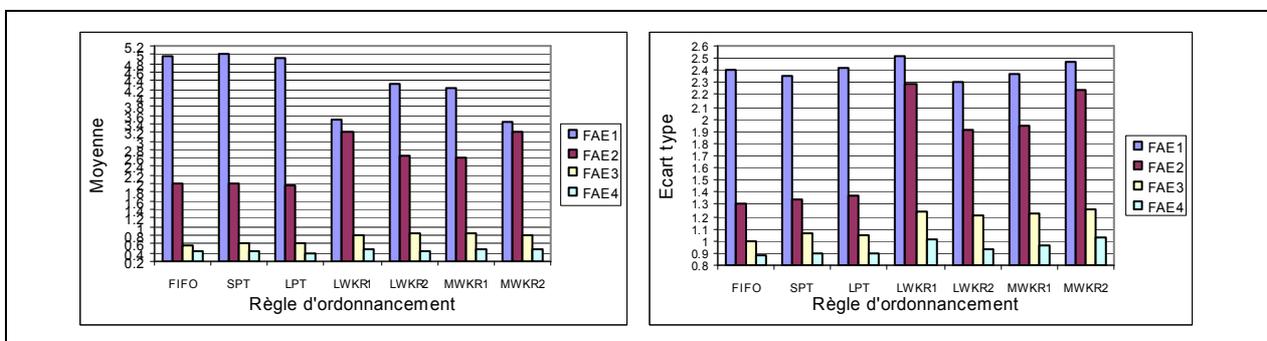


Figure 4.73 : Moyenne des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 10 par les règles d'ordonnement

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 10 (figure 4.73), les nombres de pièces dans les quatre FAEs est presque identique à ceux obtenu par un ordonnancement FIFO lors de l'application d'ordonnements SPT et LPT. Ce nombre est toujours plus important dans les deux premières FAEs (FAE1 et FAE2). Les taux d'amélioration en moyennes par ces ordonnancements atteint 30.9% (figure 4.74). Le nombre de pièces en attente n'est diminué que pour la FAE1 sous les pilotages MWKR2, LWKR1, MWKR1, LWKR2 et LPT (dans un ordre décroissant).

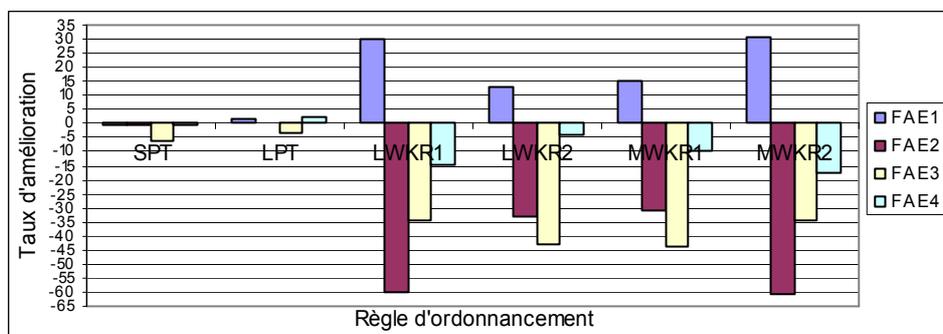


Figure 4.74 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAE dont la capacité est de 10 par les règles d'ordonnement

4.3.6.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20

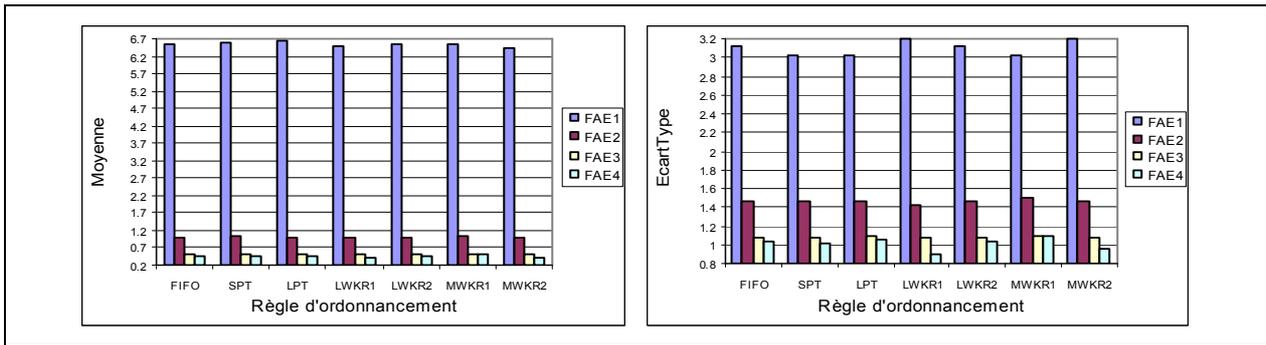


Figure 4.75 : Moyenne des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 20 par les règles d'ordonnancement

Conformément à la figure 4.75, le nombre des pièces en attente est pratiquement stationnaire pour toutes les FAEs ainsi que pour toutes les règles (tous les nombres sont toujours compris dans une même plage dont la longueur ne dépasse pas le 0.5 et c'est le cas avec l'écart type associé). Pour toutes les règles appliquées, les taux d'amélioration du nombre de pièces moyen en attente sont inférieur à 3.5% pour toutes les FAEs sauf pour la FAE4 ou l'amélioration atteint 16% dans le cas d'un ordonnancement LWKR1 et 10.2% dans le cas d'un ordonnancement MWKR2. Aucune amélioration n'est obtenue par l'ordonnancement LWKR2. Les cas de dégradation de performance sont obtenus par l'ordonnancement MWKR1.

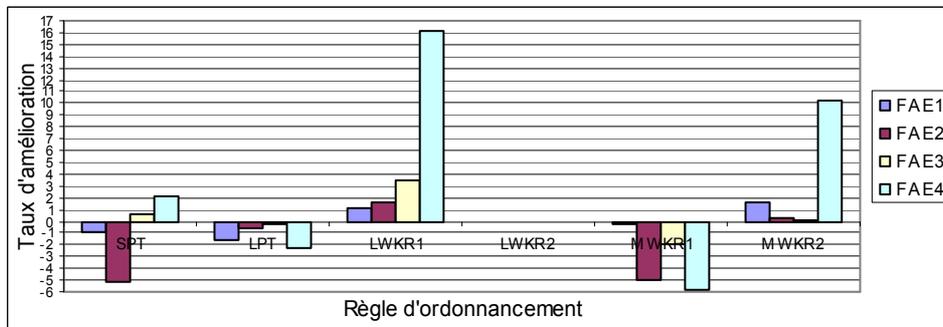


Figure 4.76 : Taux d'amélioration du nombre des pièces en attente dans les FAEs dont la capacité est de 20 par les règles d'ordonnancement

La figure 4.77 résume la moyenne de nombres moyens de pièces en attente dans les quatre FAEs confondues. En moyenne, la variation de ce nombre est toujours prise dans une plage dont la largeur ne dépasse pas 0.2. Pour toutes les règles, le nombre de pièces en attente s'accroît suivant l'accroissement de la capacité des FAEs.

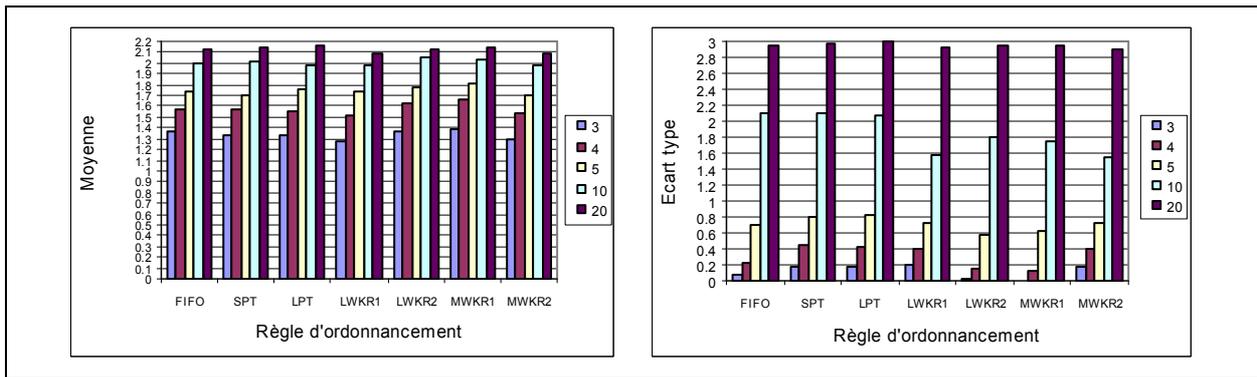


Figure 4.77 : Moyenne des Moyennes des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs

En moyenne, La réduction du nombre moyen de pièces en attente ne dépasse pas 7% (figure 4.78). Les taux de réduction les plus importants sont obtenus par l'application des règles SPT, LPT, LWKR1, LWKR2 et la MWKR2 dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3 (de 0.8 à 7%). Pour les autres cas, les taux de réduction du nombre de pièces en attente ne dépasse pas 3.5%. Les cas de mauvaise performance sont obtenus par l'application des règles LWKR2 et la MWKR1.

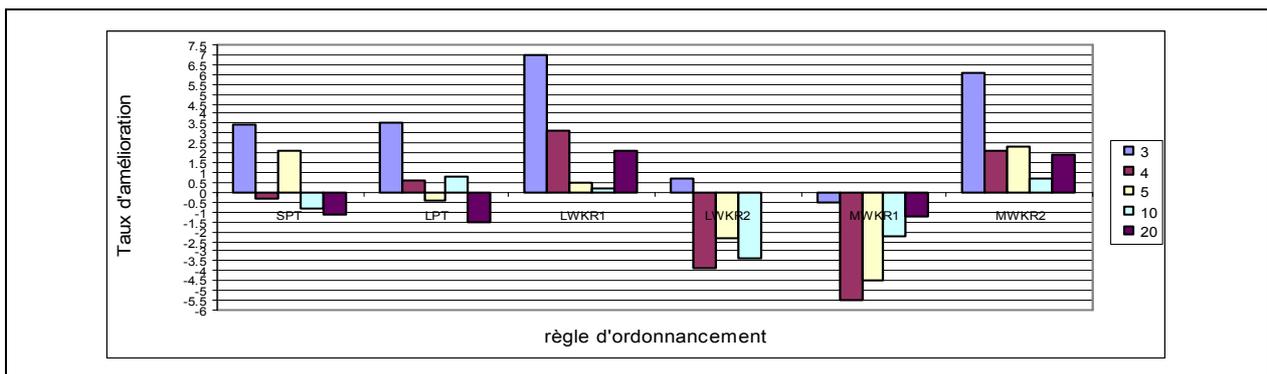


Figure 4.78 : Taux d'amélioration des Moyennes des nombres Moyens des pièces en attente dans les FAEs

Le nombre de pièces en attente s'accroît suivant l'augmentation de la capacité des FAEs. Les taux de réduction les plus importants sont obtenus dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3(atteignent un taux de 7%), par l'application des règles LWKR2, SPT, LPT, MWKR2 et la LWKR1 (dans un ordre croissant).

4.3.7 – Comparaison entre les taux d'amélioration des temps d'attente et des temps de transfert par rapport aux taux d'amélioration des temps de séjour

Le but de cette comparaison est de vérifier si les améliorations (et/ou les détériorations) des temps de séjours sont dues à la réduction (et/ou augmentation) des temps d'attente ou à celle des temps de transfert ou aux deux à la fois.

4.3.7.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3, la réduction des temps de séjour des pièces dans la cellule par les six règles d'ordonnancement dépend essentiellement de la réduction des temps d'attente. Ceci confirme le résultat du § 4.3.3.1 (les taux d'amélioration sont soit nuls ou insignifiant).

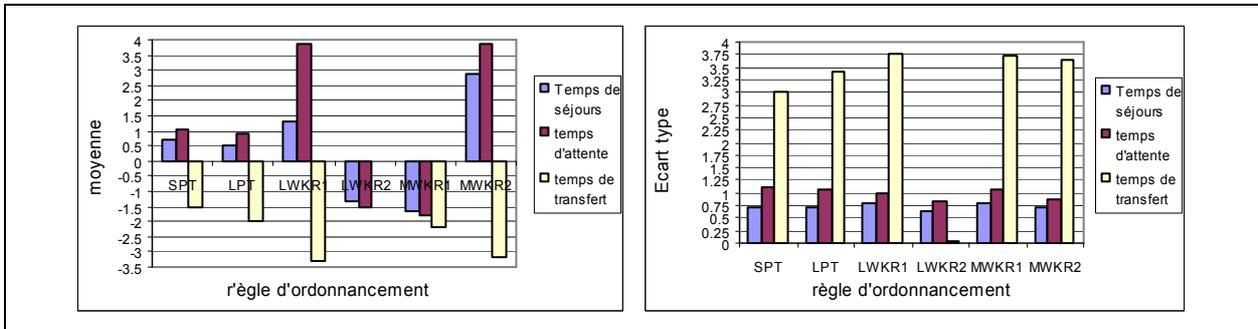


Figure 4.79 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 3 par les règles d'ordonnancement

4.3.7.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4

Conformément à la figure 4.80, la réduction des temps de séjour moyens des pièces résulte principalement de la réduction des temps d'attente (en moyenne).

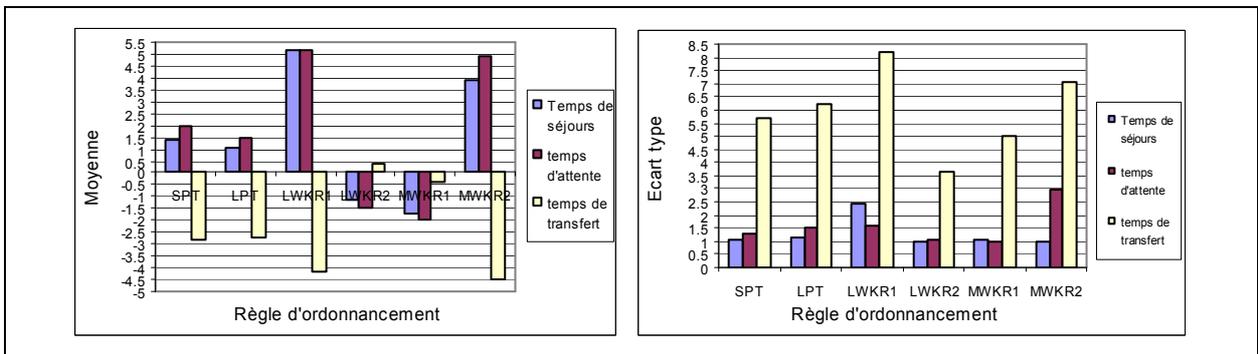


Figure 4.80 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 4 par les règles d'ordonnancement

4.3.7.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 5, la réduction des temps de séjour dépend particulièrement de la réduction des temps d'attente par les règles SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2. Sous des pilotages LWKR2 et MWKR1, une réduction des temps de transfert de l'ordre de 2% est obtenue, mais ceci n'a pas eu d'effet sur les temps de séjour des pièces dans la cellule (les retards dus aux attentes dans les FAEs sont beaucoup plus importants).

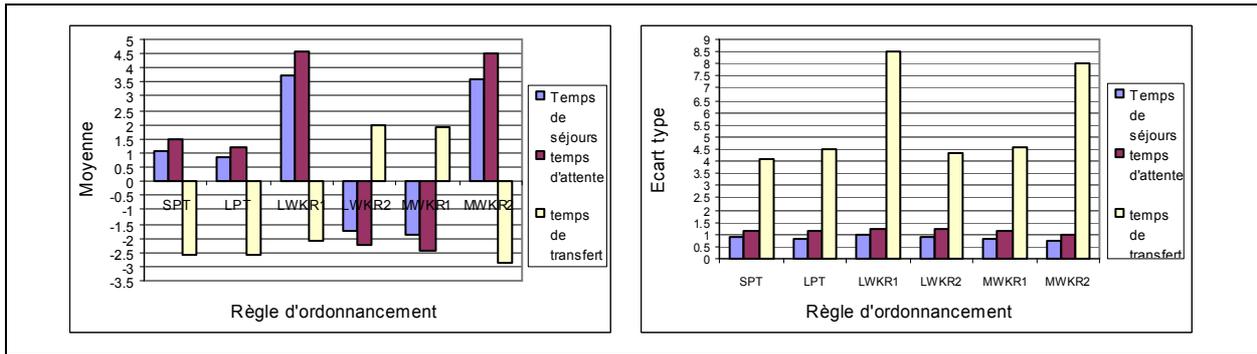


Figure 4.81 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 5 par les règles d'ordonnement

4.3.7.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10

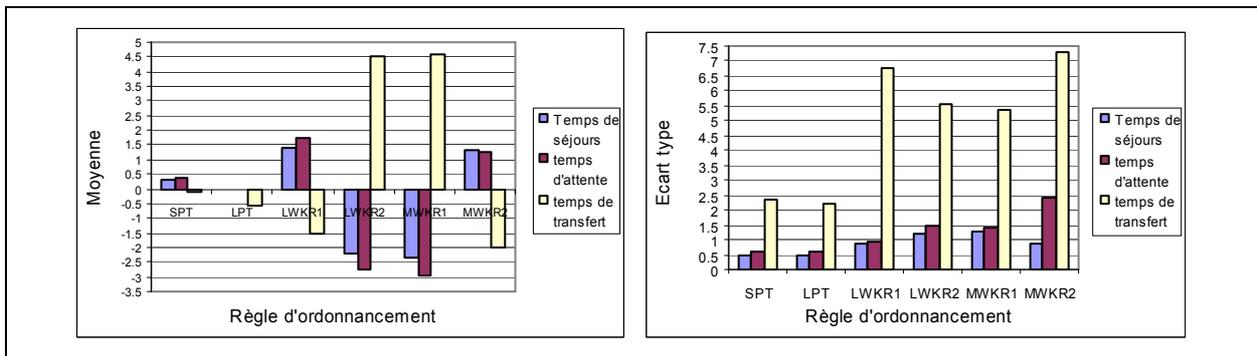


Figure 4.82 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 10 par les règles d'ordonnement

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 10, la réduction des temps de séjour dépend principalement de la réduction des temps d'attente par les règles SPT, LWKR1 et MWKR2. Sous des pilotages LWKR2 et MWKR1, la moyenne de réduction des temps de transfert est de l'ordre de 4.5%, mais ceci n'a pas eu d'effet sur les temps de séjour des pièces dans la cellule (les taux de retards pris dans les FAEs sont beaucoup plus importants).

4.3.7.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20

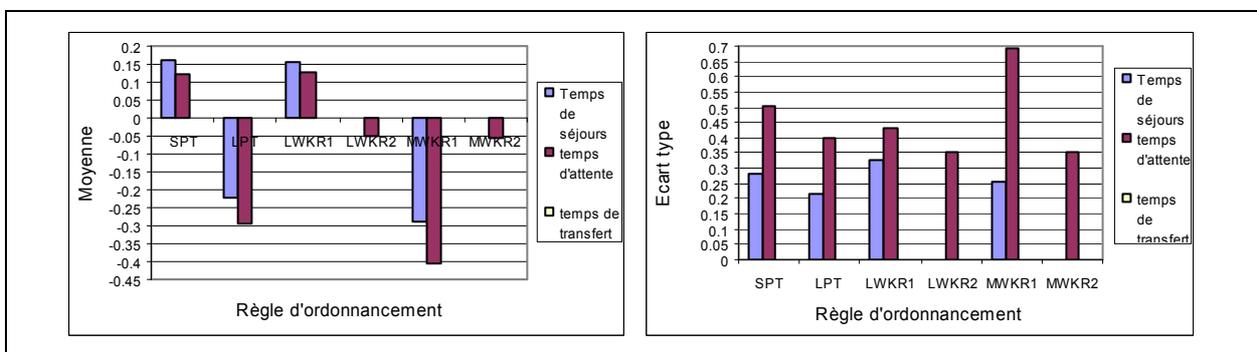


Figure 4.83 : Comparaison des Moyenne des taux d'amélioration des temps de séjour, temps d'attente et des temps de transfert des cas dont la capacité des FAEs est de 20 par les règles d'ordonnement

Dans les cas dont la capacité des FAEs est de 20, les réductions des temps de séjour sont essentiellement obtenues par la réduction des temps d'attente car le temps de transfert est identique pour tout les cas (un tour du convoyeurs équivalant à 523 unité de temps).

Dans les cinq expériences, quand il est question de réduction des temps moyens de séjour, elle est essentiellement due à des réductions des temps d'attente dans les FAEs.

En considérant les résultats obtenus dans l'analyse des temps de séjour d'une commande de pièces, les temps de transfert et les temps de séjour des pièces et les temps d'attente dans les files d'attente, nous pensons qu'un ordonnancement collaboratif de la cellule d'assemblage sera plus judicieux. Ceci par la prise en compte de tous les paramètres influençant sur le parcours d'une pièce dans la cellule. Plus précisément, il s'agit de se focaliser sur la réduction des temps de transfert par la réduction du nombre de cycles sur le convoyeur central (la réduction du C_{max} n'est obtenu que pour les cas dont les temps moyens de transfert ont été réduits).

4.3.8 – Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots

4.3.8.1 – Cas dont la capacité des FAEs est de 3

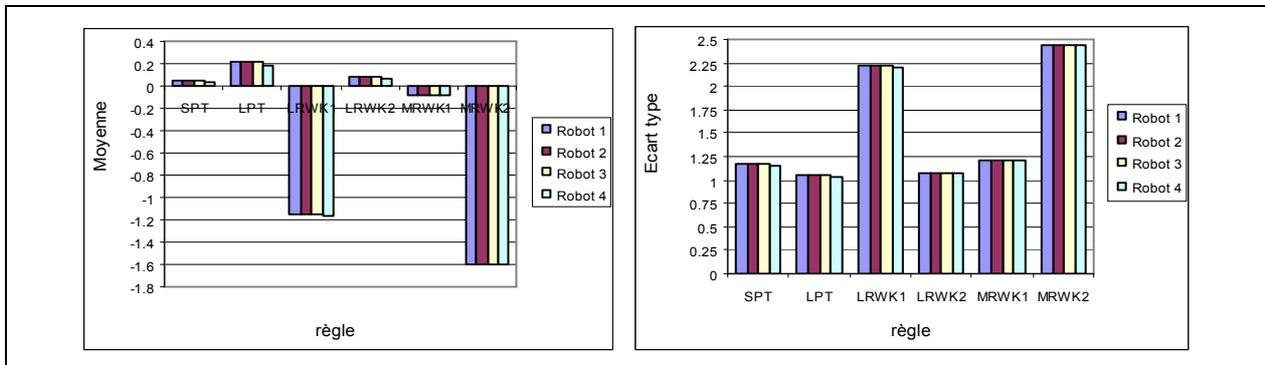


Figure 4.84 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement de dans les cas dont la capacité des FAEs est de 3

Les taux d'amélioration des taux d'utilisation moyens des robot sont insignifiants : 0.04%±1.16 % sous un pilotage MWKR1, 0.2% ±1.04 % sous un pilotage LPT et 0.07% ±1.07% sous un pilotage LWKR2.

4.3.8.2 – Cas dont la capacité des FAEs est de 4

Les taux d'amélioration des taux d'utilisation moyens des robot sont insignifiants : 0.2% ±0.9 % sous un pilotage SPT, 0.14% ±0.96 % sous un pilotage LPT, 0.11%±0.86 % sous un pilotage LWKR2 et 0.01±0.84 % sous un pilotage MWKR1.

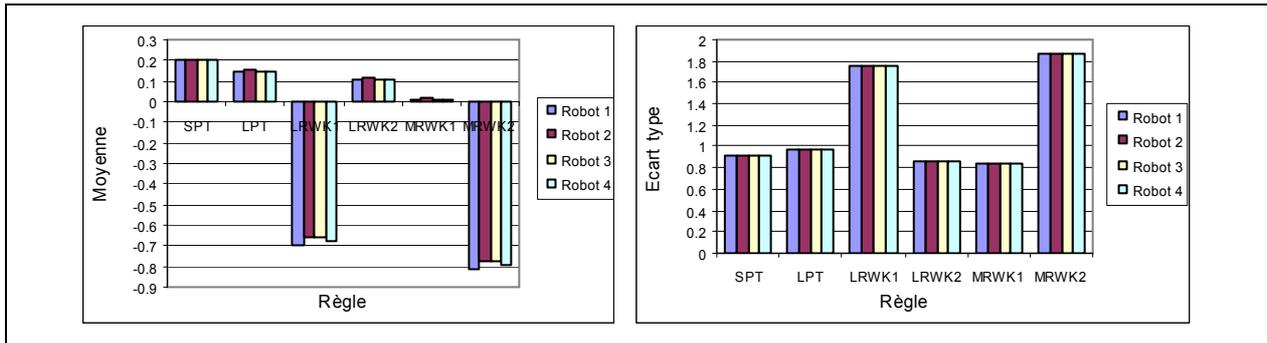


Figure 4.85 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnement dans les cas dont la capacité des FAE est de 4

4.3.8.3 – Cas dont la capacité des FAEs est de 5

Les taux d'amélioration des taux d'utilisation moyens des robots sont insignifiants : 0.06% ±0.47% sous un pilotage LPT, 0.06% ±1.00% sous un pilotage LWKR2 et 0.02±0.80 % sous un pilotage MWKR1.

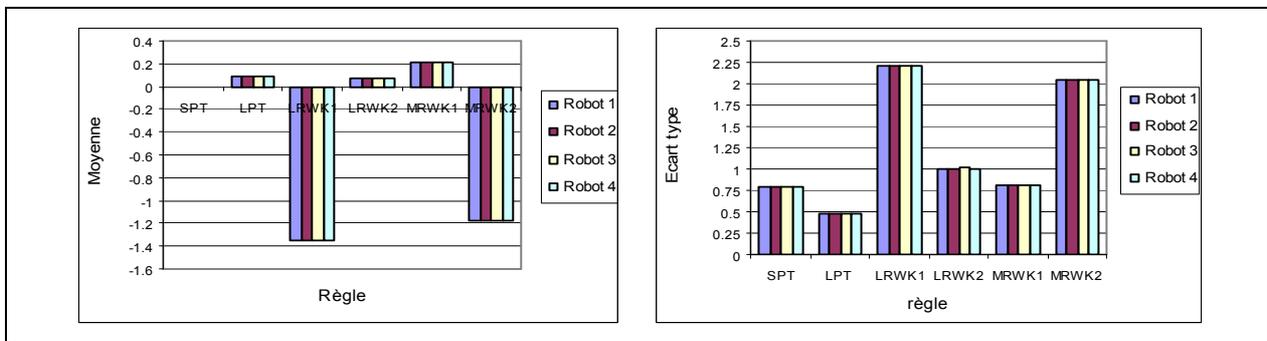


Figure 4.86 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnement dans les cas dont la capacité des FAE est de 5

4.3.8.4 – Cas dont la capacité des FAEs est de 10

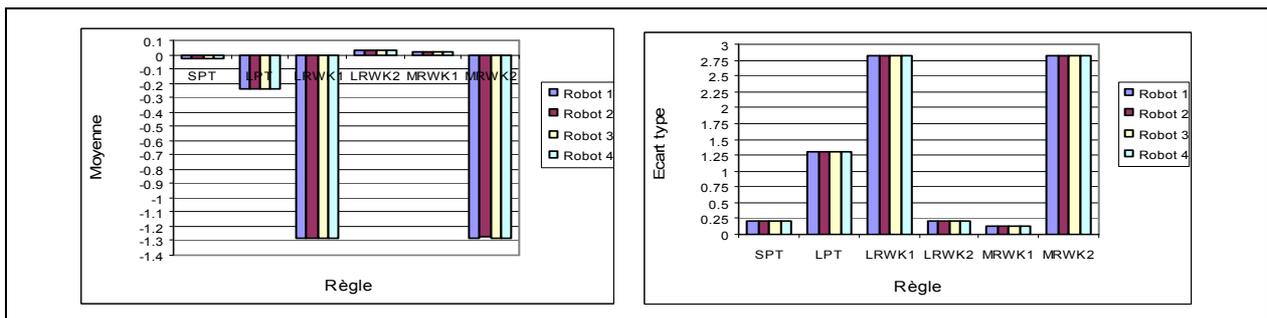


Figure 4.87 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnement dans les cas dont la capacité des FAE est de 10

Les taux d'amélioration des taux d'utilisation moyens des robot dans les cas dont la capacité des FAEs est de 10 sont insignifiants (figure 4.87) : 0.02% ±0.25% sous un pilotage LWKR2 et 0.01±0.13 % sous un pilotage MWKR1.

4.3.8.5 – Cas dont la capacité des FAEs est de 20

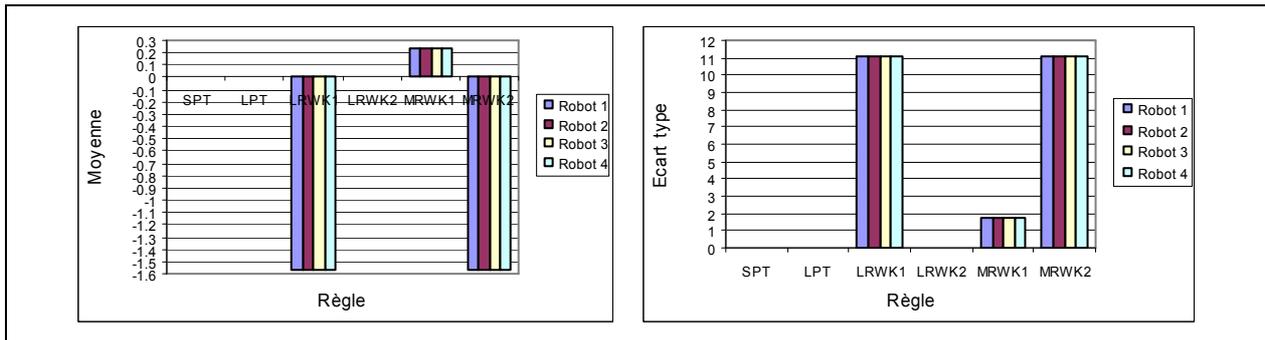


Figure 4.88 : Taux d'amélioration des taux d'utilisation des robots par les règles d'ordonnancement dans les cas dont la capacité des FAE est de 20

Les taux d'amélioration des taux moyen d'utilisation des robot sont soit nuls (Pilotage sous SPT, LPT et LWKR2) ou insignifiants (pilotage sous MWKR1 : 0.24% \pm 1.5%).

Enfinement à travers ces expériences, aucune amélioration des taux d'utilisation des robots n'est apparue (lorsqu'elle existe, elle ne dépasse pas 0.3% avec un écart type de l'ordre de \pm 1.8%), ce qui est logique vu le prolongement des temps de séjours des pièces dans la cellule par l'application des règles de priorités.

4.4 – Conclusion

Après une multitude de tests, nous avons constaté qu'aucune amélioration n'est réellement apportée à la performance de la cellule d'assemblage par l'association des plans non linéaires non prédéterminés à un ordonnancement par des règles de priorité.

Les règles d'ordonnancement n'apportent aucune amélioration significative au temps d'assemblage d'une commande (la moyenne des taux d'amélioration pour les cinq expériences ne dépassent pas 0.4% avec un écart type de l'ordre de 2% obtenu dans les cas dont la capacité des FAE est de 5 et 10 par des ordonnancement LWKR2 et la MWKR1). Cependant, les temps de séjours d'une pièce dans la cellule présentent une sensible amélioration pour certaines règles. Les temps de séjours moyens des pièces sont réduits par des ordonnancements LWKR1 et MWKR2 dans les cas dont la capacité des FAE est de 3, 4, 5 et 20, mais les taux d'améliorations varient en moyenne de 0.2% à 5.2% avec un écart type de l'ordre de 2.46%. Les meilleurs taux de réduction des temps de séjours sont obtenus par la configuration dont la capacité des FAEs est de 4 sous des pilotages LPT, SPT, MWKR2 et la LWKR1 (dans un ordre croissant), suivi de la configuration dont la capacité des FAEs est de 5. En général, aucune des règles de priorité ne présente une performance stable c'est-à-dire une amélioration régulière et continue.

Sous des pilotages SPT, LPT, LWKR1 et MWKR2, la réduction des temps de séjour moyens des pièces correspond directement à celle réalisée dans la phase de démarrage de l'assemblage (réduction du temps atteignant les 35% en moyenne des premières pièces sorties), sachant que ce gain sera dissipé par la suite. Sous des règles de pilotage LWKR2 et MWKR1, la réduction des temps d'assemblage n'est constatée que sur une commande et non pas par pièces. C'est d'ailleurs sous ces deux pilotages que les temps de transfert et le nombre des cycles des pièces dans la cellule sont réduits.

Pendant l'analyse des temps de séjours, nous avons d'abord constaté des réductions considérables sur certains types de pièces qui sont généralement absorbés par des retards acquis par d'autres types de pièces ou aux interactions entre pièces. Par la suite, durant la comparaison des temps d'attente et des temps de transfert par rapport au temps de séjour, nous avons constaté que la réduction de ces derniers était toujours liée à la réduction des temps d'attente. Nous avons aussi remarqué qu'uniquement dans les cas ordonnancés par les règles LWKR2 et MWKR1, la réduction des temps de transfert est réalisée ainsi que la réduction du C_{max} .

Au vu des résultats obtenus et analysés, nous pensons qu'un ordonnancement coopératif sera plus judicieux et plus efficace, et ceci par la prise en compte de l'état en cours de chaque ressource (de transformation, de stockage et de manutention).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons traité un problème d'ordonnancement d'une cellule flexible dans un environnement Open shop. Le système étudié est une cellule flexible d'assemblage dont les stations sont conçues autour d'un convoyeur en boucle avec accumulation. Nous avons étudié le comportement d'un tel système géré par des plans non linéaires et non prédéterminés combinés à un ordonnancement par règles de priorité. Par l'application de ces règles de priorité, l'objectif était la réduction des temps de séjour des pièces par rapport aux temps obtenu sous des pilotages FIFO.

Les problèmes Open Shop sont déjà NP-difficiles dans le cas général et l'ajout de ressources en plus des ressources de transformation (les machines) rend le problème plus difficile. Même si la préemption est autorisée, ce problème est déjà NP difficile. Or, dans notre cas, la préemption est non autorisée (ressources disjonctives), la typologie est circulaire (ce qui rend le problème plus combinatoire par rapport aux lignes d'assemblage linéaires conventionnelles) et les temps de transport sont considérés (considération des ressources de transport) ce qui fait de notre problème un problème NP-difficile au sens fort. Vu cette complexité, nous avons opté pour une prise en charge empirique du problème considéré $O|\tau_j|F$.

Pour ce faire, nous avons conçu un plan d'expérimentations basé sur la capacité des files d'attente, des durées opératoires ainsi que les règles de priorité. Pour ce faire, nous avons effectué 1750 expériences. L'analyse des résultats de l'expérimentation a bien montré que les taux de réduction des temps de séjours par le seul fait de l'application des règles de priorités étaient insignifiants :

- En moyenne, les taux d'amélioration (réduction) ne dépassent pas 0.5% avec un écart type de l'ordre de 2%, ceci dans le cas de l'assemblage d'une commande de pièces (en considérons les effets d'interaction entre les pièces sur des palettes). Ces réductions sont obtenues par l'application des règles LWKR2 et MWKR1 (principalement du à la réduction des temps de transfert par conséquent le nombre de cycle des pièces dans la cellule).
- Cependant, en considérant chacune des pièces à part la moyenne des taux d'amélioration peut atteindre 5.2% avec un écart type de l'ordre de 4.2%.

Nous n'avons constaté aucune amélioration régulière et continue des temps de séjour des pièces dans la cellule par l'application de l'une des règles, et pas plus par le

dimensionnement des files d'attente d'entrée. Pratiquement pour tous les cas, la réduction des durées de séjour des pièces dans la cellule dépendait principalement de la réduction des temps d'attente dans les files d'attente.

Sur le plan personnel, cette étude représente une initiation au domaine de la productique, plus précisément aux problèmes d'ordonnancement des ateliers flexibles du type Open Shop. A travers ce travail, je me suis familiarisée avec la structure physique des systèmes flexibles de production par l'étude de leurs différentes composantes, leurs typologie, leurs pilotage en général, et leur ordonnancement en particulier, leurs conception ainsi qu'aux différentes étapes du processus d'assemblage. De plus, je me suis initiée à la conduite de projets de simulation des systèmes de production, voire maîtriser le processus de simulation. En effet, la simulation est la méthode la plus adaptée à l'étude du comportement de ce type de systèmes qui permet de considérer toutes les contraintes, sans imposition de restrictions, tel que c'est le cas lors de l'utilisation des méthodes analytiques.

Pendant l'analyse des temps de séjours, nous avons d'abord constaté des réductions considérables sur certains types de pièces qui sont généralement absorbés par des retards acquis par d'autres types de pièces dû aux interactions entre pièces. Par la suite, durant la comparaison des temps d'attente et des temps de transfert par rapport au temps de séjour, nous avons constaté que la réduction de ces derniers était toujours liée à la réduction des temps d'attente. Nous avons aussi remarqué qu'uniquement dans les cas ordonnancés par les règles LWKR2 et MWKR1, la réduction des temps de transfert est réalisée ainsi que la réduction du C_{max} .

Au vu des résultats obtenus et analysés, nous pensons qu'un ordonnancement coopératif sera plus judicieux et plus efficace, et ceci par la prise en compte de l'état en cours de chaque ressource (de transformation, de stockage et de manutention). L'idéal serait, qu'à chaque point d'intersection (entrée de la cellule-convoyeur, convoyeur-entrée d'une station), on puisse calculer toutes les trajectoires possibles (tout en considérant les temps d'attente probables dans les FAEs et les règles appliquées, les distances entre les points d'entrée des stations, les taux d'exécution des tâches en cours) et d'en choisir la meilleure. La coopération consiste à prendre en considération tous les scénarios d'ordonnancement possibles suivant l'état des paramètres considérés à l'instant courant. Ceci implique l'élaboration d'un protocole de communication performant entre les points d'accès aux stations ainsi que l'entrée de la cellule et les postes de travail. L'objectif sera de réaliser un ordonnancement de la cellule d'une performance globale satisfaisante tout en respectant l'autonomie décisionnelle de chaque ressource de la cellule. Ceci fera l'objet de travaux futurs.

Références bibliographiques

Ouvrages

- [Afg92] Association Française de Gestion Industrielle, Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel. Ouvrage collectif AFGI, 1992.
- [Are02] ARENA Standard: User's Guide, Doc ID ARENAS-UM001C-EN-P, Rockwell Software Inc. Rockwell Automation company, 2002.
- [Bel57] R. Bellman, Dynamic Programming. Princeton University Press. Princeton, 1957.
- [Boo91] G. Booch, « *Object-oriented design with applications* », The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, CA, 1991.
- [Boo93] Booch G. - *Object - Oriented Design with Applications*, Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., 1993.
- [Bot99] G. Botta, Gestion de Production. INSA, Département de Génie Productique. 1998-1999.
- [Car88] J. Carlier et P. Chrétienne, Problèmes d'Ordonnancement : Modélisation, Complexité et Algorithmes. Paris, Masson, 326p, 1988.
- [Che77] A. Chevalier, La programmation dynamique. Dunod, 1977.
- [Chu96] C. Chu et J.M. Proth, L'Ordonnancement et ses applications, Masson, 1996.
- [Dav88] R. David, H. Alla, Du Grafset aux réseaux de Petri, Éditions Hermès, 1988.
- [Esq99] P. Esquirol et P. Lopez, L'Ordonnancement. Economica, 1999.
- [Eva88] J.B. Evans, « *Structure of discrete event simulation* », Ellis Horwood, Chichester, 1988.
- [Gar79] M.R. Garey, D.S. Johnson; Computers and interactability: a guide to the theory of NP-completeness; W.H. Freeman and Company, New York, 1979.
- [Gia88] V. Giard, Gestion de production. Economica, 1988.
- [Hax83] A.C. Hax, D. Candea; Production and Inventory Management. Prentice Hall; Inc; 1983.
- [Jav97] G. Javel, Organisation et Gestion de la production. Masson, second edition, 1997.
- [Kle87] J.P.C. Kleijnen, Statistical tools for simulation practitioners, Marcel Dekker, Inc. New York, 1987.
- [Kel98] W. D. Kelton, D.A. Sadawski, R.P. Sadawski; Simulate with Arena; WCB McGRAW-HILL, USA, 1998 .
- [Lem90] J.L. Le Moigne, « La théorie du système général : théorie de la modélisation », 2ème édition, Paris, France, 1990.
- [Lop01] P. Lopez et F. Roubllat, Ordonnancement de la production. Paris Hermès, 2001.
- [Law91] A.M. Law, W.D. Kelton, Simulation modeling and analysis, Second edition, McGraw Hill, New York, NY, 1991.
- [Mel87] S. A. Melnyk and Phillip L. Carter, « Production Activity Control », The Business ONE Irwin/APICS Series in Production Management, Richard D. Irwin, Inc., 1987.
- [Min75] M. Minsky, A Framework for Representing Knowledge. In P. Winston editor, Psychology of Computer Vision, pp211-218, McGraw-Hill, New-York, 1975
- [Mor95] Moreau R. - *Approche objet*, Ed. Masson, 1995
- [Oli89] P. Olivier, La prérobotique d'assemblage, Edition Hermès, 1989.
- [Pap82] C.H. Papadimitriou, K. Steiglitz ; Combinatorial optimization – Algorithms and complexity. Prentice Hall, 1995.
- [Peg90] C.D. Pegden, R.E. Shannon, R.P. Sadowski, « Introduction to simulation using SIMAN », McGraw Hill, New York, NY, 1990.
- [Pie90] H. Pierrel, « Les méthodes d'analyse et de conception des systèmes de production », Éditions Hermès, 1990.
- [Pin 95] M. Pinedo, Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. Prentice Hall, 1995.
- [Pri86] A.A.B. Pritsker, « Introduction to simulation and SLAM II », Halsted Press, New York, NY, 3rd edition, 1986.
- [Pro87] J. Proth, J.B. Cavaille, Pratique de la simulation de production discontinue, Éditions Siprodis, 1987.
- [Rin76] A.H.G. Rinnooy Kan, Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations. Martinus Nijhoff, The Hague, 180 p, 1976.
- [Rod91] G. Rodde, Les systèmes de production – modélisation et performance ; Éditions Hermès, 1991.
- [Zei76] B. P. Zeigler; Theory of Modeling and simulation. New-York: John Wiley & Sons, 1976.

Mémoire et Thèses

- [Bak96] M. Bakalem, Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers, Thèse de doctorat, ESIA, Savoie, France, 1996.
- [Ber97] L. Berrah, Une approche d'évaluation de la performance industrielle – Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif, Thèse de doctorat, INP Grenoble, 1997.
- [Bre84] Alain Dominique Breuil, Outil de conception et de décision dans les organisations de gestion de production, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France, 1984.
- [Car94] P. Carbone, Intégration des plans d'expériences et des systèmes experts à la simulation, DEA d'automatique industrielle, Université de Savoie, juillet 1994.
- [Cas04] P. Castagna ; Contribution à la modélisation, la simulation et la commande de systèmes de production et de transitique ; HDR, Université de Nantes, France, 2004
- [Cau93] C. Caux, Analyse et spécification de systèmes de production pour l'évaluation des performances et la recherche d'ordonnement, Thèse de doctorat de l'université de Clermont Ferrand, 1993.
- [Ded01] S. Dedieu , Algorithme génétique multicritère : conception et remodelage d'ateliers de chimie fine, Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2001
- [Del93] A. Delamare-calot, Approche méthodologique d'almélioration des performances des systèmes de production de la seconde transformation du bois. Thèse de doctorat de l'université de Nancy I, 1993.
- [Des94] J. C. Deschamps ; Gestion hiérarchisée de cellules flexibles d'assemblage, Thèse de doctorat N°94526, Université de Toulouse, 1994.
- [Die04] A. R. Dietz ; Optimisation multicritère pour la conception d'ateliers discontinus multiproduits : aspects économique et environnemental; Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2004.
- [Fon99] F.Fontanili, Intégration d'outils de simulation et d'optimisation pour le pilotage d'une ligne d'assemblage à transfert asynchrone, Thèse de doctorat, université Paris 13 (GRPI, Paris), 1999.
- [Gaz03] S.H. Gazoby; planification des tâches dans un environnement d'ateliers à flux tirés»; Mémoire de Magister ; EMP ; 2003.
- [Gue97] C. Gueret ; Problèmes d'ordonnement sans contraintes de précédence ; Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 1997.
- [Hab01] G. Habchi Conceptualisation et modélisation pour la simulation des systèmes de production ; HDR ; Université de Savoie, France, 2001.
- [Hen99] H. Hentous ; Contribution au pilotage des systèmes de production de type Job Shop. Thèse de doctorat INSA Lyon, 1999.
- [Let01] Agnès Letouzey; Ordonnement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs; Thèse de Doctorat, INP, Toulouse, France, 2001.
- [Méb95] N. Mébarki, « Une approche d'ordonnement temps réel basée sur la sélection dynamique de règles de priorité », Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard Lyon I, 1995.
- [Nag91] G. Nagi, « Design and operation of hierarchical production manufacturing systems », PhD. Thesis Report, University of Maryland, USA, 1991.
- [Our01] S. Ourari; Ordonnement temps réel en présence d'évènement aléatoire; mémoire de Magister EMP, 2001.
- [Pes91] E. Pessiot ; Participation à l'exploitation de la modélisation d'un système de production ; DEA d'automatique, informatique et robotique de l'université de Franche-Comté, 1991.
- [Pier87] H. Pierreval, « *Analyse, modélisation et simulation des systèmes de production – application au cas d'une fonderie* », Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard, Lyon, 1987.
- [Sar03] Z. Sari ; Modélisation, Analyse et évaluation des performances d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel, thèse de Doctorat en Productique, université Aboubakr Blkaid, Telemesen, Algérie, 2003.
- [Sac02] A. Saci, Ordonnement de tâches dans un environnement de machines en parallèle. Mémoire de Magister, EMP, Algérie, 2002.
- [Sén95] P. Sénéclauze, Intégration informatique des plans d'expériences à la simulation, DEA, ENSGI – INP Grenoble, 1995.

Articles et Rapports

- [Ada88] J. Adams, E. Balas, and D. Zawack. The shifting bottleneck procedure for jobshop scheduling". Management Science, 34(3):391-401, 1988.
- [Alc96] D. Alcaide, J. Sicilia, and D. Vigo. Heuristic approaches for the minimum makespan openshop problem. Technical report, Università degli Studi di Bologna, Italy, 1996. Technical report DEIS OR 96 5.
- [Bac93] T. Bäck, H.P. Schwefel, An overview of Evolutionary Algorithms for parameter optimisation, European journal of Operational Research, Vol.32, n° 1, p.1-23, 1993.
- [Bac96] T. Bäck; Evolutionary Algorithms in Theory and Practice; Oxford University Press, 1996.
- [Bac97] T. Bäck, U. Hammel, H.P. Schwefel, "Evolutionary Computation: Comments on the History and current State", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, n° 1, p. 3-17, 1997.
- [Bel85] G. Bel, G. Dubois, Modélisation et simulation des systèmes de production, Revue APII n°19, 1985.
- [Bel90] G. Bel, J.B. Cavaille, Integration of simulation within production systems design: advantages and dangers of the object-oriented language, CIM'90, Bordeaux, France, June 1990, p. 597-603.
- [Bel 91] G. Bel, Rapport introductif du thème « Pilotage et gestion d'atelier », Colloque Actions de recherche en Robotique et Productique du MRT, Paris, pp. 551-562, 1991.
- [Ber00] C. Berchet, G. Habchi, «The control centre: a basic concept for modelling industrial control in simulation», ASI'2000, Bordeaux, France, septembre 2000.
- [Bra91] H. Brasel, D. Kluge, and F. Werner. A polynomial time algorithm for an openshop problem with unit processing times and tree constraints. Technical report, Technische Universitaet Otto von Guericke, Magdeburg, 1991.
- [Bra93] H. Brasel, T. Tautenhahn, and F. Werner. Constructive heuristic algorithms for the open shop problem. Computing, 51:95-110, 1993.
- [Bra94] C. Braesch, A. Haurat ; Modélisation systématique en entreprise ; deuxième université d'été du pôle productique Rhône Alpes, Aussois, 1994.
- [Bra05] N. Brauner, P. Castagna, M-L. Espinouse, G. Finke, Ph. Lacomme, P. Martineau, A. Moukrim, A. Soukhal, C. Tacquard, N. Tchernev ; Ordonnement dans les Systèmes Flexibles de Production. Journal Européen des Systèmes Automatisés 2005.
- [Bru93] P. Brucker, B. Jurisch, and M. Jurisch. Openshop problems with unit time operations. Zeitschrift fuer, Operations research, 37:59-73, 1993.
- [Car82] J. Carlier. The one machine sequencing problem. European Journal Of Operations Research, 11:42-47, 1982.
- [Cav97] Cave S. R., Edwards D. W., Chemical process route selection based on assessment of inherent environmental hazard. Computers and Chem. Engng. Vol. 21, Suppl., pp. S965-S970, 1997
- [Cet95] Equipements d'assemblage ; Cetim Information, N°146, 1995.
- [Cha95] F.T.S. Chan, B. Jayaprakash, N.K.H. Tang, Design of automated cellular manufacturing systems with simulation modelling: a case study, International Journal of Computer Applications in Technology, Vol. 8, No. 1/2, 1995, pp. 1-11.
- [Chi03] Ching-Fang Liaw ; Scheduling preemptive open shops to minimize total tardiness ; Department of Industrial Engineering and Management, Chaoyang University of Technology, Taiwan ; 2003.
- [Cho81] Y. Cho and S. Sahni. Preemptive scheduling of independent jobs with release and due times on open, flow and job shops. Operations Research, 29(3):511-522, juin 1981.
- [Coh83] G. Cohen, D. Dubois, Analyse du comportement périodique de systèmes de production parla théorie des diodes , Rapport de recherche INRIA, No. 191, 1983.
- [Cor91] G. Corthier, P. Castagna, J.J. Lesage, « Définition d'un modèle Siman au moyen de la méthode SA/RT », 23ème CIRP, Séminaire international sur les systèmes de production, Nancy, juin 1991.
- [Dav94] L. Davis, G. Williams, Evaluating and selecting simulation software using the analytic hierarchy process, Integrated Manufacturing Systems, Vol. 5, No. 1, 1994, pp. 23-32.
- [Del95] M. Dell'Amico, R.J.M. Vaessens, Flow- and open-shop scheduling on two machines with transportation times and machine-independent processing times is NP-hard. Materiali di discussione 141, Dipartimento di Economia Politica, Università di Modena, Italy, 1995.
- [Dor01] U. Dorndorf; E. Pesch; T. Phan-Huy ; Solving the Open Shop Scheduling Problem, Journal of Scheduling, Vol. 4, 157 - 174. 2001.
- [Dra98] G. Draghici, N. Brinzei, I. Filipas ; La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production ; Universitatea Politehnica Din Timisoara ; 1998.
- [Dup97] L. Dupont, Y. Crama, G. Finke ; Recherche Opérationnelle et gestion de la production ; Article préparé dans la revue : nouvelles de la science et des technologies. 1997.
- [Far90] F. Farhoodi, A knowledge-based approach to dynamic job-shop scheduling", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol.3, n°2, 1990, pp. 84-95.
- [Fin93] G. Finke, L. Dupont; Combinatorics of Cyclic Assembly Systems; 1993 IEEE Systems, Man and Cybernetics

- Conference Proceedings; Grenoble, France.
- [Fri90] D. Fritschy, Object-oriented simulation, new requirements for temporal simulation of flows in FMS, SIM'90, Bordeaux, France, June 1990, p. 585-595.
- [Gar77] M.R. Garey and D.S. Johnson. Twoprocessor scheduling with starttimes and deadlines. *SIAM J. Comput.*, 6:416-426, 1977.
- [Gar86] R.F. Garzia, M.R. Garzia, B.P. Zeigler, « Discrete event simulation », *IEEE Spectrum*, December 1986, pp. 32-36.
- [Glo86] F. Glover, Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research* 13: 533-549, 1986.
- [Glo89] F. Glover, Tabu search, part 1. *Orsa Journal on Computing*, vol.1, n°3, pp. 190-206, 1989.
- [Glo90] F. Glover, Tabu search, part 2. *Orsa Journal on Computing*, vol.2, n°1, pp. 4-32, 1990.
- [Gon76] T. Gonzales and S. Sahni; "Open shop scheduling to minimize finish time". *Journal of the Association for Computing Machinery*, 23(4):665-679, October 1976.
- [Gon79] T. Gonzalez. A note on openshop schedules. *IEEE Trans. Computers*, 28:782-786, 1979.
- [Gon82] T. Gonzalez. Unit execution time shop problems. *Math. of Oper. Res.*, 7(1):57-66, February 1982.
- [Got93] Groupe d'Ordonnancement Théorique et Appliqué, Les problèmes d'ordonnancement, R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle/Operational Research, vol.27, n°1, 1993, pp. 77-150.
- [Gra79] R.L. Graham, E.L. Lawler, J.K. Lenstra, and A.H.G. Rinnooy Kan. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5:287-326, 1979.
- [Gra98] B. Grabot, Objective satisfaction assessment using neural nets for balancing multiple objectives, *International Journal of Production Research*, vol.36, n°9, 1998, pp. 2377-2395.
- [Gup03] J.N.D Gupta; F.Werner; G. Wulkenhaar ; Two-Machine Open Shop Scheduling with Secondary Criterion, *Intl. Trans. Oper. Res.*, Vol. 10, 2003.
- [Hab96] G. Habchi, P. Sénéclauze, Computer integration of fractional experimental designs and job shop system simulation, 1996 Simulation Multiconference, Simulators International XIII, New Orleans, USA, April 8-11, 1996, pp. 117-122.
- [Hab00] G. Habchi, Editorial –Modelling and simulation of complex production systems ;Simulation Practice and Theory Journal, Elsevier, Vol. 8, No. 5, 2000, pp. 281-282.
- [Han86] P. Hansen, The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. *Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimisation*, Capri, Italie, 1986.
- [Hao99] J.K. Hao, P. Galinier, M. Habib ; Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes; *Revue de l'intelligence artificielle*, 1999.
- [Hoo82] J.W. Hooper, K.D. Reily, « *An algorithmic analysis of simulation strategies* », *International Journal of Computer and Information Sciences*, Vol. 11, No. 2, 1982, pp. 101-122.
- [Jon02] D. Jones, S. Mirrazavi, M. Tamiz ; Multi-objective meta-heuristics : An overview of the current state-of-the-art ; *European Journal of Operational Research* 137 (2002) 1-9.
- [Jub03] M. Jubin ; Ateliers flexibles d'usinage, *Techniques de l'ingénieur, Traité Mesure et contrôle R7 820*, 2003.
- [Kel92] P. Kellert, « Méthodologie orientée objet pour la modélisation des systèmes de production », *INFORSID'92*, Clermont-Ferrand, France, 1992.
- [Kir83] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, P.M. Vecchi ; Optimisation by simulated annealing . *Science* 220:671-680, 1983.
- [Kos98] J. Kosturiak, M. Gregor, FMS simulation : some experience and recommendations, *Simulation Practice and Theory Journal*, Elsevier, Vol. 6, No. 5, 15 July 1998, pp. 423-442.
- [Kub91] W. Kubiak, C. Srisankarajah, and K. Zaras. "A note on the complexity of openshop scheduling problems". *INFOR*, 29:284--294, 1991.
- [Kub95] Marek Kubale. Openshop problem with zeroone time operations and integer release time/deadline intervals. *Discrete Applied Mathematics*, 1995.
- [Lab84] J. Labetoulle, E. L. Lawler, J.K. Lenstra, and A. Rinnooy Kan. Preemptive scheduling of uniform machines subject to release dates. In W. R. Pulleyblank, editor, *Progress in combinatorial optimization*, pages 245-261. Academic Press, New York, 1984.
- [Law81] E.L. Lawler, J.K. Lenstra, and A. Rinnooy Kan; Minimizing maximum lateness in a twomachine openshop; *Math. Oper. Res.*, 6:153-158, 1981.
- [Len93] T. Lenclud, Contribution à la conception d'un système intégré de simulation des systèmes de production, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France, 1993.
- [Lia00] C.F. Liaw ; A Hybrid Genetic Algorithm for the Open Shop Scheduling Problem, *European Journal. Oper. Res.*, Vol. 124, 28 - 42. 2000.
- [Lit94] D. Little, A. Hemings, Automated assembly scheduling: a review; *Computer integrated Manufacturing system*, Vol.7 N°1 pages 51-61, 02/1994.
- [Met53] N.A. Metropolis, A. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller, Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemistry and Physics*, vol.6, n°21, 1953.

- [Pap90] S. Papageorgaki, G.V. Reklaitis ; Optimal design of multipurpose batch plants I. Problem Formulation, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 29, pp. 2054-2062, 1990
- [Pap93] S. Papageorgaki, G.V. Reklaitis ; Retrofitting a general multipurpose batch chemical plant, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 32, pp. 345-362, 1993.
- [Par96] V. Pareto ; Cours d'économie politique, Rouge, Lausanne, Switzerland, 1896.
- [Pau91] R.J. Paul, Recent developments in simulation modelling, Journal of Operations Research Society, Vol. 56, No. 2, 1991, pp. 91-103.
- [Pec92] S.N. Peck, S.J.E. Taylor, « Modelling discrete-event systems using co-opting processes », Summer Computer Simulation Conference, 1992, pp. 53-57.
- [Per03] Laurent Péridy; Thecniques d'optimisation combinatoire ;Personnal comminication 2003, <http://www.ima.uco.fr/zeb/>
- [Por96] M.C. Portmann, Genetic algorithms and scheduling: A state of art and some propositions. Workshop on production and planning Control, Proceedings, 1996, Mons (Belgique) p i-xxiv.
- [Ram92] A. Ramudhin and P. Marier. Generalizing the shifting bottleneck procedure for open shop scheduling. Technical report, University Laval, Québec, 1992.
- [Ram95] H. K. Rampersad; A cases study in the design of flexible assembly systems; International Journal of flexible manufacturing systems Vol. 7 pages 255-286; 1995.
- [Ray92] V.J. Rayward-Smith, D. Rebaïne ; Open-shop scheduling with delays ; Theoret. Inform. Appl. 439-448, 1992.
- [Rib94] C.C. Ribeiro, N. Maculan, Applications of combinatorial optimization; Annals of Operations Research 50, 1994.
- [Sab01] A Sabri, Z. Sari, A. Benamar ; Simulation d'un Système Automatisé de Stockage/Déstockage à Charge Unitaire par Arena ; L. A. T, Université de Aboubekr Belkaid, Tlemcen 13000, Algérie, CIP 2001.
- [Sah79] S. Sahni and Y. Cho; Complexity of scheduling shops with no wait in process; Math. Oper. Res., 4:448-457, 1979.
- [Sah95] S. Sahni and G. Vairaktarakis. Dual criteria preemptive openshop problems with minimum makespan. Naval Research Logistics, 42(1):103-121, 1995.
- [Set 76] R. Sethi. Scheduling graphs on two processors. SIAM J. comput, 5:73-82, 1976.
- [Sim89] Simons, M. Warmuth. A fast algorithm for multiprocessor scheduling of unitlength jobs. SIAM J. Comput, 18:690-710, 1989.
- [Str99] V.A. Strusevich ; A heuristic for the two-machine open-shop scheduling problem with transportation times ; University of Greenwich, London, UK, 1999.
- [Tai93] E. Taillard. Benchmarks for basic scheduling problems. European Journal of Operations Resea-rch, 64, 1993.
- [Tit 92] Tittus M., Egardt B. - "Applyng object-oriented principles in control-systems design", *Proceedings of WRTP'92*, Bruges, 1992.
- [Tre96] D. Trentesaux, C. Tahon, HPACS; une approche égalitaire supervisée et interactive pour le pilotage adaptatif d'un système de production, Journées Ordonnancement Coopératif, Bordeaux, 1996.
- [Tre97] L. Trego, Factory layout and manufacturing simulation, Automotive Engineering, Vol. 105, No. 5, 1997, pp. 113-115.
- [Tri99] L. Triqui, F. Kherbouche, Z. Sari; Simulation d'un Système Automatisé de Stockage\Déstockage à Convoyeur Gravitationnel par Arena ; L.A.T, Université de Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [Wer91] D. de Werra, J. Blazewicz, and W. Kubiak. A preemptive open shop scheduling problem with one resource. Operations Research Letters, 10:9-15, 1991.
- [Wer92] D. de Werra and J. Blazewicz. Some preemptive open shop scheduling problems with a renewable or a nonrenewable resource. Discrete Applied Mathematics, 35:205-219, 1992.
- [Ye94] X. Ye, « Object oriented process simulation », ESM'94, Modelling and Simulation, Barcelona, Spain, June 1994, pp. 393-398.
- [Yin98] Ying-Chin; Machine layout whith a linear single-row path in an automated manufacturing system; Journal of manufacturing systems, Vol. 17 N°1 pages 1-22, 1998.

Annexes

- Etat de système :** L'état de système est caractérisé par la valeur de certains attributs et certaines variables (nombre de pièces dans un stock, nombre de moyens occupés). En cours d'évolution, les entités peuvent être engagées dans une activité (opération sur une machine, transport), soit en attente dans une file.
- Capacité (capacity) :** c'est le débit de sortie maximal pouvant être raisonnablement atteint contenue des différentes contrainte. C'est le taux de production maximum pour le cas d'un seul type de produit.
- Cohérence :** Caractéristique d'ensembles d'idées, de faits, de système, de sous- système ou d'éléments afin qu'ils forment un tout logique et que leurs actions ne soient pas en conflit.
- Coopération :** Pour des systèmes, fonctions ou personnes, fait d'agir conjointement pour mener à bien une activité, en ayant un objectif commun.
- Compétitivité :** La compétitivité consiste à présenter, à un instant donné, la meilleure offre qui résulte de la conjonction de la productivité avec la performance commerciale et la performance technique des produits. Aptitude d'une entreprise à donner à ses produits les avantages qui lui permettront de rester présente sur le marché et d'améliorer durablement ses positions.
- Conduite :** Elle se charge de la traduction de l'ordre de fabrication en une séquence d'instructions exécutables par une ressource.
- Contraintes cumulatives :** Elles sont liées à l'utilisation simultanée d'une même ressource par plusieurs tâches et indiquent que leur capacité est limitée.
- Contraintes disjonctives :** Spécifient que le traitement d'un ensemble de tâches sur la ressource disjonctive ne peut se faire simultanément au même instant.
- Contraintes physiques :** Spécifiant les caractéristiques limitant le fonctionnement de l'atelier, dues à l'organisation physique des moyens de production.
- Contraintes temporelles :** Elles regroupent les contraintes de précédences et de localisation temporelle.
- Les contraintes de précédences entre les tâches prennent en compte la succession des opérations de la gamme opératoire. Ces contraintes, indiquant que la date de début d'une tâche j doit commencer après la date de fin de réalisation de la tâche i ;
 - Les contraintes de localisation temporelle définissent l'intervalle de temps sur lequel la tâche doit être traitée. Cet intervalle est limité par les valeurs des dates de début au plus tôt et de fin au plus tard.
- Coût :** Charge ou dépense supportée par un intervenant économique par suite de la production ou de l'utilisation d'un produit ou de l'ensemble des deux. Il ne faut pas confondre le coût et le prix. Ce dernier est égal au coût majoré de la marge de l'entreprise.
- Cycle de vie d'un produit :** Le cycle de vie d'un produit est le temps qui s'écoule entre l'idée du produit jusqu' à sa destruction en passant par son installation chez le client. Il comprend les étapes suivantes : marketing, conception, industrialisation, fabrication, livraison, maintenance et recyclage.
- Décisions stratégiques :** relatives à la formation des politiques industrielles des investissements en capitaux et en moyens de production. Elles correspondent aux décisions politiques à long terme d'une entreprise, prises sur des horizons de plus de deux ans. Ces décisions sont prises à partir de données très agrégées et relèvent de la direction de l'entreprise. Ces décisions définissent la stratégie globale de l'entreprise (mission), et les moyens pour l'achever : choix des produits de l'entreprise, choix de la couverture géographique, définition des ressources nécessaires (capacités de production), définition des objectifs à atteindre, etc.
- Décisions tactiques :** ce sont les décisions prises à moyen terme. Elles assurent la liaison entre le niveau stratégique et le niveau opérationnel, garantissant ainsi la cohérence des actions menées. Ces décisions contrôlent la bonne adéquation des ressources disponibles et des charges engendrées par les commandes ou les prévisions, mais sans modification profonde de la structure et du fonctionnement de l'entreprise. Les

données sont elles aussi agrégées mais avec un niveau de détail plus fin que pour le niveau stratégique. Elles s'occupent principalement de la gestion d'agrégats des systèmes de production (planification de la capacité et négociation des délais avec les clients).

Décisions opérationnelles : concernent la gestion finie des systèmes de production (planification hebdomadaire). Ce sont les décisions prises à court terme et très court terme. Les données sont ici beaucoup plus détaillées. Elles assurent le lancement des activités et la flexibilité nécessaire à la bonne conduite de la production. L'ordonnement des opérations de fabrication sur les ressources et l'affectation des ouvriers sont, par exemple, des décisions opérationnelles.

En-cours ou stock d'encours :

Work-in-process: c'est le produit dans tout ses stades d'élaboration dans l'atelier, depuis les matières premières jusqu'au produit complètement terminé ;

In-process-inventory: ce sont les produits en cours de production;

Work-in-progress : ce sont les produits présent dans tout le système de production;

Facteur-clé de performance : Eléments qualifiant les outputs caractéristiques de chaque processus, système ou sous système et par rapport auxquels seront définis les objectifs locaux de succès (par exemple, ratio de tension des flux, temps de réponse à une demande, etc.). Ils se déduisent des indicateurs (globaux) de succès par « analyse des contributions » et se traduisent par des indicateurs locaux de succès.

Facteur-clé de progrès : Parmi les variables d'actions, celles qui influencent de manière significative la contribution de chaque activité à l'atteinte de la performance globale de l'entreprise. Ils résultent de l'analyse « cause- effets » des indicateurs de succès des processus. Ils se traduiront par des indicateurs de progrès dont les variables d'actions pourront elles-mêmes devenir facteurs de progrès de « niveau inférieur », etc.

Fiabilité : Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données et sur un horizon donné.

Flexibilité : Capacité des ressources à s'adapter en mix et / ou en volume pour permettre à l'entreprise de répondre à une sollicitation extérieure dans un temps donné. Voir aussi : réactivité.

Flux : Déplacement d'un ensemble d'éléments dans l'espace et dans le temps. En gestion industrielle, les trois grandes catégories d'éléments déplacés sont les décisions, les informations et les éléments physiques.

Gamme : Un document décrivant en détail la séquence d'opérations de fabrication, d'assemblage, d'inspection ou de transport nécessaires à la fabrication d'un composant produit fini.

Gammes libres : L'exécution des opérations est indépendante de l'ordre, il n'existe aucune contrainte de succession. Les gammes libres caractérisent les problèmes d'ordonnement du type Open Shop que nous définiront plus loin.

Gammes linéaires : L'ordre d'exécution des opérations est entièrement imposé et prédéterminé. Ce genre de gammes est présent dans le cas du job shop (chaque tâche à sa propre route à suivre autrement dit toutes les tâches ont des gammes prédéterminées mais non identiques) et celui du Flow Shop ou toutes les tâches ont le même chemin à suivre (la même route ou la même gamme).

Gammes mixte ou semi-linéaires : L'ordre d'exécution des opérations est partiellement déterminé, on trouve des tâches qui ont des gammes prédéterminées (on sait a priori la route à suivre par ces tâches), et d'autre non (on sait pas, a priori, la route à suivre par ces tâches)

Gammes techniques : Elles sont dues essentiellement au choix prédéterminé de certaines tâches à passer sur des machines spécifique.

Gestion de production sur commande : Concerne des produits généralement coûteux, spéciaux et unitaires. Ces produits ne sont pas disponibles immédiatement et nécessitent un délai de livraison dépendant du produit à réaliser.

Gestion de production sur stock : Concerne surtout les produits standard à large consommation. La quantité de production est souvent par lot de taille importante et dans ce cas on parle

de la production de masse. Un troisième type de gestion de la production existe, c'est un compromis entre les deux types de gestion précédents, appelé « *gestion de production mixte* », on le retrouve souvent dans le cas où les délais de livraison sont inférieurs à la durée du processus de fabrication.

Horizon : est l'intervalle de temps qui caractérise la validité de l'ensemble des décisions pour un niveau décisionnel donné.

Intégration : Action d'organiser ou d'arranger un ensemble d'activités discrètes en un processus le plus continu possible, par la suppression de cloisons ou d'activités sans valeur ajoutée. L'intégration est une notion fondamentale où *l'optimum* à atteindre est celui de l'entreprise (et non celui de chacune de ses fonctions) et où la relation entre les différentes fonctions devient une relation de coopération entre les acteurs de ces fonctions. L'intégration doit permettre la convergence des objectifs de chacune des fonctions vers les objectifs globaux de l'entreprise.

Indicateur : Un indicateur est un outil de gestion complexe qui comprend un ensemble d'informations :

- sa propre définition ;
- sa raison d'être : l'objectif stratégique auquel il se rattache, la cible chiffrée et datée qui lui est impartie, éventuellement des références comparatives, par exemple le résultat d'un benchmarking ;
- la désignation d'un acteur chargé de le produire (celui qui accède le plus facilement aux informations requises) ;
- la désignation d'un acteur responsable du niveau de l'indicateur (celui qui maîtrise le mieux le levier d'action correspondant) ;
- la périodicité de production et de suivi de l'indicateur ;
- sa définition extension : la formule et les conventions de calcul ;
- les sources d'information nécessaires à sa production (applications informatiques, bases de données, saisies manuelles) ;
- les modes de segmentation, pour décomposer une forme agrégée de l'indicateur en formes plus détaillées (par exemple : la segmentation géographique, décomposition par territoire, segmentation par type de marché, par lignes de produits, par centres de responsabilité, etc.) ;
- les modes de suivi (budgété, réel, écart budgété / réel, historique sur N mois, comparaison même période année antérieure, cumul depuis le début de l'année, etc.) ;
- le mode de présentation (chiffres, tableaux, graphiques, courbes, etc.) ;
- une liste de diffusion.

Indicateur de performance : (1) Un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise. (AFGI, AFNOR).

(2) Un indicateur de performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité des variables de décision par rapport à l'atteinte de l'objectif défini au niveau de décision considéré, dans le cadre des objectifs globaux de l'entreprise.

Indicateur de pilotage : Un indicateur de pilotage sert à la propre gouverne de l'acteur qui le suit, pour l'aider à piloter son activité. L'indicateur de pilotage doit guider une action en cours, et n'a pas nécessairement vocation à remonter aux niveaux hiérarchiques supérieurs pour permettre un contrôle a posteriori. Pour la plupart, les indicateurs de pilotage ne doivent pas remonter. En effet, si trop d'indicateurs remontent, les niveaux hiérarchiques supérieurs sont engorgés et perdent la vision de leurs propres objectifs. Les indicateurs de pilotage sont liés, soit au suivi d'actions en cours, soit à des points sur lesquels le responsable veut maintenir un état de vigilance en contrôlant régulièrement les résultats atteints. Il peut s'agir, selon le cas, d'un indicateur de suivi ou d'un indicateur de résultats.

Mesure : Evaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même espèce prise pour unité.

- Moyen d'action :** Ressource (temps, finances, méthodes, etc.) consacrée à l'action sur les variables d'actions.
- Nomenclature :** Liste structurée des composants et des matières nécessaires à la fabrication d'un composant ou produit. Elle codifie les articles et se présente soit sous la forme d'une arborescence (Nomenclature de fabrication), soit sous forme d'un index indenté (Nomenclature d'études).
- Objectif (1) :** C'est le résultat, la cible, que doit atteindre le système, le processus ou l'activité pilotée.
- Objectif (2) :** Un objectif traduit l'intention de passer de l'état de performance existant à l'état de performance souhaité pour le système physique piloté par le centre de décision. Cet objectif doit s'exprimer sous la forme d'un verbe exprimant la variation souhaitée associée à un domaine de performance. Lorsque l'objectif est quantitatif, l'état de performance souhaité sera quantifié. Lorsque l'objectif est qualitatif, la variation souhaitée sera exprimée sous la forme d'une tendance.
- Objectifs opérationnels :** Ils sont liés à l'activation des ressources et des processus opérants.
- Objectifs stratégiques :** Ils concernent l'évolution de l'entreprise, ses orientations et son positionnement dans son environnement.
- Objectifs tactiques :** Ils concernent la préparation des activités industrielles, en déployant la performance par processus.
- Opération :** Correspond à un travail à effectuer sur un poste de charge déterminé. Elle est définie par les ressources mises en œuvre, le temps de préparation (machine et main-d'œuvre), le temps opératoire unitaire (machine et main-d'œuvre) et les composants utilisés.
- Ordonnancement :** Il détermine d'abord les priorités de passage des travaux sur les ateliers (séquençement) et les différentes affectations temporelles des machines. En fait, cette sous-fonction est constituée d'une partie séquençement et d'une autre affectation. L'horizon peut être le court ou le moyen terme.
- Ordonnancement actif :** Dans un ordonnancement actif aucun glissement à gauche- local ou global n'est possible. Aucune tâche ne peut être commencée plus tôt sans reporter le début d'une autre.
- Ordonnancement semi actif :** Dans un ordonnancement semi actif, aucun glissement à gauche n'est possible. On ne peut avancer une tâche sans modifier la séquence sur la ressource.
- Ordonnancement admissible :** Un ordonnancement est dit admissible, s'il respecte les contraintes du problème (dates limites, précedence, limitation des ressources...). Nous parlons de glissement à gauche local lorsqu'on avance le début d'une tâche sans remettre en cause l'ordre relatif entre les tâches. Nous parlons de glissement à gauche global lorsqu'on avance le début d'une tâche en modifiant l'ordre relatif entre au moins deux tâches.
- Ordonnancement au plus tôt / au plus tard :** Le calcul de l'ordonnancement au plus tôt consiste à attribuer à chaque tâche j une date de début au plus tôt t_j compte tenu des dates de début au plus tôt t_i des tâches i qui précèdent j . Si l'on admet comme objectif, déterminer le projet au plus tôt, on peut déterminer symétriquement pour chaque tâche une date de début au plus tard t_j en calculant cette fois-ci la longueur des plus longs chemins entre tout sommet i et le dernier sommet (sommet Fin).
- Ordonnancement sans retard :** Dans cet ordonnancement, on ne doit pas retarder l'exécution d'une tâche si celle-ci est en attente et si la ressource est disponible.
- Performance (1) :** Synonyme d'action (anglais : *to perform*, ancien français « parformer », (Larousse).
- 1) Résultat obtenu par un athlète dans une épreuve, chiffre qui mesure ce résultat (Larousse).
 - 2) Réussite remarquable, exploit (Larousse).
 - 3) Résultat obtenu dans l'exécution d'une tâche (Larousse).
 - 4) Ensemble des indications chiffrées caractérisant les possibilités optimales d'un matériel (Larousse).

5) Est performance dans l'entreprise, tout ce qui, et seulement ce qui, contribue à améliorer le couple valeur- coût (*a contrario*, n'est pas forcément performance ce qui contribue à diminuer le coût ou à augmenter la valeur isolément).

6) Est la performance dans l'entreprise, tout ce qui, et seulement ce qui, contribue à atteindre les objectifs stratégiques.

(2) La performance représente le degré de réalisation des objectifs établis.

Résultat obtenu dans un domaine précis, par quelqu'un ou par une machine, un véhicule.

Performance externe : La performance externe représente le niveau de performance perçu par le client. Au niveau global, elle s'apparente à la compétitivité.

Performance globale : La performance globale représente le degré d'atteinte des objectifs globaux de l'entreprise.

Performance industrielle : C'est faire mieux que le « concurrent » (référence choisie pour la comparaison) sur le moyen et long terme, dans l'idéal sur un ensemble des paramètres définissant la performance, au minimum sur ceux des paramètres jugés être le plus significatifs de la satisfaction des clients

Performance interne : La performance interne s'apparente à la productivité.

Pertinence : Adéquation des moyens mis en œuvre aux objectifs recherchés.

Période : C'est l'intervalle de temps au bout duquel il est nécessaire de remettre en cause les décisions élaborées sur l'horizon considéré.

La planification : Elle détermine le plan directeur de production, compromis entre les objectifs commerciaux, financiers et de la production de l'entreprise. L'horizon de planification est souvent le moyen ou le long terme. Cette fonction est caractérisée surtout par un horizon temporel étendu et par un degré de finesse des informations traitées très générique.

Processus : (1) Ensemble d'activités séquences et finalisés par un objectif global et dont le résultat peut être matériel (produit) ou immatériel (information). Dans le cas d'informations, on parle également de « procédure ».

(2) Ensemble d'activités liées en vue d'atteindre un objectif commun (par exemple, ensemble des activités nécessaires à la facturation d'un client, à la fabrication d'un téléviseur, à la conception d'un nouveau produit, etc.). Les performances de ces activités liées sont souvent indépendantes. L'analyse par processus permet de mieux maîtriser une gestion transversale de l'entreprise (par exemple la gestion des projets, la gestion des commandes, etc.).

(3) Il correspond à tout changement dans le temps de matière, d'énergie ou d'information.

Production continue : Elle concerne tous les produits pour lesquels le processus de transformation de la matière première ne s'interrompt pas entre deux installations technologiques consécutives (machines,...). Ce mode de production est caractérisé par l'inexistence de stockage entre les postes de travail sauf parfois pour la régulation du flux, dans ce cas là, on parle souvent d'industries de process¹. Ces entreprises appartiennent principalement à la pétrochimie, la chimie lourde, la sidérurgie mais on en trouve également dans le secteur des industries alimentaires.

Production discrète : Il concerne les produits réalisés suivant un processus de fabrication pouvant être fractionné pour permettre de reprendre des produits semi-finis. Dans ce cas, la présence d'espaces de stockage entre ateliers (machines) est requise. On parle d'industries manufacturières et on cite à titre d'exemple les entreprises d'assemblages.

Production de masse : Elle concerne les produits standards qui sont fabriqués en très grande quantité et leur écoulement sur le marché est relativement facile par rapport au type de production unitaire qui n'est fabriqué que sur commande.

¹ Process : terme désignant des entreprises produisant des produits par opérations de fusion, de séparation ou de transformations chimiques

- Production par lot :** Le lot de fabrication peut être composé de quelques unités à plusieurs centaines d'unités, cela pose le problème de la fréquence des réglages de machines et des changements d'outils. Généralement, nous essayons de trouver une taille de lot acceptable, dans ce cas, nous parlons souvent de quantité économique de production. Ce type de production est souvent caractérisé par des temps de réglages machines importants entre les différents produits.
- Production unitaire :** Ce type de production concerne les produits singuliers et spécifiques (construction navale, ponts, bâtiments,...). Ce genre de produits est réalisé sur commande et nécessite un devis de production.
- Productique :** C'est l'ensemble des sciences et techniques ayant pour but d'obtenir le maximum d'efficacité des systèmes de production. Elle ne se limite donc pas à une technique ou à une méthodologie, c'est une approche globale.
- Productivité :** Un concept visant à engager le minimum de ressources afin de réaliser les produits répondant juste au besoin. C'est une mesure globale de l'efficacité de la production qui comprend deux facteurs : rendement (comment travaille une ressource) et utilisation (combien de temps elle est utilisée). La productivité est alors le produit du rendement par l'utilisation ou le *ratio* de la production réalisée sur le temps total prévu pour cette production.
- Produit :** Ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur pour répondre à son besoin, Le produit peut être ici un matériel, un service ou toute combinaison des deux, un processus industriel ou administratif (procédé, logiciel, procédure).
- Produits finis :** Ce sont les produits qui ont atteint un stade définitif dans le cycle de production.
- Projet :** Ensemble d'actions à réaliser pour satisfaire un objectif défini, dans le cadre d'une mission précisée, et pour réalisation desquelles on a identifié non seulement un début, mais aussi une fin. On distingue souvent les projets *ouvrage*, dont la finalité est d'obtenir un résultat considéré pour lui – même (ouvrage d'art, bâtiment, usine, navire, déménagement, etc.) et le projet *produit* dont la finalité est la mise au point d'un produit, qui fera par la suite l'objet d'une production répétitive, destinée à un marché (par exemple, automobile, électroménager, produit chimique ou pharmaceutique). Le premier est aussi appelé « projet d'ingénierie » ou « projet client » car il est destiné à un client unique, et le second « projet de développement » ou « projet marché ».
- programmation :** Elle établit un programme prévisionnel de production basé sur le plan directeur de production et sur l'état des stocks. L'horizon de ma programmation est souvent le très court terme (la semaine).
- Qualité (quality) :** C'est la conformité aux besoins.
C'est l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou d'un service qui lui confère l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites.
- La réactivité d'un système :** de production est définie comme l'aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, sollicitation, ...) par rapport au régime (fonctionnement) permanent (stable).
- Régulation :** Mode de fonctionnement d'un système lequel la grandeur réglée tend à se rapprocher d'une grandeur de référence et examine l'aptitude du système à effacer les perturbations.
- Reporting :** C'est l'action d'informer les niveaux hiérarchiques supérieurs de la performance d'un système ou d'une activité à un niveau hiérarchique donné.
- Ressource (1) :** Tout moyen à disposition d'une entreprise pour la production et la livraison d'un produit ou d'un service.
- Ressource (2) :** c'est un objet (par exemple une machine, un ordinateur, un lingot de métal) ou un service (par exemple le travail d'un ouvrier, une étude sous-traitée), porteur de valeur, consommé ou consommable par l'entreprise dans le cadre de l'un de ses processus. La consommation de la ressource est mesurable physiquement (heures, kilos) ou monétairement. La mesure monétaire d'une consommation de ressource est un coût.

- Ressources disjonctives** : (non partageables) principalement dans le cas de ressources renouvelables, sont des ressources qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois (machine outil, robot manipulateur, etc.). C'est le cas des ressources de notre problème.
- Ressources consommables** : Une ressource est consommable si elle devient non disponible après avoir été utilisée par une ou plusieurs tâches (matière première, budget, etc.), la consommation globale au cours du temps est limitée.
- Ressources cumulatives** (partageables) : sont des ressources qui peuvent être utilisées par plusieurs tâches simultanément (équipe d'ouvriers, poste de travail).
- Ressources doublements contraintes** : lorsque son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes les deux limitées (sources d'énergie, financement, etc.).
- Ressources renouvelables** : Une ressource est renouvelable si, après avoir été utilisée par une ou plusieurs tâches, elle est à nouveau disponible en même quantité (les hommes, les machines, l'espace, l'équipement en général, etc.). La quantité de ressource utilisable à chaque instant est limitée.
- La robustesse d'un système de production se définit par son aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'incertitudes dans le système.
- SADT** : Formalisme qui offre une représentation hiérarchique de la structure organisationnelle du système de production, et permet une description des processus décisionnels et opérants. Elle permet d'identifier les contraintes et de distinguer les flux d'information et les flux des composants en tenant compte des interactions entre le système physique et le système de pilotage.
- Stratégie d'entreprise** : La stratégie d'entreprise est l'ensemble des décisions et des actions relatives aux choix des moyens et l'articulation des ressources en vue d'atteindre les objectifs globaux de l'entreprise.
- Système (1)** : Ensemble d'éléments en interaction organisés en fonction d'un but et en relation avec un environnement.
- Système (2)** : Totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité. Ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but.
- Système de décision** : Le système de décision est composé d'un système décisionnel périodique et d'un système décisionnel événementiel. Il est composé des moyens et des hommes qui contribuent à la prise de décisions pour conduire le système physique.
- Système à états discrets** : est constitué d'un ensemble d'objets ou d'entités, comme les moyens, les pièces, les matières premières. Une entité est caractérisée par des attributs fixes ou variables, exemple : nom du produit, date d'arrivée, indice de priorité.
- Système d'indicateurs de performance** : Ensemble cohérent d'indicateurs de performance déployés et répartis uniformément sur l'ensemble des fonctions du cycle de vie du produit et sur l'ensemble des niveaux décisionnels.
- Système d'information** : est l'ensemble des ressources techniques dont l'objectif est de stocker, le traitement et la mise à disposition de toutes les informations nécessaires au fonctionnement du système physique.
- Système pilotage** : est l'ensemble des ressources humaines et techniques dont l'objectif est la conduite du système physique. Il est composé du système de décision et du système d'information.
- Système physique** : est l'ensemble des ressources humaines et techniques dont l'objectif est de transformer des entrants (matière, information, etc) en produit ou prestations.
- Tâches** : Une tâche est une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début t_i ou de fin c_i , dont la réalisation est caractérisée par une durée d_i et un traitement p_i (si i n'est pas interrompue alors $c_i = t_i + p_i$) et par l'intensité a_i^k avec laquelle elle consomme certains moyens k , ou ressources. Pour simplifier, on supposera que pour chaque ressource requise, cette intensité est constante durant l'exécution de la tâche.

Taux de production ou cadence de production : (production rate, throughput). C'est la quantité de produit fabriqué par unité de temps. Si le système produit plusieurs types de produits, alors le taux de production est donnée sous forme de vecteur.

Temps de cycle (throughput time, cycle time) : c'est le temps compris entre l'arrivée de la matière en production et la sortie du produit fini. C'est le temps moyen que passe un produit dans le système de production.

Temps d'attente (queue time, waiting time) : c'est le temps pendant le quel un produit, ou un lot de produit, reste devant un poste de charge avant d'être transféré au poste suivant.

Temps de changement (setup time) : c'est le temps nécessaire pour passer de la fabrication d'un article à un autre dans une unité de production donnée.

Temps d'exécution (processing time) : c'est le temps pendant le quel un produit subit une transformation lui conférant une valeur ajoutée.

Temps de transfert (move time) : C'est le temps que met un lot de produits pour se déplacer d'une opération à une autre.

Traçabilité : permet d'identifier l'étape du processus où s'est produite la défaillance, ainsi que le(s) responsable(s) de cette défaillance.

Valeur :

- (1) La valeur représente ce quoi le client paye.
- (2) Jugement porté sur le produit par l'utilisateur sur la base de ses attentes et de ses motivations, exprimé par une grandeur qui croît lorsque, toutes les choses égales par ailleurs, la satisfaction du besoin de l'utilisateur augmentant et /ou que la dépense afférente au produit diminue. Ce jugement résulte d'une observation objective, le jugement porté par l'utilisateur en fonction de l'utilité qu'il retire du produit (la valeur d'usage) et d'une évaluation subjective, la considération affective que l'utilisateur attache au produit (valeur d'estime) . Lorsqu'il n'est pas ou pas encore possible de connaître les attentes et motivations de l'utilisateur même, elles sont exprimées par ceux qui ont mission de le représenter. Elle s'apparente au « rapport qualité/prix ». Cette relation traduit le caractère à la fois fonctionnels et économique de la démarche. Par « dépense afférente au produit », on peut entendre soit le coût d'acquisition (prix + dépenses annexes) ou le coût global, considéré par l'acheteur ou l'utilisateur, soit le coût considéré par l'industriel.

Valeur ajoutée : Augmentation de la valeur d'un produit pendant son processus de production, depuis le moment où ses composants sont réceptionnés jusqu' à sa mise à disposition au client.

Valeur ajoutée client : Qualité supplémentaire d'un produit reconnue et appréciée par le client. « Ce pourquoi le client paye ».

Variable d'action : Ce sont les variables sur lesquelles les acteurs du système agissent pour atteindre les objectifs.

Variable de décision : Une variable de décision est une entité qui agit sur une activité du système conduit afin de faire évoluer la performance de l'activité dans le sens du ou des objectif (s). La variable de décision a toujours une latitude finie qui dépend des contraintes imposées au décideur.

1. Approche (logique) orientée événements (event scheduling)

La logique orientée événements discrets consiste à répertorier les différents types d'événements (généralement inconditionnels) et à décrire la procédure de changement d'état correspondante au déclenchement de chaque type d'événement. Aucune modification n'est censée avoir lieu entre l'occurrence de deux événements successifs. Les événements sont ordonnés dans un échéancier selon l'ordre chronologique de leur date d'occurrence. La simulation évolue dans le temps en se déplaçant d'un événement à un autre en exécutant la logique concernée. *SIMSCRIPT* et *GASP IV* sont deux langages orientés événements. Cette logique convient bien aux systèmes dont les composants sont relativement indépendants, c'est à dire qu'il existe peu de conditions à tester pour déterminer si un événement doit avoir lieu [Hoo82]. En effet, du fait que certains types d'événements sont générés par d'autres événements, le modèle peut devenir difficile à maintenir. C'est en partie, pour cette raison que cette logique a perdue de sa « popularité ».

2. Approche (logique) orientée activités (activity scanning)

C'est une logique duale de la précédente. Elle consiste à recenser les différents types d'activités et à décrire les procédures de changement d'état correspondant aux conditions de début et de fin de chaque type d'activité. Pendant la simulation, les procédures décrivant les conditions de début et de fin sont vérifiées par intervalle de temps fixe ou variable. Les activités ayant les conditions vérifiées, sont ainsi enclenchées ou arrêtées. Si cette technique est plus simple que la précédente, elle s'avère moins efficace, car à un instant donné, une procédure peut être testée sans que les conditions de début ou de fin de l'activité ne soient vérifiées. Cette technique est adaptée aux systèmes dans lesquels les composants sont fortement dépendants [Eva88]. Certaines approches, combinées activités / événements, ont été développées pour pallier ces inconvénients, par exemple l'approche trois phases ou ABC.

3. Approches orientées opérations : analyse structurée (diagramme de flux de données)

Ces approches raisonnent en termes d'applications : elles partent des besoins ou résultats à obtenir pour en déduire les données d'entrée nécessaires à cette application. Les limites de cette approche : redondance de données identiques pour différents traitements, risque d'incohérence de ces mêmes données connues de façon différentes en plusieurs endroits du système. On note encore que le modèle obtenu est peu évolutif, car est spécifié pour les besoins du moment. En conclusion, ces approches sont dans l'incapacité de définir un schéma de base de données.

4. Approche orientée données : Entité / Association

Contrairement à la famille précédente, ces modèles explicitent des niveaux d'abstraction dans la représentation : ce sont des méthodes conceptuelles. Apparues vers le milieu des années 60, elles définissent une structure générale de données, indépendante de programmes qui les manipulent. Cette approche figure également dans les principes fondateurs des bases de données.

Elle s'intéresse aux aspects structurels et informationnels. Les limites de cette approche sont : elle n'intègre pas les aspects dynamiques, le modèle étant par définition statique ; les conditions de déclenchement, l'ordonnancement dans le temps des contraintes opératoires sont difficilement représentables. Parmi ces approches on peut citer, par exemple, la méthode NIAM.

5. Approches orientées comportement : REMORA - J.S.D.

Elles présentent l'avantage de représenter les contraintes de dynamique et d'évolution dans le temps. Ces approches privilégient cependant ensuite soit l'aspect données (méthode REMORA), soit l'aspect traitements (méthode J.S.D.) et se heurtent aux mêmes difficultés que celles précédemment citées.

6. Approches combinées : MERISE - SADT

Ces méthodes prennent bien en compte les aspects traitement et données, mais de façon séparée. MERISE utilise l'approche entité (association pour modéliser les données et conçoit le modèle de traitement à l'aide d'un formalisme largement inspiré de réseaux de Pétri). La méthode conseille de réaliser les deux études par deux équipes séparées. SADT, quant à elle, permet de décrire les processus qui conduisent à générer ou à modifier les données du système étudié. Elle permet de spécifier les actions ou traitements que subissent les données du système et ainsi, de décrire les processus de décision reposant sur la nature des données, traduisant l'état du système. Des adaptations de SADT ont permis de développer une méthode temps réel SA-RT.

7. Approches orientées objet

Les méthodes relatives aux approches citées ci-dessus privilégient systématiquement soit l'aspect données soit l'aspect traitement, mais les deux aspects ne sont jamais pris en compte de façon simultanée. Pour aller dans ce sens, l'approche objet tend à définir une structure permettant de rassembler ces deux points de vue.

L'approche orientée objets est de plus en plus répandue dans le développement des systèmes [Boo91]. Le système est décrit par un ensemble d'objets qui communiquent par envoi de messages. La modélisation orientée objets se fait en deux étapes : la première concerne la définition de la structure du système par la spécification des objets (attributs) et la seconde concerne la définition du comportement dynamique du système en précisant les relations entre objets ainsi que leur fonctionnement propre (méthodes). Grâce à ses propriétés de réutilisabilité, de localité des données, l'approche objet est adaptée à la problématique de l'étude des systèmes de production.

En effet, les mécanismes objet tels que l'abstraction, l'encapsulation, la modularité, la classification, l'agrégation et l'héritage [Boo93] permettent de définir une méthodologie s'appuyant sur des variations mineures d'entités préétablis et de les adapter au besoin du système étudié. L'intérêt d'une telle approche réside également dans le fait que l'utilisation des techniques objet lors du processus de conception nous assure une plus grande indépendance vis à vis d'éventuelles

modifications ou évolutions de l'environnement externe du système. En effet, les propriétés de forte cohésion et de faible couplage entre objets, du modèle ou de l'environnement, assurent une évolutivité plus aisée.

Un objet dénote un concept, et il est défini comme une collection de propriétés structurelles (attributs) et procédurales (méthodes) décrivant son état et les opérations qu'il est capable d'exécuter [Mor95]. Considéré comme une abstraction d'un élément du monde réel, l'objet correspond à une entité structurante du système. Il est donc une description d'une entité, qui souligne certains détails et propriétés de celle-ci, tout en supprimant d'autres détails.

La communication entre les objets s'effectue par l'envoi et la réception des messages. Un objet envoie un message vers un autre objet, afin de lui demander l'enclenchement d'une de ses méthodes. L'objet destinataire du message exécute la méthode qui lui est demandée. Suite à l'exécution de la méthode, l'objet change son état par la modification de ses attributs.

Une qualité principale de l'approche objet est sa capacité d'intégration des informations. En effet, il est possible d'intégrer dans la même modélisation des variables quantitatives, des équations et des comportements fondés sur des règles de la logique, grâce au mécanisme de polymorphisme. Celui-ci permet la définition des procédures polymorphes, c'est-à-dire des procédures différentes qui seront exécutées en fonction de l'état courante du système. Il est aussi très facile d'intégrer des modifications par la correction des méthodes de l'objet. Celle-ci n'entraîne pas des modifications au niveau du modèle global du système, car les autres objets ne connaissent pas l'implémentation de la méthode mais seulement son identificateur.

L'utilisation de l'approche objet pour la conduite des systèmes de production implique une structuration hiérarchique du système [Tit92], en le décomposant en plusieurs niveaux. Le fonctionnement de chaque niveau est supervisé et coordonné par le niveau qui lui est hiérarchiquement supérieur. Les décisions se prennent au niveau supérieur pour tous les niveaux qui lui sont subordonnés.

La démarche de modélisation par objet a pour objectif de définir les objets du système de production identifiés lors du processus de conception. Une première étape correspond à la définition des entités génériques ou objets abstraits qui constitueront la bibliothèque initiale de composants. Ensuite, par l'exploitation des entités génériques, l'utilisateur de la méthode pourra adapter les modèles proposés à son besoin, en définissant de cette manière l'architecture de conduite du système de production considéré.

Cependant, à un système orienté objet, il manque un mécanisme de haut niveau permettant le contrôle des envois de messages dans le temps (comportement dynamique). L'un des avantages de l'approche orientée objets est la combinaison des avantages des langages généraux (flexibilité et champ d'application larges) avec les avantages des outils spécialisés (objets paramétrables et construction simple des modèles).

Tableaux 1 : Les Modules SIMAN (Blok et Elements)

Modélisation	Processus (Blocs)		Déclaration et paramétrage (ELEMENTS)		Animation (Objets Animés)	
TABLEAU DE BORD						
Rapport de simulation			REPORTS REPORTSLINES PROJECT REPLICATE	Rapport de simulation personnalisé. Contenus de ces rapport personnalisé. Titre et auteur du projet de simulation. Durée simulation, nombre de répliation.		
Générateurs aléatoires			SEEDS	Initialisation des germes		
INTERFACE						
Fichiers du modèle	BEGIN	Nom et génération du fichier processus	BEGIN	Nom et génération du fichier paramètres		
Insertion sous-modèle	INCLUDE	Fichier processus	INCLUDE	Fichier paramètre		
Ficiers de données	READ WRITE CLOSE	Lecture Ecriture Fermeture	FILES			
Evénement utilisateur	EVENT	Déclenchement				
Modèles continus			CONTINUOUS EVENTS	Déclenchement d'un événement utilisateur		
Code utilisateur	VBA	Exécution de code Visual Basic				
Visualisation d'entités	STORE UNSTORE	Entrée dans un emplacement Sortie d'un emplacement	STORAGES	Emplacement dans lesquels apparaissent les entités pendant l'exécution des blocs DELAY, MOVE, PREEMPT ou REQUEST	STORAGE	
Animation					PROMOTE PATH	Récupération des plans réalisés par des progiciels de CAO/DAO
Mise au point	TRACE		TRACE			
Modèle temps réel			TASKS			
VARIABLES D'ETAT ET DONNEES UTILISATEUR						
Dimensionnement			DISCRETE	(obsolète ; à remplacer par ATTRIBUTES, QUEUS et/ou STATIONS)		
Entités			PICTURES	Pictogramme associé aux entités	ENTITY	
Date courante	(*) MARK				CLOCK DATE	Hh :mm :ss Jj :mm :aa
Variables utilisateurs			ATTRIBUTES VARIABLES STATICS RECIPES LEVELS RATES	Attributs Variables globales Variables globales liées aux stations Structures formée de variables STATICS Variables d'état continues Dérivées des variables d'état continues		

			NICKNAMES	Alias de variables, attributs, identificateurs		
Initialisation			INITIALIZE	Initialisation des variables utilisateur, de J, M, NS et IS		
Affectation	ASSIGN (*) MARK FINDJ SEARCH	Attribut ou variable Affectation de la date courante Indice satisfaisant une condition Entité satisfaisant une condition				
Expressions			EXPRESSIONS		VARIABLE LEVEL HISTOGRAM PLOT GLOBAL	Valeur Niveau Distribution Trace Pictogrammes
			DISTRIBUTIONS	(obsolète : à remplacer par expressions)		
Tables de valeurs			TABLES			
Ensembles indexables			SETS			
Fonctions aléatoires			PARAMETERS			
Règles de sélection			RULES	Règles utilisées dans les blocs ALLOCATE, REQUEST, SELECT, PICKQ, QPICK		
GENERATION ET DESTRUCTION D'ENTITES						
Création d'entité	CREATE DETECT		ARRIVALS	Base temporelle		
Duplication d'entité	DUPLICATE COPY BRANCH					
Destruction d'entité	DISPOSE *DISPOSE					
FLUX						
Attente déplacement	DELAY	Pendant une durée Cf. Ressources			STORAGE	
Contrôle	IF ELSE ELSEIF ENDIF WHILE ENDWHILE *NEXT BRANCH	Condition Itération Branchement Duplication conditionnelle/probabiliste				
Repture	*DETACH					
sélection	QPICK PICKQ SELECT	File d'attente amant File d'attente aval Ressource interchangeable				
Point d'entrée	STATION		STATIONS		STATION PARKING	
			SEQUENCES	Liste des stations à visiter (gammes)		
FILE D'ATTENTE						

Attente d'événement	QUEUE		QUEUES RANKING	Relation d'ordre (sur un ensemble de files)	QUEUE	
Entrée	INSERT	A un rang donné				
Extraction	REMOVE PICKUP ZAP	Extraction d'une file d'attente Ajout au groupe déclenchant Extraction de l'échéancier				
Sortie : - Regroupement - Réquisition - synchronisation		cf. Groupes cf. Ressources cf. Synchronisation				
GROUPE						
Regroupement	COMBINE GROUP	Groupe permanent Groupe temporaire				
Eclatement	DROPOFF SPLIT	Partiel Total				
SYNCHRONISAION						
Avec files d'attente : - Sortie - Libération	MATCH SCAN WAIT SIGNAL	Entités de même classe Entités vérifiant une condition Réception d'un signal Emission de signal				
Avec arrêts	PROCEED BLOCK UNBLOCK	Entrée dans un arrêt Ajout de bpoints d'arrêt Retrait de points d'arrêt	BLOCKAGES			
RESSOURCES ET MOYEN DE MANUTENTION						
Ressources, moyens de transport et réseaux		Ressource Convoyeur Transporteur Transporteur guidé	RESSOURCES SCHEDULES STATESETS CONVEYORS SEGMENTS TRANSPORTERS DISTANCES INTERSECTIONS LINKS NETWORKS REDIRECTS	Ressource simple Dimensionnement dynamique Liste des états d'une ressource Convoyeur Réseau convoyeur Transporteur Réseau transporteur libre Intersections Lien entre les intersections Ensemble de liens d'un réseau Chemins particuliers	RESOURCE TRANSPOTTER DISTANCE INTERSECTION PARKING NETWORK LINK	Transporteurs disponibles
(Dés-)Activation - Ressource - Convoyeur - Transporteur	ALTER START STOP ACTIVATE HALT					
Réquisition : - Ressource - Convoyeur - Transporteur	SEIZE PREEMPT ACCESS REQUEST	Ressource simple Ressource préemptible Convoyeur Transporteur			SIEZE STORAGE STORAGE	Entité ayant requis la ressource Entité préemptée

	ALLOCATE CAPTURE	Transporteur (sans déplacement) Zones (transporteur guidé)				Entité en attente du transporteur
Déplacement : - Sans moyen - Convoyeur - Transporteur	ROUTE CONVEY TRANSPORT MOVE				ROUTE STORAGE	Il suffit de représenter les réseau
Libération : - Ressource - Convoyeur - Transporteur	RELEASE EXIT FREE RELINQUISH	Ressource simple Convoyeur Transporteur Zones (transporteur guidé)				
pannes			FAILURES	Pannes et temps de réparation des ressources		
STATISTIQUES						
Statistiques/temps			CSTATS DSTATS	Variables continues Variables discrètes		
Expressions			OUTPUTS			
Fréquences			FREQUENCEIES			
Compteurs	COUNT		COUNTERS			
Observation	TALLY	Statistique/ nombre d'entités	TALLIES			

Tableau 2 : les Modules d'ARENA 7.1

Processus (Flowchart)		Déclaration et paramétrage (Data module)	
BASIC PROCESS			
CREATE	C'est un module de création d'entités. Il est prévu comme point de départ des entités dans un modèle de simulation. Le type d'entité y est indiqué.	ENTITY	définir les divers types d'entité et leurs images initiales dans une simulation (déclarations).
DISPOSE	Ce module est prévu comme point final pour des entités dans un modèle de simulation.	QUEUE	Déclaration des files d'attente et leurs règles d'ordonnement.
PROCESS	Modélise les ressources ainsi que les durées opératoires associées ou tout autre traitement de l'entité .	RESSOURCE	Déclaration des ressources utilisées dans le système.
DECIDE	Modélise la prise de décision au niveau d'un point donnée du système et permet de tester des expressions, des valeurs de variables....	VARIABLE	Déclaration des variables
BATCH	Modélise l'assemblage de deux entités ou plus, mettre des entités en paquet ou en lot	SCHEDULE	ce module est utilisé en association avec <i>Ressource</i> pour définir un programme de fonctionnement d'une ressource ou avec le module de <i>Create</i> pour définir un programme d'arrivée des entités.
SEPARATE	Permet le désassemblage d'un lot ou un paquet d'entités ou la duplication d'entité (par exemple, un ordre pour un traitement parallèle)	SET	Déclaration des divers ensembles utilisés dans la simulation : ressources, entités, conteurs....
ASSIGN	Permet d'affecter différents variables et attributs aux l'entités créées.		

RECORD	Ce module est utilisé pour recueillir des statistiques dans le modèle de simulation.		
ADVANCED PROCESS			
DELAY	Modélise des temps d'attente de l'entité qu'on prescrit dans le module.	ADVANCED SET	Ce module indique des ensembles de file d'attente, de stocks et d'autres ensembles et leurs membres respectifs
DROPOFF	Ce module enlève un nombre d'entités donné d'un groupe d'entités et les envoie à un autre module, selon un raccordement graphique	EXPRESSION	Ce module définit les expressions et leurs valeurs associées.
HOLD	Ce module garde une entité dans une file d'attente en attendant un signal donné (vérification d'une condition) ou jusqu'à ce qu'elle soit déplacée par un module <i>Remove</i> .	FAILURE	Déclaration des pannes des ressources.
MATCH	Les entités reçues aux deux entrées de ce module en sortent ,	FILE	Déclaration des fichiers utilisés par le module ReadWrite.
PICKUP	Ce module enlève un certain nombre d'entités consécutives d'une file d'attente donnée démarrant à un rang indiqué dans la file d'attente.	STATE SET	Ce module est utilisé pour définir des états pour une ressource ou un nombre de ressources.
READWRITE	Permet la lecture ou l'écriture d'un fichier externe.	STATISTIC	Ce module est utilisé pour définir les statistiques additionnelles qui doivent être rassemblé pendant la simulation et spécifier les fichiers Output.
RELEASE	Modélise la libération d'une ressource par une entité.	STORAGE	Déclaration des srock.
REMOVE	Ce module enlève une entité donnée d'une position donnée dans une file d'attente et l'envoie à un module indiqué.		
SEIZE	Ce module affecte une ressource à une entité		
SEARCH	Ce module recherche une file d'attente, un groupe (Batch), ou une expression pour trouver l'entité (pour des entités dans une file d'attente ou un groupe) ou la valeur de la variable globale <i>J</i> qui satisfait condition de recherche indiquée		
SIGNAL	Ce module envoie une valeur de signal à chaque module de Hold ou un block Wait afin de libérer les entités retenues.		
STORE	Ce module met les entités en stock.		
UNSTORE	Modélise l'action de déstockage d'une entité.		
ADVANCED TRANSFERT			
ENTER	Ce module définit une station correspondant à un endroit physique ou logique où le traitement se produit.	SEQUENCE	Définit les gammes opératoires associées aux entitée (pièces à produire).
LEAVE	Transférer une entité vers une station ou à un module.	CONVEYOR	Modélise un convoyeur
PICK STATION	Ce module permet à une entité de choisir une station	SEGMENT	Modélise le circuit physique associé au convoyeurs (animation).

	particulière parmi plusieurs stations données selon une logique de sélection spécifiée par le module.		
ROUTE	Transférer une entité à une station indiquée, ou la prochaine station selon sa gamme opératoire. Les durées de transférer peuvent être définies.	TRANSPORTER	Modélise des transporteurs.
STATION	Marquer le passage des entités et accéder aux prochain module.	DISTANCE	Modélise le circuit physique associé aux transporteurs (animation).
ACCESS	Modélise l'accès de l'entité au convoyeur.	ACTIVITY AREA	Ce module représente un secteur qui peut être associé à une ou plusieurs stations. Ces secteurs sont employés pour recueillir des statistiques liées à une station.
CONVEY	Modélise l'action de convoyage de l'entité.		
EXIT	L'entité quitte le convoyeur		
START	Activer un convoyeur inactif		
STOP	Désactive un convoyeur opérationnel		
ACTIVATE	Activer un transporteur inactif		
ALLOCATE	Assigner un transporteur à une entité sans le déplacer vers elle.		
FREE	Modélise le déchargement d'un transporteur.		
HALT	Désactive une unité transporteur.		
MOVE	Modélise le déplacement d'un transporteur d'une destination à une autre.		
REQUEST	Modélise l'accès de l'entité au transporteur.		
TRANSPORT	Modélise l'action de transport de l'entité		
REPORT			
		ACTIVITY AREAS	Rapporte des statistiques de temps et de coût pour des secteurs d'activité. Les valeurs calculées et montrées sont classées par catégorie d'abord par différentes répliques. Chaque réplique contient une section récapitulative suivie d'une ou plusieurs sections de détail.
		CATEGORY OVERVIEW	Le rapport de vue d'ensemble de catégorie est organisé en sections suivantes : key performance indicators, activity area (level n), conveyor, entity, process, queue, resource, transporter, station, and user specified. Les statistiques rapportées sont récapitulées à travers toutes les répliques. L'information rapportée change selon le nombre de répliques exécutées et le type de statistique.
		CATEGORY BY REPLICATION	Ce rapport est décomposé en sections selon les répliques. Les valeurs calculées et montrées sont pour différentes répliques. Les statistiques pour chaque réplique sont organisées en sections primaires suivantes : conveyor, entity, process, queue, resource, system, transporter, station, activity area, et user specified.
		ENTITIES	Rapporte toutes les statistiques liées aux entités circulans dans le système : temps d'attentes....
		FREQUENCIES	Rapporte la fréquence temps-suivi d'états d'une expression-ressource

			dans des limites définies par l'utilisateur.
		PROCESSES	Rapporte toutes les statistiques liées aux traitement des entités sur les ressources du système.
		QUEUES	Rapporte toutes les statistiques liées aux durées d'attentes des entités dans les files d'attente du système.
		RESSOURCES	Rapporte toutes les statistiques liées aux ressources du système.
		TRANSFERS	Rapporte toutes les statistiques liées aux transfert des entités dans le système. Pour chaque réplique rapporte les statistiques de manutention selon deux groupes : Convoyeurs et transporteurs.
		User's Specified	affichages des statistiques définies par l'utilisateur dans les modules record et variables du panneau Process Panel, ainsi que le module statistics du panneau Advanced Process.
		Agents and trunks	Ce rapport est décomposé par réplique. Les valeurs calculées et montrées sont pour différentes répliques. Chaque réplique est cassée dans deux sections : Trunk Summary and Agent Summary. Trunk Summary est divisé en deux groupes : Utilisation et coût. les statistiques sont rapportées pour chacun des groupes. Chaque groupe montre une valeur pour chaque tronc défini dans le système. Agent Summary est divisé en trois groupes : Utilisation, coût, et utilisation d'arrivée et en partance. les statistiques sont rapportées pour chacun des groupes. Chaque groupe montre une valeur pour chaque parent et groupe d'agent défini dans le système.
		Contact Times and Counts	Ce rapport est décomposé par réplique. Les valeurs calculées et montrées sont pour différentes répliques. Chaque réplique est divisée en trois sections : Temps d'appel, comptes d'appel, et autre données d'appel.
		Manufacturing Orders	

Les déclaration :

PROJECT, "Cellule flexible d'assemblage"
Project", "Client",,,,No,Yes,Yes,Yes,Yes,No,Yes,Yes,Yes;

ATTRIBUTES: Piece Index:

TimeIn:
Time Out:
__ActionLabel:
DO:
DO1:
DO2:
DO3:
NBE:
DO4:
Palette #;

STORAGES: FAE:

FAS1:
FAS2:
FAS3:
FAS4;

VARIABLES: Process

4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process 2.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
Exclude"):
Process 4.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
Exclude"):
Process
4.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
2.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
2.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
4.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process 1.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
Exclude"):
SORTIE.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process 3.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
Exclude"):
Process
2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
NumberOut,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-
User Specified"):
Process
3.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
1.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
3.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Process
1.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Palette_N;

QUEUES: FAE1,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

FAE2,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
FAE3,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
FAE4,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

PICTURES: Picture.Airplane:

Piece3.Report:
Picture.Green Ball:
Picture.Blue Page:
Piece1.Report:
Picture.Telephone:
Picture.Blue Ball:
Picture.Yellow Page:
Picture.EMail:
Picture.Yellow Ball:
Picture.Bike:
Picture.Report:
Picture.Van:
Picture.Widgets:
Picture.Envelope:

Picture.Fax:
Piece4.Report:
Picture.Truck:
Piece2.Report:
Picture.Letter:
Picture.Box:
Picture.Woman:
Picture.Package:
Picture.Man:
Picture.Diskette:
Picture.Boat:
Picture.Red Page:
Picture.Green Page:
Picture.Red Ball;

RESOURCES:

Robot1,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AU
TOSTATS(Yes,,):

Robot2,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AU
TOSTATS(Yes,,):

Robot3,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AU
TOSTATS(Yes,,):

Robot4,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AU
TOSTATS(Yes,,):

STATIONS: 1,Sortie,,,Sortie,AUTOSTATS(Yes,,):

2,Entree,,,AUTOSTATS(Yes,,):
3,Entree1,,,AUTOSTATS(Yes,,):
4,Sortie1,,,AUTOSTATS(Yes,,):
5,Entree2,,,AUTOSTATS(Yes,,):
6,Sortie2,,,AUTOSTATS(Yes,,):
7,Entree3,,,AUTOSTATS(Yes,,):
8,Sortie3,,,AUTOSTATS(Yes,,):
9,Entree4,,,AUTOSTATS(Yes,,):
10,Sortie4,,,AUTOSTATS(Yes,,):
11,Cellule1,,,AUTOSTATS(Yes,,):
12,Cellule2,,,AUTOSTATS(Yes,,):
13,Cellule3,,,AUTOSTATS(Yes,,):
14,Cellule4,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point13,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point1,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point2,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point3,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point4,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point5,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point6,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point7,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point8,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point9,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point10,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point11,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point12,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point14,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point15,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point16,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point17,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point18,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point19,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point20,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point21,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point22,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point23,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point24,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point25,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point26,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point27,,,AUTOSTATS(Yes,,):
point28,,,AUTOSTATS(Yes,,):

DISTANCES: ConvoyeurCentral.Dis,Sortie-Entree-1,Entree-Sortie-
449,Entree-Entree1-48,Entree-Entree2-198,Entree-Entree3-318,
Entree-Entree4-448,Entree1-Entree-452,Entree1-Sortie1-
2,Entree1-Entree2-150,Entree1-Entree3-270,Entree1-Entree4-
400,Sortie1-Sortie-449,Sortie1-Entree-450,Sortie1-Entree1-
498,Sortie1-Entree2-148,Sortie1-Entree3-268,Sortie1-
Entree4-398,Entree2-Entree-302,Entree2-Entree1-
350,Entree2-Sortie2-2,Entree2-Entree3-120,Entree2-Entree4-250,
Sortie2-Sortie-299,Sortie2-Entree-300,Sortie2-Entree1-
348,Sortie2-Entree2-498,Sortie2-Entree3-118,Sortie2-Entree4-

248,Entree3-Entree-182,Entree3-Entree1-230,Entree3-Entree2-380,Entree3-Sortie3-2,Entree3-Entree4-130,Sortie3-Sortie-179,Sortie3-Entree-180,Sortie3-Entree1-228,Sortie3-Entree2-378,Sortie3-Entree3-498,Sortie3-Entree4-128,Entree4-Entree-52,Entree4-Entree1-100,Entree4-Entree2-250,Entree4-Entree3-370,Entree4-Sortie4-2,Sortie4-Sortie-49,Sortie4-Entree-50,Sortie4-Entree1-98,Sortie4-Entree2-148,Sortie4-Entree3-368,Sortie4-Entree4-498,Entree1-Cellule1-5,Cellule1-Sortie1-3,Entree2-Cellule2-5,Cellule2-Sortie2-3,Entree3-Cellule3-5,Cellule3-Sortie3-3,Entree4-Cellule4-5,Cellule4-Sortie4-3,Point1-Entree-2,point2-Entree-3,point3-Entree-4,point4-Entree-5,point5-Entree-6,point6-Entree-7,point7-Entree-8,point8-Entree-9,point9-Entree-10,point10-Entree-11,point11-Entree-12,point12-Entree-13,point13-Entree-14,point14-Entree-15,point15-Entree-16,point16-Entree-17,point17-Entree-18,point18-Entree-19,point19-Entree-20,point20-Entree-21,point21-Entree-22,point22-Entree-23,point23-Entree-24,point24-Entree-25,point25-Entree-26,point26-Entree-27,point27-Entree-28,point28-Entree-29;

TRANSPORTERS: Palette,20.DISTANCE(ConvoyeurCentral.Dis),1.--,STATION(Point1)-Active,STATION(point2)-Active,STATION(point3)-Active,STATION(point4)-Active,STATION(point5)-Active,STATION(point6)-Active,STATION(point7)-Active,STATION(point8)-Active,STATION(point9)-Active,STATION(point10)-Active,STATION(point11)-Active,STATION(point12)-Active,STATION(point13)-Active,STATION(point14)-Active,STATION(point15)-Active,STATION(point16)-Active,STATION(point17)-Active,STATION(point18)-Active,STATION(point19)-Active,STATION(point20)-Active,AUTOSTATS(Yes,,);

TALLIES: Process 3.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 3");
Process 1.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 1");
Process 2.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 2");
Process 2.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 2");
Record 1,,DATABASE("Interval","User Specified","Record 1");
Process 3.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 3");
Process 1.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 1");
Process 4.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 4");
Process 4.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 4");

DSTATS: NT(Palette),Palette Busy;
MT(Palette),Palette Active;

OUTPUTS: Process 4.NumberOut,,Process 4 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 4");
Process 1.NumberOut,,Process 1 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 1");
Process 4.VATime,,Process 4 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 4");
Process 3.NumberOut,,Process 3 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 3");
Process 2.VATime,,Process 2 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 2");
Process 2.NumberIn,,Process 2 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 2");
Process 4.NumberIn,,Process 4 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 4");
Process 2.NumberOut,,Process 2 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 2");
Process 3.VATime,,Process 3 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 3");
Process 1.NumberIn,,Process 1 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 1");
Process 3.NumberIn,,Process 3 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 3");

Process 1.VATime,,Process 1 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 1");
REPLICATE,
1,,MinutesToBaseTime(20000),Yes,Yes,,NumberOut==120,,24,Minutes,No,No,,Yes;
EXPRESSIONS: Palette_S(3),Entree,Sortie,Entree;
ENTITIES: Piece
1.Picture.Report,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,AUTOSTATS(Yes,,);
Piece
2.Picture.Report,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,AUTOSTATS(Yes,,);
Piece
3.Picture.Report,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,AUTOSTATS(Yes,,);
Piece
4.Picture.Report,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,AUTOSTATS(Yes,,);
ACTIVITYAREAS: Sortie,0,,AUTOSTATS(Yes,,);

Le programme (fichier du type .mod)

```
;
;
; Model statements for module: Assign 1
;
4$ ASSIGN: Piece Index=1:
TimeIn=TNOW:
NBE=0:
DO1=100:
DO2=108:
DO3=122:
DO4=105:
DO=DO1+DO2+DO3+DO4:
Picture=Piece1.Report:
NumberOut=0:NEXT(8$);

8$ STATION, Entree;
9$ STORE: FAE:NEXT(11$);

;
;
; Model statements for module: Request 1
;
11$ REQUEST, 1:Palette(SDS,Palette #),1:NEXT(12$);
12$ UNSTORE::NEXT(11$);

;
;
; Model statements for module: Transport 1
;
111$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;

1$ CREATE, 1,0,Piece 2:1,30:NEXT(5$);

;
;
; Model statements for module: Assign 2
;
5$ ASSIGN: Piece Index=2:
TimeIn=TNOW:
NBE=0:
DO1=114:
DO2=117:
DO3=125:
DO4=119:
DO=DO1+DO2+DO3+DO4:
Picture=Piece2.Report:NEXT(8$);

2$ CREATE, 1,0,Piece 3:1,30:NEXT(6$);

;
;
```

```

; Model statements for module: Assign 3
;
6$  ASSIGN:   Piece Index=3:
      TimeIn=TNOW:
      NBE=0:
      DO1=106:
      DO2=112:
      DO3=124:
      DO4=118:
      DO=DO1+DO2+DO3+DO4:
      Picture=Piece3.Report:NEXT(8$);

3$  CREATE,   1,0,Piece 4:1,30:NEXT(7$);

;
;
; Model statements for module: Assign 4
;
7$  ASSIGN:   Piece Index=4:
      TimeIn=TNOW:
      NBE=0:
      DO1=102:
      DO2=100:
      DO3=120:
      DO4=100:
      DO=DO1+DO2+DO3+DO4:
      Picture=Piece4.Report:NEXT(8$);

;
;
; Model statements for module: Enter 1
;
13$ STATION,  Sortie;
115$ DELAY:   0,..,NVA:NEXT(117$);

117$ FREE:   Palette(Palette #):NEXT(113$);
113$ ASSIGN:  NumberOut=NumberOut+1:NEXT(112$);

;
;
; Model statements for module: Record 1
;
112$ TALLY:   Record 1,INT(Time Out),1:NEXT(14$);

;
;
; Model statements for module: Dispose 1
;
14$  ASSIGN:   SORTIE.NumberOut=SORTIE.NumberOut +
1;
126$ DISPOSE:  Yes;

15$  STATION,  Entree1;
16$  BRANCH,   1:
      If,DO1>00,17$,Yes:
      Else,18$,Yes;
17$  BRANCH,   1:
      If,NQ(FAE1)<4,24$,Yes:
      If,DO2>00,19$,Yes:
      If,DO3>00,21$,Yes:
      If,DO4>00,22$,Yes:
      Else,46$,Yes;
24$  QUEUE,    FAE1,4;
25$  SEIZE,    1,Other:
      Robot1,1:NEXT(20$);

20$  MOVE:     Palette(Palette #),Cellule1,1;      SDS
26$  STATION,  Cellule1:NEXT(107$);

;
;
; Model statements for module: Process 1
;
107$ ASSIGN:   Process 1.NumberIn=Process 1.NumberIn +
1:
      Process 1.WIP=Process 1.WIP+1;
156$ STACK,   1:Save:NEXT(128$);

128$ DELAY:   DO1,.,VA:NEXT(137$);

137$ TALLY:   Process
1.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
161$ ASSIGN:   Process 1.VATime=Process 1.VATime +
Diff.VATime;
162$ TALLY:   Process 1.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
127$ RELEASE:  Robot1,1;
176$ STACK,   1:Destroy:NEXT(175$);

175$ ASSIGN:   Process 1.NumberOut=Process 1.NumberOut
+ 1:
      Process 1.WIP=Process 1.WIP-1:NEXT(27$);

27$  ASSIGN:   DO1=00:
      NBE=NBE+1:
      DO=DO1+DO2+DO3+DO4;
28$  STORE:    FAS1;
29$  BRANCH,   1:
      If,NE(Sortie1)==00,30$,Yes:
      Else,28$,Yes;
30$  MOVE:     Palette(Palette #),Sortie1,1;      SDS

31$  STATION,  Sortie1;
32$  BRANCH,   1:
      If,DO2>00,33$,Yes:
      If,DO3>00,34$,Yes:
      If,DO4>00,35$,Yes:
      Else,36$,Yes;
33$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1;
SDS
34$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS
35$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS
36$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Sortie,1;
SDS

19$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1;
SDS

21$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS

22$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS

46$  MOVE:     Palette(Palette #),Sortie1,1;      SDS
23$  TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;
SDS

18$  BRANCH,   1:
      If,DO2>00,19$,Yes:
      If,DO3>00,21$,Yes:
      If,DO4>00,22$,Yes;

;
;
; Model statements for module: Transporter 1
;
184$ CREATE,   20,0.0::NEXT(185$);

185$ ASSIGN:   Palette_N=Palette_N+1:
      NS=Palette_N;
Palette_Loop ALLOCATE, 9999:Palette(NS);
186$ IF:       LT(Palette,NS)==M;
187$ ASSIGN:   IS=IS+1;
188$ IF:       IS>3;
189$ ASSIGN:   IS=1;
190$ ENDIF;

```

```

191$ ELSE;
192$ ASSIGN: IS=1;
193$ ENDIF;
194$ MOVE: ,Palette_S(IS);
195$ ASSIGN: M=Palette_S(IS);
196$ FREE::NEXT(Palette_Loop);

Palette_Req1 REQUEST, 1:Palette(SDS):NEXT(__ActionLabel);

Palette_Req2 REQUEST, 1:Palette(SDS):NEXT(__ActionLabel);

Palette_Free FREE: Palette;
242$ SIGNAL: -999:NEXT(__ActionLabel);

37$ STATION, Entree2;
38$ BRANCH, 1:
    If,DO2>00,39$,Yes:
    Else,40$,Yes;
39$ BRANCH, 1:
    If,NQ(FAE2)<4,48$,Yes:
    If,DO3>00,42$,Yes:
    If,DO4>00,43$,Yes:
    If,DO1>00,44$,Yes:
    Else,45$,Yes;
48$ QUEUE, FAE2,4;
49$ SEIZE, 1,Other:
    Robot2,1:NEXT(47$);

47$ MOVE: Palette(Palette #),Cellule2,1; SDS
50$ STATION, Cellule2:NEXT(108$);

;
;
; Model statements for module: Process 2
;
108$ ASSIGN: Process 2.NumberIn=Process 2.NumberIn +
1:
    Process 2.WIP=Process 2.WIP+1;
273$ STACK, 1:Save:NEXT(245$);

245$ DELAY: DO2,,VA:NEXT(254$);

254$ TALLY: Process
2.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
278$ ASSIGN: Process 2.VATime=Process 2.VATime +
Diff.VATime;
279$ TALLY: Process 2.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
244$ RELEASE: Robot2,1;
293$ STACK, 1:Destroy:NEXT(292$);

292$ ASSIGN: Process 2.NumberOut=Process 2.NumberOut
+ 1:
    Process 2.WIP=Process 2.WIP-1:NEXT(51$);

51$ ASSIGN: DO2=00:
    NBE=NBE+1:
    DO=DO1+DO2+DO3+DO4;
52$ STORE: FAS2;
53$ BRANCH, 1:
    If,NE(Sortie2)==00,54$,Yes:
    Else,52$,Yes;
54$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie2,1; SDS

55$ STATION, Sortie2;
56$ BRANCH, 1:
    If,DO3>00,58$,Yes:
    If,DO4>00,59$,Yes:
    If,DO1>00,60$,Yes:
    Else,57$,Yes;
58$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS
59$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS
60$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;
SDS

57$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Sortie,1;
SDS
42$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS
43$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS
44$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;
SDS
45$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie2,1; SDS
41$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1;
SDS
40$ BRANCH, 1:
    If,DO3>00,42$,Yes:
    If,DO4>00,43$,Yes:
    If,DO1>00,44$,Yes;
61$ STATION, Entree3;
62$ BRANCH, 1:
    If,DO3>00,63$,Yes:
    Else,64$,Yes;
63$ BRANCH, 1:
    If,NQ(FAE3)<4,66$,Yes:
    If,DO4>00,80$,Yes:
    If,DO1>00,81$,Yes:
    If,DO2>00,83$,Yes:
    Else,82$,Yes;
66$ QUEUE, FAE3,4;
67$ SEIZE, 1,Other:
    Robot3,1:NEXT(65$);

65$ MOVE: Palette(Palette #),Cellule3,1; SDS
68$ STATION, Cellule3:NEXT(109$);

;
;
; Model statements for module: Process 3
;
109$ ASSIGN: Process 3.NumberIn=Process 3.NumberIn +
1:
    Process 3.WIP=Process 3.WIP+1;
324$ STACK, 1:Save:NEXT(296$);

296$ DELAY: DO3,,VA:NEXT(305$);

305$ TALLY: Process
3.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
329$ ASSIGN: Process 3.VATime=Process 3.VATime +
Diff.VATime;
330$ TALLY: Process 3.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
295$ RELEASE: Robot3,1;
344$ STACK, 1:Destroy:NEXT(343$);

343$ ASSIGN: Process 3.NumberOut=Process 3.NumberOut
+ 1:
    Process 3.WIP=Process 3.WIP-1:NEXT(69$);

69$ ASSIGN: DO3=00:
    NBE=NBE+1:
    DO=DO1+DO2+DO3+DO4;
70$ STORE: FAS3;
71$ BRANCH, 1:
    If,NE(Sortie3)==00,72$,Yes:
    Else,70$,Yes;
72$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie3,1; SDS

73$ STATION, Sortie3;
74$ BRANCH, 1:
    If,DO4>00,76$,Yes:
    If,DO1>00,77$,Yes:
    If,DO2>00,75$,Yes:
    Else,78$,Yes;
76$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS

```

```

77$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1; If,DO2>00,100$,Yes:
SDS If,DO3>00,98$,Yes:
Else,101$,Yes;

75$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1; 99$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;
SDS SDS

78$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Sortie,1; 100$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1;
SDS SDS

80$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1; 98$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS SDS

81$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1; 101$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Sortie,1;
SDS SDS

83$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1; 103$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree1,1;
SDS SDS

82$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie3,1; SDS 104$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree2,1;
79$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1; SDS SDS
SDS

64$ BRANCH, 1: 105$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree3,1;
SDS If,DO4>00,80$,Yes:
If,DO1>00,81$,Yes: 106$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie4,1; SDS
If,DO2>00,83$,Yes; 102$ TRANSPORT: Palette(Palette #),Entree4,1;
SDS SDS

84$ STATION, Entree4;
85$ BRANCH, 1: 87$ BRANCH, 1:
If,DO4>00,86$,Yes: If,DO4>00,103$,Yes:
Else,87$,Yes; If,DO1>00,104$,Yes:
86$ BRANCH, 1: If,DO2>00,105$,Yes;
If,NQ(FAE4)<4,89$,Yes: Else,106$,Yes;
If,DO1>00,103$,Yes:
If,DO2>00,104$,Yes:
If,DO3>00,105$,Yes:
89$ QUEUE, FAE4,4;
90$ SEIZE, 1,Other:
Robot4,1:NEXT(88$);

88$ MOVE: Palette(Palette #),Cellule4,1; SDS

91$ STATION, Cellule4:NEXT(110$);

;
;
; Model statements for module: Process 4
;
110$ ASSIGN: Process 4.NumberIn=Process 4.NumberIn +
1:
Process 4.WIP=Process 4.WIP+1;
375$ STACK, 1:Save:NEXT(347$);

347$ DELAY: DO4,,VA:NEXT(356$);

356$ TALLY: Process
4.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
380$ ASSIGN: Process 4.VATime=Process 4.VATime +
Diff.VATime;
381$ TALLY: Process 4.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
346$ RELEASE: Robot4,1;
395$ STACK, 1:Destroy:NEXT(394$);

394$ ASSIGN: Process 4.NumberOut=Process 4.NumberOut
+ 1:
Process 4.WIP=Process 4.WIP-1:NEXT(92$);

92$ ASSIGN: DO4=00:
NBE=NBE+1:
DO=DO1+DO2+DO3+DO4;
93$ STORE: FAS4;
94$ BRANCH, 1:
If,NE(Sortie4)==00,95$,Yes:
Else,93$,Yes;
95$ MOVE: Palette(Palette #),Sortie4,1; SDS

96$ STATION, Sortie4;
97$ BRANCH, 1:
If,DO1>00,99$,Yes:

```

capacité des FAEs	cas	Règle d'ordonnancement	N°
3	1	FiFo	1
		SPT	2
		LPT	3
		LWKR1	4
		LWKR2	5
		MWKR1	6
		MWKR2	7
	2	FiFo	8
		SPT	9
		LPT	10
		LWKR1	11
		LWKR2	12
		MWKR1	13
		MWKR2	14
	3	FiFo	15
		SPT	16
		LPT	17
		LWKR1	18
		LWKR2	19
		MWKR1	20
		MWKR2	21
	4	FiFo	22
		SPT	23
		LPT	24
		LWKR1	25
		LWKR2	26
		MWKR1	27
		MWKR2	28

5	FiFo	29
	SPT	30
	LPT	31
	LWKR1	32
	LWKR2	33
	MWKR1	34
	MWKR2	35
6	FiFo	36
	SPT	37
	LPT	38
	LWKR1	39
	LWKR2	40
	MWKR1	41
	MWKR2	42
7	FiFo	43
	SPT	44
	LPT	45
	LWKR1	46
	LWKR2	47
	MWKR1	48
	MWKR2	49
8	FiFo	50
	SPT	51
	LPT	52
	LWKR1	53
	LWKR2	54
	MWKR1	55
	MWKR2	56
9	FiFo	57
	SPT	58
	LPT	59

10	LWKR1	60
	LWKR2	61
	MWKR1	62
	MWKR2	63
	FiFo	64
	SPT	65
	LPT	66
11	LWKR1	67
	LWKR2	68
	MWKR1	69
	MWKR2	70
	FiFo	71
	SPT	72
	LPT	73
12	LWKR1	74
	LWKR2	75
	MWKR1	76
	MWKR2	77
	FiFo	78
	SPT	79
	LPT	80
13	LWKR1	81
	LWKR2	82
	MWKR1	83
	MWKR2	84
	FiFo	85
	SPT	86
	LPT	87
13	LWKR1	88
	LWKR2	89
	MWKR1	90

14	MWKR2	91
	FiFo	92
	SPT	93
	LPT	94
	LWKR1	95
	LWKR2	96
	MWKR1	97
15	MWKR2	98
	FiFo	99
	SPT	100
	LPT	101
	LWKR1	102
	LWKR2	103
	MWKR1	104
16	MWKR2	105
	FiFo	106
	SPT	107
	LPT	108
	LWKR1	109
	LWKR2	110
	MWKR1	111
17	MWKR2	112
	FiFo	113
	SPT	114
	LPT	115
	LWKR1	116
	LWKR2	117
	MWKR1	118
18	MWKR2	119
	FiFo	120
	SPT	121

	LPT	122
	LWKR1	123
	LWKR2	124
	MWKR1	125
	MWKR2	126
19	FiFo	127
	SPT	128
	LPT	129
	LWKR1	130
	LWKR2	131
	MWKR1	132
	MWKR2	133
20	FiFo	134
	SPT	135
	LPT	136
	LWKR1	137
	LWKR2	138
	MWKR1	139
	MWKR2	140
21	FiFo	141
	SPT	142
	LPT	143
	LWKR1	144
	LWKR2	145
	MWKR1	146
	MWKR2	147
22	FiFo	148
	SPT	149
	LPT	150
	LWKR1	151
	LWKR2	152

	MWKR1	153
	MWKR2	154
23	FiFo	155
	SPT	156
	LPT	157
	LWKR1	158
	LWKR2	159
	MWKR1	160
	MWKR2	161
24	FiFo	162
	SPT	163
	LPT	164
	LWKR1	165
	LWKR2	166
	MWKR1	167
	MWKR2	168
25	FiFo	169
	SPT	170
	LPT	171
	LWKR1	172
	LWKR2	173
	MWKR1	174
	MWKR2	175
26	FiFo	176
	SPT	177
	LPT	178
	LWKR1	179
	LWKR2	180
	MWKR1	181
	MWKR2	182
27	FiFo	183

	SPT	184
	LPT	185
	LWKR1	186
	LWKR2	187
	MWKR1	188
	MWKR2	189
28	FiFo	190
	SPT	191
	LPT	192
	LWKR1	193
	LWKR2	194
	MWKR1	195
	MWKR2	196
29	FiFo	197
	SPT	198
	LPT	199
	LWKR1	200
	LWKR2	201
	MWKR1	202
	MWKR2	203
30	FiFo	204
	SPT	205
	LPT	206
	LWKR1	207
	LWKR2	208
	MWKR1	209
	MWKR2	210
31	FiFo	211
	SPT	212
	LPT	213
	LWKR1	214

	LWKR2	215
	MWKR1	216
	MWKR2	217
32	FiFo	218
	SPT	219
	LPT	220
	LWKR1	221
	LWKR2	222
	MWKR1	223
	MWKR2	224
33	FiFo	225
	SPT	226
	LPT	227
	LWKR1	228
	LWKR2	229
	MWKR1	230
	MWKR2	231
34	FiFo	232
	SPT	233
	LPT	234
	LWKR1	235
	LWKR2	236
	MWKR1	237
	MWKR2	238
35	FiFo	239
	SPT	240
	LPT	241
	LWKR1	242
	LWKR2	243
	MWKR1	244
	MWKR2	245

36	FiFo	246
	SPT	247
	LPT	248
	LWKR1	249
	LWKR2	250
	MWKR1	251
	MWKR2	252
	37	FiFo
SPT		254
LPT		255
LWKR1		256
LWKR2		257
MWKR1		258
MWKR2		259
38		FiFo
	SPT	261
	LPT	262
	LWKR1	263
	LWKR2	264
	MWKR1	265
	MWKR2	266
	39	FiFo
SPT		268
LPT		269
LWKR1		270
LWKR2		271
MWKR1		272
MWKR2		273
40		FiFo
	SPT	275
	LPT	276

	LWKR1	277
	LWKR2	278
	MWKR1	279
	MWKR2	280
41	FiFo	281
	SPT	282
	LPT	283
	LWKR1	284
	LWKR2	285
	MWKR1	286
	MWKR2	287
	42	FiFo
SPT		289
LPT		290
LWKR1		291
LWKR2		292
MWKR1		293
MWKR2		294
43		FiFo
	SPT	296
	LPT	297
	LWKR1	298
	LWKR2	299
	MWKR1	300
	MWKR2	301
	44	FiFo
SPT		303
LPT		304
LWKR1		305
LWKR2		306
MWKR1		307

	MWKR2	308	
	45	FiFo	309
		SPT	310
		LPT	311
		LWKR1	312
		LWKR2	313
		MWKR1	314
		MWKR2	315
46		FiFo	316
	SPT	317	
	LPT	318	
	LWKR1	319	
	LWKR2	320	
	MWKR1	321	
	MWKR2	322	
	47	FiFo	323
SPT		324	
LPT		325	
LWKR1		326	
LWKR2		327	
MWKR1		328	
MWKR2		329	
48		FiFo	330
	SPT	331	
	LPT	332	
	LWKR1	333	
	LWKR2	334	
	MWKR1	335	
	MWKR2	336	
	49	FiFo	337
SPT		338	

		LPT	339	
		LWKR1	340	
		LWKR2	341	
		MWKR1	342	
		MWKR2	343	
		50	FiFo	344
			SPT	345
			LPT	346
LWKR1	347			
LWKR2	348			
MWKR1	349			
MWKR2	350			
4	1		FiFo	351
		SPT	352	
		LPT	353	
		LWKR1	354	
		LWKR2	355	
		MWKR1	356	
		MWKR2	357	
		2	FiFo	358
	SPT		359	
	LPT		360	
	LWKR1		361	
	LWKR2		362	
	MWKR1		363	
	MWKR2		364	
	3		FiFo	365
		SPT	366	
LPT		367		
LWKR1		368		
LWKR2		369		

4	MWKR1	370
	MWKR2	371
	FiFo	372
	SPT	373
	LPT	374
	LWKR1	375
	LWKR2	376
	MWKR1	377
	MWKR2	378
5	FiFo	379
	SPT	380
	LPT	381
	LWKR1	382
	LWKR2	383
	MWKR1	384
	MWKR2	385
6	FiFo	386
	SPT	387
	LPT	388
	LWKR1	389
	LWKR2	390
	MWKR1	391
	MWKR2	392
7	FiFo	393
	SPT	394
	LPT	395
	LWKR1	396
	LWKR2	397
	MWKR1	398
	MWKR2	399
8	FiFo	400

9	SPT	401
	LPT	402
	LWKR1	403
	LWKR2	404
	MWKR1	405
	MWKR2	406
	FiFo	407
10	SPT	408
	LPT	409
	LWKR1	410
	LWKR2	411
	MWKR1	412
	MWKR2	413
	FiFo	414
11	SPT	415
	LPT	416
	LWKR1	417
	LWKR2	418
	MWKR1	419
	MWKR2	420
	FiFo	421
12	SPT	422
	LPT	423
	LWKR1	424
	LWKR2	425
	MWKR1	426
	MWKR2	427
	FiFo	428
13	SPT	429
	LPT	430
	LWKR1	431

13	LWKR2	432
	MWKR1	433
	MWKR2	434
	FiFo	435
	SPT	436
	LPT	437
	LWKR1	438
14	LWKR2	439
	MWKR1	440
	MWKR2	441
	FiFo	442
	SPT	443
	LPT	444
	LWKR1	445
15	LWKR2	446
	MWKR1	447
	MWKR2	448
	FiFo	449
	SPT	450
	LPT	451
	LWKR1	452
16	LWKR2	453
	MWKR1	454
	MWKR2	455
	FiFo	456
	SPT	457
	LPT	458
	LWKR1	459
17	LWKR2	460
	MWKR1	461
	MWKR2	462

17	FiFo	463
	SPT	464
	LPT	465
	LWKR1	466
	LWKR2	467
	MWKR1	468
	MWKR2	469
18	FiFo	470
	SPT	471
	LPT	472
	LWKR1	473
	LWKR2	474
	MWKR1	475
	MWKR2	476
19	FiFo	477
	SPT	478
	LPT	479
	LWKR1	480
	LWKR2	481
	MWKR1	482
	MWKR2	483
20	FiFo	484
	SPT	485
	LPT	486
	LWKR1	487
	LWKR2	488
	MWKR1	489
	MWKR2	490
21	FiFo	491
	SPT	492
	LPT	493

	LWKR1	494		MWKR2	525		LPT	556		MWKR1	587		
	LWKR2	495		26	FiFo	526		LWKR1	557		MWKR2	588	
	MWKR1	496			SPT	527		LWKR2	558		35	FiFo	589
	MWKR2	497			LPT	528		MWKR1	559			SPT	590
22	FiFo	498			LWKR1	529		MWKR2	560			LPT	591
	SPT	499			LWKR2	530	31	FiFo	561			LWKR1	592
	LPT	500			MWKR1	531		SPT	562			LWKR2	593
	LWKR1	501			MWKR2	532		LPT	563			MWKR1	594
	LWKR2	502		27	FiFo	533		LWKR1	564			MWKR2	595
	MWKR1	503			SPT	534		LWKR2	565		36	FiFo	596
	MWKR2	504			LPT	535		MWKR1	566			SPT	597
23	FiFo	505			LWKR1	536		MWKR2	567			LPT	598
	SPT	506			LWKR2	537	32	FiFo	568			LWKR1	599
	LPT	507			MWKR1	538		SPT	569			LWKR2	600
	LWKR1	508			MWKR2	539		LPT	570			MWKR1	601
	LWKR2	509		28	FiFo	540		LWKR1	571			MWKR2	602
	MWKR1	510			SPT	541		LWKR2	572		37	FiFo	603
	MWKR2	511			LPT	542		MWKR1	573			SPT	604
24	FiFo	512			LWKR1	543		MWKR2	574			LPT	605
	SPT	513			LWKR2	544	33	FiFo	575			LWKR1	606
	LPT	514			MWKR1	545		SPT	576			LWKR2	607
	LWKR1	515			MWKR2	546		LPT	577			MWKR1	608
	LWKR2	516		29	FiFo	547		LWKR1	578			MWKR2	609
	MWKR1	517			SPT	548		LWKR2	579		38	FiFo	610
	MWKR2	518			LPT	549		MWKR1	580			SPT	611
25	FiFo	519			LWKR1	550		MWKR2	581			LPT	612
	SPT	520			LWKR2	551	34	FiFo	582			LWKR1	613
	LPT	521			MWKR1	552		SPT	583			LWKR2	614
	LWKR1	522			MWKR2	553		LPT	584			MWKR1	615
	LWKR2	523		30	FiFo	554		LWKR1	585			MWKR2	616
	MWKR1	524			SPT	555		LWKR2	586		39	FiFo	617

	40	SPT	618		44	LWKR2	649		48	FiFo	680		3	LWKR1	711						
		LPT	619			MWKR1	650			SPT	681			LWKR2	712						
		LWKR1	620			MWKR2	651			LPT	682			MWKR1	713						
		LWKR2	621			FiFo	652			LWKR1	683			MWKR2	714						
		MWKR1	622			SPT	653			LWKR2	684			FiFo	715						
		MWKR2	623			LPT	654			MWKR1	685			SPT	716						
	41	40	FiFo		624	45	45		LWKR1	655	49		49	FiFo	687	4	4	LPT	717		
			SPT		625				LWKR2	656				SPT	688			LWKR1	718		
			LPT		626				MWKR1	657				LPT	689			LWKR2	719		
			LWKR1		627				MWKR2	658				LWKR1	690			MWKR1	720		
			LWKR2		628				FiFo	659				LWKR2	691			MWKR2	721		
			MWKR1		629				SPT	660				MWKR1	692			FiFo	722		
	42	41	MWKR2		630	46	46		LPT	661	50		50	SPT	695	5	5	SPT	730		
			FiFo		631				LWKR1	662				LWKR1	697			LPT	724	LPT	731
			SPT		632				LWKR2	663				LWKR2	698			LWKR1	725	LWKR1	732
			LPT		633				MWKR1	664				MWKR1	699			LWKR2	726	LWKR2	733
			LWKR1		634				MWKR2	665				MWKR2	700			MWKR1	727	MWKR1	734
			LWKR2		635				FiFo	666				LWKR1	669			MWKR2	728	MWKR2	735
	43	42	MWKR1		636	47	47		LWKR2	670	5		1	FiFo	701	6	6	FiFo	736		
			MWKR2		637				SPT	667				SPT	702			SPT	737		
			FiFo		638				LPT	668				LPT	703			LPT	738		
			SPT		639				LWKR1	669				LWKR1	704			LWKR1	739		
			LPT		640				LWKR2	670				LWKR2	705			LWKR2	740		
			LWKR1		641				MWKR1	671				MWKR1	706			MWKR1	741		
43	43	LWKR2	642	47	47	MWKR2	672	5	2	FiFo	708			LWKR1	741						
		MWKR1	643			FiFo	673			SPT	709			LWKR2	740						
		MWKR2	644			SPT	674			LPT	710			MWKR1	741						
		FiFo	645			LPT	675														
43	43	SPT	646	47	47	LWKR1	676	5	2	SPT	709			LWKR2	740						
		LPT	647			LWKR2	677			LPT	710			MWKR1	741						
		LWKR1	648			MWKR1	678														
						MWKR2	679														

	MWKR2	742
7	FiFo	743
	SPT	744
	LPT	745
	LWKR1	746
	LWKR2	747
	MWKR1	748
	MWKR2	749
	8	FiFo
SPT		751
LPT		752
LWKR1		753
LWKR2		754
MWKR1		755
MWKR2		756
9		FiFo
	SPT	758
	LPT	759
	LWKR1	760
	LWKR2	761
	MWKR1	762
	MWKR2	763
	10	FiFo
SPT		765
LPT		766
LWKR1		767
LWKR2		768
MWKR1		769
MWKR2		770
11		FiFo
	SPT	772

	LPT	773
	LWKR1	774
	LWKR2	775
	MWKR1	776
	MWKR2	777
12	FiFo	778
	SPT	779
	LPT	780
	LWKR1	781
	LWKR2	782
	MWKR1	783
	MWKR2	784
	13	FiFo
SPT		786
LPT		787
LWKR1		788
LWKR2		789
MWKR1		790
MWKR2		791
14		FiFo
	SPT	793
	LPT	794
	LWKR1	795
	LWKR2	796
	MWKR1	797
	MWKR2	798
	15	FiFo
SPT		800
LPT		801
LWKR1		802
LWKR2		803

	MWKR1	804
	MWKR2	805
16	FiFo	806
	SPT	807
	LPT	808
	LWKR1	809
	LWKR2	810
	MWKR1	811
	MWKR2	812
	17	FiFo
SPT		814
LPT		815
LWKR1		816
LWKR2		817
MWKR1		818
MWKR2		819
18		FiFo
	SPT	821
	LPT	822
	LWKR1	823
	LWKR2	824
	MWKR1	825
	MWKR2	826
	19	FiFo
SPT		828
LPT		829
LWKR1		830
LWKR2		831
MWKR1		832
MWKR2		833
20		FiFo

	SPT	835
	LPT	836
	LWKR1	837
	LWKR2	838
	MWKR1	839
	MWKR2	840
21	FiFo	841
	SPT	842
	LPT	843
	LWKR1	844
	LWKR2	845
	MWKR1	846
	MWKR2	847
	22	FiFo
SPT		849
LPT		850
LWKR1		851
LWKR2		852
MWKR1		853
MWKR2		854
23		FiFo
	SPT	856
	LPT	857
	LWKR1	858
	LWKR2	859
	MWKR1	860
	MWKR2	861
	24	FiFo
SPT		863
LPT		864
LWKR1		865

25	LWKR2	866	
	MWKR1	867	
	MWKR2	868	
	FiFo	869	
	SPT	870	
	LPT	871	
	LWKR1	872	
	LWKR2	873	
	MWKR1	874	
	MWKR2	875	
	26	FiFo	876
		SPT	877
LPT		878	
LWKR1		879	
LWKR2		880	
MWKR1		881	
MWKR2		882	
27	FiFo	883	
	SPT	884	
	LPT	885	
	LWKR1	886	
	LWKR2	887	
	MWKR1	888	
	MWKR2	889	
28	FiFo	890	
	SPT	891	
	LPT	892	
	LWKR1	893	
	LWKR2	894	
	MWKR1	895	
	MWKR2	896	
29	FiFo	897	
	SPT	898	
	LPT	899	
	LWKR1	900	
	LWKR2	901	
	MWKR1	902	
	MWKR2	903	
	30	FiFo	904
		SPT	905
		LPT	906
		LWKR1	907
		LWKR2	908
MWKR1		909	
31	MWKR2	910	
	FiFo	911	
	SPT	912	
	LPT	913	
	LWKR1	914	
	LWKR2	915	
32	MWKR1	916	
	MWKR2	917	
	FiFo	918	
	SPT	919	
	LPT	920	
	LWKR1	921	
33	LWKR2	922	
	MWKR1	923	
	MWKR2	924	
	FiFo	925	
	SPT	926	
	LPT	927	
34	LWKR1	928	
	LWKR2	929	
	MWKR1	930	
	MWKR2	931	
	FiFo	932	
	SPT	933	
	LPT	934	
	LWKR1	935	
	LWKR2	936	
	MWKR1	937	
	MWKR2	938	
	35	FiFo	939
SPT		940	
LPT		941	
LWKR1		942	
LWKR2		943	
MWKR1		944	
MWKR2		945	
36	FiFo	946	
	SPT	947	
	LPT	948	
	LWKR1	949	
	LWKR2	950	
	MWKR1	951	
	MWKR2	952	
37	FiFo	953	
	SPT	954	
	LPT	955	
	LWKR1	956	
	LWKR2	957	
	MWKR1	958	
	38	MWKR2	959
FiFo		960	
SPT		961	
LPT		962	
LWKR1		963	
LWKR2		964	
MWKR1		965	
MWKR2		966	
39		FiFo	967
		SPT	968
		LPT	969
		LWKR1	970
	LWKR2	971	
	MWKR1	972	
	MWKR2	973	
40	FiFo	974	
	SPT	975	
	LPT	976	
	LWKR1	977	
	LWKR2	978	
	MWKR1	979	
	MWKR2	980	
41	FiFo	981	
	SPT	982	
	LPT	983	
	LWKR1	984	
	LWKR2	985	
	MWKR1	986	
	MWKR2	987	
42	FiFo	988	
	SPT	989	

43	LPT	990	47	MWKR1	1021	2	SPT	1052	6	LWKR2	1083
	LWKR1	991		MWKR2	1022		LPT	1053		MWKR1	1084
	LWKR2	992		FiFo	1023		LWKR1	1054		MWKR2	1085
	MWKR1	993		SPT	1024		LWKR2	1055		FiFo	1086
	MWKR2	994		LPT	1025		MWKR1	1056		SPT	1087
	FiFo	995		LWKR1	1026		MWKR2	1057		LPT	1088
	SPT	996		LWKR2	1027		FiFo	1058		LWKR1	1089
	LPT	997		MWKR1	1028		SPT	1059		LWKR2	1090
	LWKR1	998		MWKR2	1029		LPT	1060		MWKR1	1091
	LWKR2	999		FiFo	1030		LWKR1	1061		MWKR2	1092
	MWKR1	1000		SPT	1031		LWKR2	1062		FiFo	1093
	MWKR2	1001		LPT	1032		MWKR1	1063		SPT	1094
	FiFo	1002		LWKR1	1033		MWKR2	1064		LPT	1095
	SPT	1003		LWKR2	1034		FiFo	1065		LWKR1	1096
LPT	1004	MWKR1	1035	SPT	1066	LWKR2	1097				
LWKR1	1005	MWKR2	1036	LPT	1067	MWKR1	1098				
LWKR2	1006	FiFo	1037	LWKR1	1068	MWKR2	1099				
MWKR1	1007	SPT	1038	LWKR2	1069	FiFo	1100				
MWKR2	1008	LPT	1039	MWKR1	1070	SPT	1101				
FiFo	1009	LWKR1	1040	MWKR2	1071	LPT	1102				
SPT	1010	LWKR2	1041	FiFo	1072	LWKR1	1103				
LPT	1011	MWKR1	1042	SPT	1073	LWKR2	1104				
LWKR1	1012	MWKR2	1043	LPT	1074	MWKR1	1105				
LWKR2	1013	FiFo	1044	LWKR1	1075	MWKR2	1106				
MWKR1	1014	SPT	1045	LWKR2	1076	FiFo	1107				
MWKR2	1015	LPT	1046	MWKR1	1077	SPT	1108				
FiFo	1016	LWKR1	1047	MWKR2	1078	LPT	1109				
SPT	1017	LWKR2	1048	FiFo	1079	LWKR1	1110				
LPT	1018	MWKR1	1049	SPT	1080	LWKR2	1111				
LWKR1	1019	MWKR2	1050	LPT	1081	MWKR1	1112				
LWKR2	1020	FiFo	1051	LWKR1	1082	MWKR2	1113				
10	1										

10	FiFo	1114		LWKR1	1145		MWKR2	1176		LPT	1207		
	SPT	1115		LWKR2	1146		19	FiFo		1177	LWKR1	1208	
	LPT	1116		MWKR1	1147			SPT		1178	LWKR2	1209	
	LWKR1	1117		MWKR2	1148			LPT		1179	MWKR1	1210	
	LWKR2	1118		15	FiFo			1149		LWKR1	1180	MWKR2	1211
	MWKR1	1119			SPT		1150	LWKR2		1181	24	FiFo	1212
	MWKR2	1120			LPT		1151	MWKR1		1182		SPT	1213
	11	FiFo			1121		LWKR1	1152		MWKR2		1183	LPT
SPT		1122	LWKR2	1153	20	FiFo	1184	LWKR1	1215				
LPT		1123	MWKR1	1154		SPT	1185	LWKR2	1216				
LWKR1		1124	MWKR2	1155		LPT	1186	MWKR1	1217				
LWKR2	1125	16	FiFo	1156		LWKR1	1187	MWKR2	1218				
MWKR1	1126		SPT	1157	LWKR2	1188	25	FiFo	1219				
MWKR2	1127		LPT	1158	MWKR1	1189		SPT	1220				
12	FiFo		1128	LWKR1	1159	MWKR2		1190	LPT	1221			
	SPT	1129	LWKR2	1160	21	FiFo		1191	LWKR1	1222			
	LPT	1130	MWKR1	1161		SPT	1192	LWKR2	1223				
	LWKR1	1131	MWKR2	1162		LPT	1193	MWKR1	1224				
LWKR2	1132	17	FiFo	1163		LWKR1	1194	MWKR2	1225				
MWKR1	1133		SPT	1164	LWKR2	1195	26	FiFo	1226				
MWKR2	1134		LPT	1165	MWKR1	1196		SPT	1227				
13	FiFo		1135	LWKR1	1166	MWKR2		1197	LPT	1228			
	SPT	1136	LWKR2	1167	22	FiFo		1198	LWKR1	1229			
	LPT	1137	MWKR1	1168		SPT	1199	LWKR2	1230				
	LWKR1	1138	MWKR2	1169		LPT	1200	MWKR1	1231				
LWKR2	1139	18	FiFo	1170		LWKR1	1201	MWKR2	1232				
MWKR1	1140		SPT	1171	LWKR2	1202	27	FiFo	1233				
MWKR2	1141		LPT	1172	MWKR1	1203		SPT	1234				
14	FiFo		1142	LWKR1	1173	MWKR2		1204	LPT	1235			
	SPT	1143	LWKR2	1174	23	FiFo		1205	LWKR1	1236			
	LPT	1144	MWKR1	1175		SPT	1206	LWKR2	1237				

28	MWKR1	1238
	MWKR2	1239
	FiFo	1240
	SPT	1241
	LPT	1242
	LWKR1	1243
	LWKR2	1244
	MWKR1	1245
	MWKR2	1246
29	FiFo	1247
	SPT	1248
	LPT	1249
	LWKR1	1250
	LWKR2	1251
	MWKR1	1252
	MWKR2	1253
30	FiFo	1254
	SPT	1255
	LPT	1256
	LWKR1	1257
	LWKR2	1258
	MWKR1	1259
	MWKR2	1260
31	FiFo	1261
	SPT	1262
	LPT	1263
	LWKR1	1264
	LWKR2	1265
	MWKR1	1266
	MWKR2	1267
32	FiFo	1268

33	SPT	1269
	LPT	1270
	LWKR1	1271
	LWKR2	1272
	MWKR1	1273
	MWKR2	1274
	34	FiFo
SPT		1276
LPT		1277
LWKR1		1278
LWKR2		1279
MWKR1		1280
MWKR2		1281
35	FiFo	1282
	SPT	1283
	LPT	1284
	LWKR1	1285
	LWKR2	1286
	MWKR1	1287
	MWKR2	1288
36	FiFo	1289
	SPT	1290
	LPT	1291
	LWKR1	1292
	LWKR2	1293
	MWKR1	1294
	MWKR2	1295
37	FiFo	1296
	SPT	1297
	LPT	1298
	LWKR1	1299

37	LWKR2	1300
	MWKR1	1301
	MWKR2	1302
	FiFo	1303
	SPT	1304
	LPT	1305
	LWKR1	1306
	LWKR2	1307
	MWKR1	1308
MWKR2	1309	
38	FiFo	1310
	SPT	1311
	LPT	1312
	LWKR1	1313
	LWKR2	1314
	MWKR1	1315
	MWKR2	1316
39	FiFo	1317
	SPT	1318
	LPT	1319
	LWKR1	1320
	LWKR2	1321
	MWKR1	1322
	MWKR2	1323
40	FiFo	1324
	SPT	1325
	LPT	1326
	LWKR1	1327
	LWKR2	1328
	MWKR1	1329
MWKR2	1330	

41	FiFo	1331
	SPT	1332
	LPT	1333
	LWKR1	1334
	LWKR2	1335
	MWKR1	1336
	MWKR2	1337
42	FiFo	1338
	SPT	1339
	LPT	1340
	LWKR1	1341
	LWKR2	1342
	MWKR1	1343
	MWKR2	1344
43	FiFo	1345
	SPT	1346
	LPT	1347
	LWKR1	1348
	LWKR2	1349
	MWKR1	1350
	MWKR2	1351
44	FiFo	1352
	SPT	1353
	LPT	1354
	LWKR1	1355
	LWKR2	1356
	MWKR1	1357
	MWKR2	1358
45	FiFo	1359
	SPT	1360
	LPT	1361

46	LWKR1	1362	50	MWKR2	1393	LPT	1424				
	LWKR2	1363		FiFo	1394		LWKR1	1425			
	MWKR1	1364		SPT	1395		LWKR2	1426			
	MWKR2	1365		LPT	1396		MWKR1	1427			
	FiFo	1366		LWKR1	1397		MWKR2	1428			
	SPT	1367		LWKR2	1398		FiFo	1429			
	LPT	1368		MWKR1	1399		SPT	1430			
	LWKR1	1369		MWKR2	1400		LPT	1431			
	LWKR2	1370		20	1		FiFo	1401	LWKR1	1432	
	MWKR1	1371					SPT	1402	LWKR2	1433	
	MWKR2	1372					LPT	1403	MWKR1	1434	
	FiFo	1373					LWKR1	1404	MWKR2	1435	
SPT	1374	LWKR2	1405			FiFo	1436				
LPT	1375	MWKR1	1406			SPT	1437				
LWKR1	1376	MWKR2	1407			LPT	1438				
LWKR2	1377	2	2			FiFo	1408	LWKR1	1439		
MWKR1	1378					SPT	1409	LWKR2	1440		
MWKR2	1379					LPT	1410	MWKR1	1441		
FiFo	1380					LWKR1	1411	MWKR2	1442		
SPT	1381					LWKR2	1412	FiFo	1443		
LPT	1382			MWKR1	1413	SPT	1444				
LWKR1	1383			MWKR2	1414	LPT	1445				
LWKR2	1384			3	3	FiFo	1415	LWKR1	1446		
MWKR1	1385					SPT	1416	LWKR2	1447		
MWKR2	1386					LPT	1417	MWKR1	1448		
FiFo	1387					LWKR1	1418	MWKR2	1449		
SPT	1388					LWKR2	1419	FiFo	1450		
LPT	1389	MWKR1	1420			SPT	1451				
LWKR1	1390	MWKR2	1421			LPT	1452				
LWKR2	1391	4	4			FiFo	1422	LWKR1	1453		
MWKR1	1392					SPT	1423	LWKR2	1454		
MWKR1	1455					9	9	MWKR2	1456	FiFo	1457
MWKR2	1456							FiFo	1457	SPT	1458
FiFo	1457							SPT	1458	LPT	1459
SPT	1458			LPT	1459			LWKR1	1460		
LPT	1459			LWKR1	1460			LWKR2	1461		
LWKR1	1460			LWKR2	1461			MWKR1	1462		
LWKR2	1461			MWKR1	1462			MWKR2	1463		
MWKR1	1462			10	10			FiFo	1464	FiFo	1464
MWKR2	1463							SPT	1465	SPT	1465
FiFo	1464							LPT	1466	LPT	1466
SPT	1465	LWKR1	1467					LWKR1	1467		
LPT	1466	LWKR2	1468					LWKR2	1468		
LWKR1	1467	MWKR1	1469			MWKR1	1469				
LWKR2	1468	MWKR2	1470			MWKR2	1470				
MWKR1	1469	11	11			FiFo	1471	FiFo	1471		
MWKR2	1470					SPT	1472	SPT	1472		
FiFo	1471					LPT	1473	LPT	1473		
SPT	1472					LWKR1	1474	LWKR1	1474		
LPT	1473					LWKR2	1475	LWKR2	1475		
LWKR1	1474			MWKR1	1476	MWKR1	1476				
LWKR2	1475			MWKR2	1477	MWKR2	1477				
MWKR1	1476			12	12	FiFo	1478	FiFo	1478		
MWKR2	1477					SPT	1479	SPT	1479		
FiFo	1478					LPT	1480	LPT	1480		
SPT	1479					LWKR1	1481	LWKR1	1481		
LPT	1480					LWKR2	1482	LWKR2	1482		
LWKR1	1481	MWKR1	1483			MWKR1	1483				
LWKR2	1482	MWKR2	1484			MWKR2	1484				
MWKR1	1483	13	13			FiFo	1485	FiFo	1485		
MWKR2	1484					FiFo	1485				

14	SPT	1486
	LPT	1487
	LWKR1	1488
	LWKR2	1489
	MWKR1	1490
	MWKR2	1491
	FiFo	1492
	SPT	1493
	LPT	1494
	LWKR1	1495
	LWKR2	1496
	MWKR1	1497
	MWKR2	1498
	15	FiFo
SPT		1500
LPT		1501
LWKR1		1502
LWKR2		1503
MWKR1		1504
MWKR2		1505
16	FiFo	1506
	SPT	1507
	LPT	1508
	LWKR1	1509
	LWKR2	1510
	MWKR1	1511
	MWKR2	1512
17	FiFo	1513
	SPT	1514
	LPT	1515
	LWKR1	1516
18	LWKR2	1517
	MWKR1	1518
	MWKR2	1519
	FiFo	1520
	SPT	1521
	LPT	1522
	LWKR1	1523
	LWKR2	1524
	MWKR1	1525
	MWKR2	1526
19	FiFo	1527
	SPT	1528
	LPT	1529
	LWKR1	1530
	LWKR2	1531
	MWKR1	1532
20	MWKR2	1533
	FiFo	1534
	SPT	1535
	LPT	1536
21	LWKR1	1537
	LWKR2	1538
	MWKR1	1539
	MWKR2	1540
	FiFo	1541
22	SPT	1542
	LPT	1543
	LWKR1	1544
	LWKR2	1545
23	MWKR1	1546
	MWKR2	1547
	LWKR1	1547
24	SPT	1548
	LPT	1549
	LWKR1	1550
	LWKR2	1551
25	MWKR1	1552
	MWKR2	1553
	FiFo	1554
	SPT	1555
	LPT	1556
26	LWKR1	1557
	LWKR2	1558
	MWKR1	1559
	MWKR2	1560
27	FiFo	1561
	FiFo	1562
	SPT	1563
28	LPT	1564
	LWKR1	1565
	LWKR2	1566
	MWKR1	1567
29	MWKR2	1568
	FiFo	1569
	SPT	1570
	LPT	1571
	LWKR1	1572
30	LWKR2	1573
	MWKR1	1574
	MWKR2	1575
	FiFo	1576
22	SPT	1577
	LPT	1578
	LWKR1	1578
27	LWKR2	1579
	LWKR1	1580
	MWKR1	1581
	MWKR2	1582
28	FiFo	1583
	SPT	1584
	LPT	1585
	LWKR1	1586
	LWKR2	1587
	MWKR1	1588
	MWKR2	1589
29	FiFo	1590
	SPT	1591
	LPT	1592
	LWKR1	1593
	LWKR2	1594
30	MWKR1	1595
	MWKR2	1596
	FiFo	1597
	SPT	1598
27	LPT	1599
	LWKR1	1600
	LWKR2	1601
28	MWKR1	1602
	MWKR2	1603
	FiFo	1604
29	SPT	1605
	LPT	1606
	LWKR1	1607
30	LWKR2	1608
	MWKR1	1609

31	MWKR2	1610
	FiFo	1611
	SPT	1612
	LPT	1613
	LWKR1	1614
	LWKR2	1615
	MWKR1	1616
	MWKR2	1617
32	FiFo	1618
	SPT	1619
	LPT	1620
	LWKR1	1621
	LWKR2	1622
	MWKR1	1623
	MWKR2	1624
	33	FiFo
SPT		1626
LPT		1627
LWKR1		1628
LWKR2		1629
MWKR1		1630
MWKR2		1631
34		FiFo
	SPT	1633
	LPT	1634
	LWKR1	1635
	LWKR2	1636
	MWKR1	1637
	MWKR2	1638
	35	FiFo
SPT		1640
36	LPT	1641
	LWKR1	1642
	LWKR2	1643
	MWKR1	1644
	MWKR2	1645
	FiFo	1646
	SPT	1647
	LPT	1648
37	LWKR1	1649
	LWKR2	1650
	MWKR1	1651
	MWKR2	1652
	FiFo	1653
	SPT	1654
	LPT	1655
	LWKR1	1656
38	LWKR2	1657
	MWKR1	1658
	MWKR2	1659
	FiFo	1660
	SPT	1661
	LPT	1662
	LWKR1	1663
	LWKR2	1664
39	MWKR1	1665
	MWKR2	1666
	FiFo	1667
	SPT	1668
	LPT	1669
	LWKR1	1670
	LWKR2	1671
	40	MWKR1
MWKR2		1673
FiFo		1674
SPT		1675
LPT		1676
LWKR1		1677
LWKR2		1678
MWKR1		1679
41	MWKR2	1680
	FiFo	1681
	SPT	1682
	LPT	1683
	LWKR1	1684
	LWKR2	1685
	MWKR1	1686
	MWKR2	1687
42	FiFo	1688
	SPT	1689
	LPT	1690
	LWKR1	1691
	LWKR2	1692
	MWKR1	1693
	MWKR2	1694
	43	FiFo
SPT		1696
LPT		1697
LWKR1		1698
LWKR2		1699
MWKR1		1700
MWKR2		1701
44		FiFo
	SPT	1703
45	LPT	1704
	LWKR1	1705
	LWKR2	1706
	MWKR1	1707
	MWKR2	1708
	FiFo	1709
	SPT	1710
	LPT	1711
46	LWKR1	1712
	LWKR2	1713
	MWKR1	1714
	MWKR2	1715
	FiFo	1716
	SPT	1717
	LPT	1718
	LWKR1	1719
47	LWKR2	1720
	MWKR1	1721
	MWKR2	1722
	FiFo	1723
	SPT	1724
	LPT	1725
	LWKR1	1726
	LWKR2	1727
48	MWKR1	1728
	MWKR2	1729
	FiFo	1730
	SPT	1731
	LPT	1732
	LWKR1	1733

49	LWKR2	1734
	MWKR1	1735
	MWKR2	1736
	FiFo	1737
	SPT	1738
	LPT	1739
	LWKR1	1740
	LWKR2	1741
	MWKR1	1742
	MWKR2	1743
50	FiFo	1744
	SPT	1745
	LPT	1746
	LWKR1	1747
	LWKR2	1748
	MWKR1	1749
	MWKR2	1750

Tableau 1 : Plan d'expérimentations

N° expérience	JOB	DO1	DO2	DO3	DO4												
1	J1	100	100	100	100	11	J4	100	96	108	112	21	J1	87	83	100	80
	J2	100	100	100	100		J1	95	100	92	105		J2	82	90	98	88
	J3	100	100	100	100		J2	90	100	95	115		J3	85	92	100	81
	J4	100	100	100	100		J3	98	100	94	114		J4	86	89	95	91
2	J1	95	100	100	100	12	J4	96	100	99	112	22	J1	144	138	135	150
	J2	90	100	100	100		J1	95	102	100	105		J2	139	135	128	148
	J3	98	100	100	100		J2	90	110	100	115		J3	135	125	141	146
	J4	96	100	100	100		J3	98	105	100	114		J4	132	140	136	145
3	J1	100	95	100	100	13	J4	96	108	100	112	23	J1	148	160	147	135
	J2	100	90	100	100		J1	92	100	100	100		J2	136	156	149	142
	J3	100	98	100	100		J2	88	100	100	100		J3	150	158	146	145
	J4	100	96	100	100		J3	95	100	100	100		J4	140	152	138	148
4	J1	100	100	95	100	14	J4	85	100	100	100	24	J1	150	150	146	150
	J2	100	100	90	100		J1	100	90	100	100		J2	150	150	142	150
	J3	100	100	98	100		J2	100	85	100	100		J3	150	150	145	150
	J4	100	100	96	100		J3	100	80	100	100		J4	150	150	148	150
5	J1	100	100	100	95	15	J4	100	95	100	100	25	J1	146	150	150	150
	J2	100	100	100	90		J1	81	88	89	87		J2	142	150	150	150
	J3	100	100	100	98		J2	90	78	86	88		J3	145	150	150	150
	J4	100	100	100	96		J3	85	92	78	86		J4	148	150	150	150
6	J1	95	102	100	100	16	J4	90	92	78	84	26	J1	150	146	150	150
	J2	90	110	100	100		J1	58	60	75	70		J2	150	142	150	150
	J3	98	105	100	100		J2	68	62	72	59		J3	150	145	150	150
	J4	96	108	100	100		J3	63	69	78	60		J4	150	148	150	150
7	J1	100	95	102	100	17	J4	67	57	76	64	27	J1	150	150	150	146
	J2	100	90	110	100		J1	35	46	50	47		J2	150	150	150	142
	J3	100	98	105	100		J2	39	32	58	45		J3	150	150	150	145
	J4	100	96	108	100		J3	40	42	48	39		J4	150	150	150	148
8	J1	95	100	100	102	18	J4	42	48	56	38	28	J1	146	143	150	150
	J2	90	100	100	110		J1	42	35	38	30		J2	142	147	150	150
	J3	98	100	100	105		J2	52	30	45	35		J3	145	149	150	150
	J4	96	100	100	108		J3	48	39	40	33		J4	148	142	150	150
9	J1	95	102	92	100	19	J4	50	39	42	32	29	J1	146	150	143	150
	J2	90	110	95	100		J1	105	110	100	100		J2	142	150	147	150
	J3	98	105	94	100		J2	110	118	100	100		J3	145	150	149	150
	J4	96	108	97	100		J3	112	115	100	100		J4	148	150	142	150
10	J1	100	95	102	105	20	J4	108	125	100	100	30	J1	146	158	150	150
	J2	100	90	110	115		J1	100	108	122	105		J2	142	155	150	150
	J3	100	98	105	114		J2	114	117	125	119		J3	145	156	150	150
							J4	102	100	120	100	31	J1	146	150	158	150

Tableau 2 : les durées opératoires

	J2	142	150	155	150	
	J3	142	150	156	150	
	J4	148	150	160	150	
32	J1	146	150	150	158	
	J2	142	150	150	155	
	J3	142	150	150	156	
	J4	148	150	150	160	
33	J1	158	146	150	150	
	J2	155	142	150	150	
	J3	156	142	150	150	
	J4	160	148	150	150	
34	J1	158	150	146	150	
	J2	155	150	142	150	
	J3	156	150	145	150	
	J4	160	150	148	150	
35	J1	158	150	150	146	
	J2	155	150	150	142	
	J3	156	150	150	145	
	J4	160	150	150	148	
36	J1	150	146	158	150	
	J2	150	142	155	150	
	J3	150	145	156	150	
	J4	150	148	160	150	
37	J1	150	146	150	158	
	J2	150	142	150	155	
	J3	150	145	150	156	
	J4	150	148	150	160	
38	J1	150	158	146	150	
	J2	150	155	142	150	
	J3	150	156	145	150	
	J4	150	160	148	150	
39	J1	150	158	150	146	
	J2	150	155	150	142	
	J3	150	156	150	145	
	J4	150	160	150	148	
40	J1	150	150	158	146	
	J2	150	150	155	142	
	J3	150	150	156	145	
	J4	150	150	160	148	
41	J1	150	150	146	158	
	J2	150	150	142	155	
	J3	150	150	145	156	
	J4	150	150	148	160	
	42	J1	110	100	100	100
		J2	105	100	100	100
J3		103	100	100	100	
J4		108	100	100	100	
43	J1	100	110	100	100	
	J2	100	105	100	100	
	J3	100	103	100	100	
	J4	100	108	100	100	
44	J1	100	100	110	100	
	J2	100	100	105	100	
	J3	100	100	103	100	
	J4	100	100	108	100	
45	J1	100	100	100	110	
	J2	100	100	100	105	
	J3	100	100	100	103	
	J4	100	100	100	108	
46	J1	110	92	100	100	
	J2	105	95	100	100	
	J3	103	90	100	100	
	J4	108	98	100	100	
47	J1	110	100	92	100	
	J2	105	100	95	100	
	J3	103	100	90	100	
	J4	108	100	98	100	
48	J1	110	92	100	105	
	J2	105	95	100	99	
	J3	103	90	100	97	
	J4	108	98	100	100	
49	J1	110	92	105	100	
	J2	105	95	99	100	
	J3	103	90	97	100	
	J4	108	98	100	100	
50	J1	100	110	100	100	
	J2	100	105	100	100	
	J3	100	115	100	100	
	J4	100	125	100	100	

ملخص

في هذه الأطروحة نتناول مشاكل الجدولة في محيط ورشة صناعية مرنة. الجدولة من النوع المفتوح. الهدف هو تقليل مدة تواجد القطع في الورشة و ذلك ببرمجة مبنية على قواعد الأولوية مركبة بخط لا خطية غير محدد. المشكل المدروس هو $Om| \tau_j | F$. مقارنة مقارنة تجريبية محضة مستعملين تقنيات التصنع و ذلك عبر توليد برنامج تجريبي يتضمن عدة قواعد تسيير مقترحة لتحسين مرد و دية الورشة.

المفاتيح

الورشات المرنة، مشاكل الجدولة، الورشات المفتوحة، مقارنة تجريبية، تقنيات التصنع.

Résumé

Dans ce présent travail, nous traitons un problème d'ordonnancement du type Open Shop dans un environnement d'atelier flexible. Le problème étudié est $Om| \tau_j | F$. Notre objectif est la réduction du temps total de séjours des pièces dans un système cyclique conçu autour d'un convoyeur en boucle, ceci est fait par génération de plusieurs règles de priorité au niveau des postes associé à des plans non linéaires non prédéterminés. Les temps de transfert entre les stations sont considérés. Du fait de la complexité NP-difficile au sens fort du problème Open Shop considéré, la nature dynamique des règles d'ordonnancement testées et la typologie circulaire de la cellule étudiée (rendant le problème « plus combinatoire » par rapport aux lignes d'assemblage linéaires conventionnelles) nous avons opté pour une approche purement expérimentale moyennant la simulation.

Mots clés : *Système Flexible de Production, Atelier Flexible, FMS, Système Cyclique d'assemblage, Ordonnancement, Open Shop, Robot Goulot, Temps de Séjours : F, Simulation, Approche Expérimentale.*

Abstract

In this paper, we study the scheduling problem in flexible manufacturing system (FMS) precisely in circular cyclic assembly system. Our objective is to minimize the flow Time of parts in this system by generation of several rules of priority on the level of the stations associated with not predetermined nonlinear plans. The objective function is to minimize the total flow time of jobs in the shop, the transfer times between stations are considered. Then the scheduling problem consider is $Om| \tau_j | F$. Seeing the strong Np-hard complexity of the Open Shop problem considered, the dynamic nature of the rules of scheduling tested and the circular typology of the studied cell (making the problem "combinative" compared to the conventional assembly linear lines), an experimental approach is developed and validated by simulation results.

Keywords: *Scheduling, FMS, Cyclic Assembly System, Bottleneck Robot, Flow Time, Open Shop. Experimental Approach, Simulation.*