

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'électronique

Mémoire de Magister en « Automatique-Productique-Informatique »
Option « Productique »

Intitulé :

Manipulation des routages alternatifs en temps réel dans les systèmes flexibles de production

Présenté le : *12 Juin 2006* par :

Ahmed HASSAM

Devant le Jury :

Président :

Noureddine GHOUALI	Professeur	UABB	Tlemcen, Algérie
--------------------	------------	------	------------------

Examineurs :

Maryline CHETTO	Professeur	IUT	Nantes, France
Abdelmadjid CHEIKH	Professeur	UABB	Tlemcen, Algérie

Encadreur :

Zaki Sari	Maître de conférence	UABB	Tlemcen, Algérie
-----------	----------------------	------	------------------

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Monsieur Zaki SARI, de m'avoir fait l'honneur d'accepter la direction de ce mémoire, il m'a accordé sa confiance en me laissant une grande liberté de pensée et d'action, tout en me faisant part de ses avis, conseils et suggestions.

Monsieur Noureddine GOUALI, Professeur à l'université de Tlemcen, a spontanément accepté, malgré sa très lourde charge de travail. Je tiens à le remercier chaleureusement pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire

Je tiens également à remercier Madame Maryline CHETTO, Professeur à l'université de Nantes -France, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à Monsieur Abdelmadjid CHEIKH Professeur à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur d'expertiser ce travail.

Merci également à toute personne avec qui j'ai travaillé ou que j'ai simplement eu le plaisir de côtoyer pendant ces dernières années. Je pense particulièrement aux membres de l'équipe productive, aux étudiants de la première promotion API, et à tous les thésards du département d'électronique. Je remercie également chaleureusement tous mes amis.

Mes derniers mots seront pour ma famille : mes parents, mes frères et ma sœur, qui ont toujours eu confiance en moi.

Enfin, je remercie Dieu Tous Puissant.

Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités sur les systèmes flexibles de production	3
1.1 Introduction	3
1.2 Système flexible de production	3
1.2.1 La flexibilité	3
1.2.2 La réactivité	6
1.2.3 La robustesse	6
1.2.4 Les structures de production flexibles et réactives	7
1.3 Technologie de Groupe	16
1.3.1 Introduction	16
1.3.2 Classification des techniques de la technologie de groupe	18
1.4 Système de fabrication cellulaire	20
1.4.1 Introduction	20
1.4.2 Contraintes de conception et de planification dans les systèmes de production cellulaire	20
1.4.3 Méthodes de conception des cellules de production	21
1.4.4. Conception des cellules de production	30
1.5 Conclusion	31
Chapitre 2 Ordonnancement et règles de priorité dans les Systèmes Flexible de Production	32
2.1 Ordonnancement des Systèmes Flexibles de Production	32
2.1.1 Définition	32
2.1.2 Contraintes sur l'ordonnancement	33
2.1.3 Objectifs de l'ordonnancement	33
2.1.4 Le problème d'ordonnancement	35
2.1.5 Les différentes approches de résolution	35
2.2 Les règles de priorité	42
2.2.1 Définition	43
2.2.2 Les principaux critères d'évaluation	43
2.2.3 Classification des règles de priorité	47
2.2.4 Combinaison des règles de priorité	49
2.3 Conclusion	50
Chapitre 3 La règle DMM et proposition de la règle DMM modifiée	51
3.1 Introduction	51
3.2 Règle de sélection des routages alternatifs en temps réel DMM	52
3.3 Présentation de la règle DMM	54
3.3.1 Algorithme de la règle DMM	54
3.3.2 Organigramme de la règle DMM	55
3.4 Présentation de la règle DMM modifiée	57
3.4.1 Algorithme de la règle DMM modifiée	57
3.4.2 Organigramme de la règle DMM modifiée	58
3.5 Présentation du système FMS étudié	60
3.6 Conclusion	62

Chapitre 4 Résultats & Interprétations	63
4.1 Introduction	63
4.2 Présentation du modèle simulé par ARENA	63
4.3 Etude comparative entre la méthode DMM et la méthode DMM modifiée	68
4.3.1 Taux de production	68
4.3.2 Temps de cycle	72
4.3.3 Les en-cours	75
4.3.4 Taux d'utilisation des machines	77
4.3.5 Taux d'utilisation de l'AGV	87
4.4 Etude comparative entre la règle DMM et la règle DMM modifiée avec introduction de pannes	90
4.4.1 Taux de production	90
4.4.2 Temps de cycle	91
4.4.3 Les en-cours	93
4.4.4 Taux d'utilisation des machines	94
4.4.5 Taux d'utilisation de l'AGV	98
4.5 Conclusion	100
Conclusion générale	101
Annexe A	103
Annexe B	104
Annexe C	106
Bibliographie	114

Liste des figures

1.1	Flexibilité d'un système de production	5
1.2	Les différents types de production	8
1.3	Architecture centralisée	11
1.4	Architecture hiérarchique	13
1.5	Décentralisation par les tâches	14
1.6	Organisation de l'architecture CODECO	16
1.7	Représentation de la matrice (a) par le Graphe Bipartite	28
1.8	Représentation de la matrice (a) par le Graphe Bipartite avec deux parties Disjointes	28
1.9	Le graphe de transition représentant la matrice d'incidence (a)	29
1.10	Graphe de limite correspondant à la matrice (a)	29
1.11	Hiérarchie de planification des cellules de fabrication	31
2.1	Structure d'objectifs [Grabot 98]	34
2.2	Une approche coopérative de l'ordonnancement [Grabot et al. 99]	41
2.3	Une approche interactive de l'ordonnancement	42
3.1	Organigramme de la règle DMM [Saygin et al 01]	56
3.2	Organigramme de la règle DMM modifiée	59
3.3	Configuration du modèle FMS étudié [Saygin et al 01]	60
4.1	Configuration du modèle FMS	64
4.2	Représentation des stations	65
4.3	Représentation de la station de chargement	65
4.4	Module représentant la sélection de routage pour l'entité 1 (pièce A)	66
4.5	Représentation de la station FV1	66
4.6	Représentation de la station FV2	66
4.7	Représentation de la station T1	67
4.8	Représentation de la station T2	67
4.9	Représentation de la station TP	67
4.10	Représentation de la station FH1	67
4.11	Représentation de la station FH2	68
4.12	Représentation de la station de déchargement	68
4.13	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2	69
4.14	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 4	69
4.15	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 6	70
4.16	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 8	70
4.17	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/10 min	71
4.18	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min	71
4.19	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 2	72
4.20	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 4	73
4.21	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 6	73
4.22	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 8	74
4.23	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/10 min	74
4.24	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min	75
4.25	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2	76
4.26	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 6	76
4.27	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/10 min	77

4.28	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min	77
4.29	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2	78
4.30	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 6	79
4.31	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2	79
4.32	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 6	80
4.33	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2	81
4.34	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 6	81
4.35	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2	82
4.36	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 6	82
4.37	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	83
4.38	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	84
4.39	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	84
4.40	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	85
4.41	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/10 min	85
4.42	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min	86
4.43	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	86
4.44	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	87
4.45	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2	88
4.46	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 6	88
4.47	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/10 min	89
4.48	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min	89
4.49	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2	90
4.50	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min	91
4.51	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 2	92
4.52	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min	92
4.53	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2	93
4.54	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min	94
4.55	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2	95
4.56	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2	95
4.57	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2	96
4.58	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2	96
4.59	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	97

4.60	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	97
4.61	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min	98
4.62	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	98
4.63	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2	99
4.64	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min	99

Liste des tableaux

3.1	Routages alternatifs et temps de traitement des pièces [Saygin et al 01]	61
4.1	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2	69
4.2	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 4	69
4.3	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 6	70
4.4	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 8	70
4.5	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/10 min	71
4.6	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min	71
4.7	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 2	72
4.8	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 4	72
4.9	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 6	73
4.10	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 8	73
4.11	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/10 min	74
4.12	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min	75
4.13	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2	75
4.14	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 6	76
4.15	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/10 min	76
4.16	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min	77
4.17	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2	78
4.18	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 6	78
4.19	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2	79
4.20	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 6	80
4.21	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2	80
4.22	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 6	81
4.23	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2	81
4.24	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 6	82
4.25	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	83
4.26	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	83
4.27	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	84
4.28	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	85
4.29	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/10 min	85
4.30	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min	86
4.31	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min	86

4.32	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	87
4.33	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2	87
4.34	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 6	88
4.35	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/10 min	88
4.36	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min	89
4.37	Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2	90
4.38	Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min	91
4.39	Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 2	91
4.40	Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min	92
4.41	Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2	93
4.42	Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min	93
4.43	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2	94
4.44	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2	95
4.45	Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2	95
4.46	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2	96
4.47	Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	96
4.48	Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	97
4.49	Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min	97
4.50	Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min	98
4.51	Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2	99
4.52	Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min	99

Introduction générale

Aujourd'hui, les entreprises doivent faire face à l'augmentation de la concurrence, à la pression de plus en plus forte de leur environnement (clients et concurrents) pour un renouvellement rapide des produits, mais aussi une augmentation de l'offre vis à vis de la demande. Les systèmes de production et de fabrication actuels offrent une grande flexibilité, tel que les systèmes flexibles de production (FMS) qui fournissent des avantages divers comme l'augmentation de l'utilisation des ressources, l'augmentation de la productivité, la réduction des encours etc. Dans de tels systèmes, les décisions d'allocation et d'ordonnement des opérations et des plans de processus sont généralement prises dynamiquement et à très court terme, en fonction de l'état du système de production (disponibilité des ressources, disponibilité du système de manutention, présence de goulots d'étranglement), des caractéristiques du plan de production (date échues des ordres de fabrication) et des objectifs de production (augmentation du taux de production, réduire les encours).

L'ordonnement en temps réel (dynamique) des opérations, utilise plusieurs approches tel que la gestion des files d'attente par des règles de priorité. Cette approche d'ordonnement est l'une des plus simples et des plus utilisées. Ces règles de priorité ont suscité depuis plusieurs années beaucoup de travaux de recherche afin de trouver des solutions aux problèmes d'ordonnement temps réel.

Parmi les règles et les méthodes d'ordonnement en temps réel nous pouvons citer la règle DMM (Dissimilarity Maximization Method), qui est une règle de sélection de routage alternatif en temps réel dans un FMS. Cette règle développée par [Saygin et al 01] a pour objectif de sélectionner pour une pièce qui arrive dans un système, un routage parmi plusieurs autres routages disponibles pour cette pièce en se basant sur des coefficients de dissimilitude entre les machines.

Dans ce mémoire, nous proposons une amélioration de la règle DMM dans le but d'améliorer les performances du système de production déjà données par cette règle (taux de production, taux d'utilisation des machines, taux d'utilisation du système de manutention). Dans notre étude nous allons utiliser la simulation afin de montrer les résultats obtenus par la règle DMM et par la règle que nous allons proposer.

Nous avons partagé ce travail en quatre chapitres, le premier chapitre représente une introduction aux systèmes de production afin de donner des notions fondamentales aux non

spécialistes. Il contient trois parties principales : la première est consacrée aux systèmes flexibles de production où nous allons parler de la flexibilité, la réactivité et la robustesse des systèmes flexibles puis nous allons parler des architectures de pilotage où nous citons les architectures centralisées, les architectures hiérarchisées et les architectures décentralisées. La deuxième partie de ce chapitre est réservée au concept de la technologie de groupe, qui comprend la définition, les avantages, la classification des techniques de la technologie de groupe selon les chercheurs. La dernière partie du premier chapitre va être consacrée au système de fabrication cellulaire en citant les contraintes de conception et de planification et certaines méthodes de conception des cellules de production.

Le deuxième chapitre est partagé en deux parties. Dans un premier temps nous allons parler de l'ordonnancement des systèmes flexibles de production. Après avoir défini l'ordonnancement, nous donnons les contraintes et les objectifs de ce dernier. Ensuite nous traitons le problème d'ordonnancement de manière générale où nous présentons un bref aperçu des principales approches, directes ou itératives, permettant de résoudre le problème d'ordonnancement. Dans une seconde partie de ce chapitre, nous nous intéressons aux règles de priorité. D'abord nous proposons des critères d'évaluation et de mesures de performance des règles de priorité puis nous tentons d'établir une classification des règles de priorité. Enfin nous abordons l'aspect de combinaison des règles de priorité en donnant les intérêts et les limites de cet aspect.

Dans le chapitre 3, nous présentons la méthode DMM (Dissimilarity Maximization Method) développée par [Saygin et al 01], puis nous allons proposer notre travail qui consiste à améliorer la méthode DMM pour la sélection des routages alternatifs en temps réel, afin d'augmenter les performances des systèmes flexibles de production tel que le taux de production, l'utilisation des ressources et l'utilisation du système de manutention.

Le dernier chapitre sera réservé à la présentation des résultats obtenus et de leurs interprétations. Ces résultats acquis après plusieurs simulations et comparaisons de la méthode DMM et de la méthode que nous proposons, montrent une amélioration significative des performances des taux de production, des taux d'utilisation des ressources et des taux d'utilisation du système de manutention pour un système flexible de production saturé, même avec la présence de pannes, qui représentent un facteur défavorable pour ces systèmes.

Chapitre 1 Généralités sur les systèmes flexibles de production

1.1 Introduction :

Jusqu'à une période récente, les performances d'un système de production ont été estimées au moyen du seul critère de productivité. Tant que l'entreprise est assurée de vendre rapidement l'ensemble de sa production, ce critère est directement lié au profit réalisé.

Or, cette situation caractéristique des premières décennies de l'ère industrielle, a depuis maintenant une vingtaine d'années, tendance à disparaître et l'écoulement des stocks produits devient de plus en plus hypothétique tant la demande du marché évolue rapidement. Dès lors, le seul critère de productivité, dissocié du critère économique, devient insuffisant et des critères tels que la flexibilité et la réactivité deviennent cruciaux. Leur fonction est schématiquement, de permettre au système de production de suivre les évolutions du marché afin d'assurer en permanence l'adéquation entre l'offre « produit » et la demande « client ».

Ce contexte explique par ailleurs la nécessité de réduire les délais entre l'étude de marché (dont la durée de validité est souvent limitée à quelques années, voir pour certains produits, à quelques mois) et la mise en vente du produit.

1.2 Système flexible de production :

1.2.1. La flexibilité [Beslon 95], [Draghici et al 98] :

La flexibilité est la notion principale utilisée dans la conception des systèmes automatisés modernes de fabrication comme les systèmes flexibles manufacturiers.

On peut définir la flexibilité par l'ensemble des propriétés et qualités d'un système manufacturier qui peut supporter des changements dans les types de produits et la capacité de production. Ces changements peuvent être :

- Internes : comme les pannes des équipements, pannes des systèmes informatiques (logiciels de gestion), absentéisme des travailleurs, variations des temps de fabrication etc.
- Externes : comme le changement dans la conception des produits, la complexité de conception des produits, la variation de la demande etc.

Pour absorber les incertitudes causées par les changements de conception des produits, le système de fabrication doit être flexible et capable de fabriquer différents types de produits avec un temps de

fabrication et un coût minimum. Donc on peut dire que la flexibilité est la capacité des systèmes de fabrication à répondre à la fois aux changements internes et externes.

Plusieurs types de flexibilité [Abrudan 96], [Adamou 97] 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 de gammes secondaires) ou de choisir la destination suivante après chaque opération.
- **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 re-programmation.
- **Flexibilité de moyens** : Elle caractérise la potentialité physique, pour un système de production, d'usiner et d'assembler des pièces différentes en quantité variable. C'est essentiellement la variété des gammes exécutables par le système. La flexibilité de moyens est essentiellement liée à la structure physique du système, par exemple à l'utilisation de machines-outils à commande numérique (MOCN).
- **Flexibilité de pilotage** : C'est l'exploitation réelle par le système de pilotage, des possibilités de la flexibilité de moyens, c'est-à-dire entre autres sa capacité à fournir des gammes de remplacement, des modes dégradés ou plus simplement à fournir un ordonnancement adapté à tous les niveaux, à la fabrication de pièces différentes (présence simultanée des outils, matières et gammes sur une machine).

- **Flexibilité d'évolution** : La flexibilité d'évolution caractérise donc la capacité du système à évoluer sans heurt, par exemple sa capacité à utiliser de nouveaux outils, de nouvelles gammes, ou à intégrer une nouvelle machine sans ralentir la production.

La flexibilité d'évolution est liée à la fois au système physique (réaménagement des systèmes de transport, place disponible, ...) et au système de pilotage (possibilité d'intégrer de nouveaux emplacements, de nouvelles gammes ou de nouvelles machines sans remettre en cause tout le processus de pilotage).

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.

Nous appelons flexibilité la capacité d'un système de production à évoluer et à s'adapter pour répondre immédiatement et sans dégradation des performances à des ordres de fabrication différents.

Suivant cette définition, la flexibilité correspond à la capacité d'absorption des événements (perturbateurs ou non) issus des niveaux décisionnels supérieurs de l'entreprise.

Ces événements bien que pouvant être très divers, correspondent toujours à des ordres de fabrication (ou à des modifications d'ordres de fabrication). Ils entraînent donc une modification de la production de l'atelier.

La flexibilité est donc une caractéristique externe des systèmes de production. Elle suppose en particulier que les fonctions connexes d'approvisionnement et de distribution sont, elles aussi, capables de s'adapter aux variations de la production (figure 1.1).

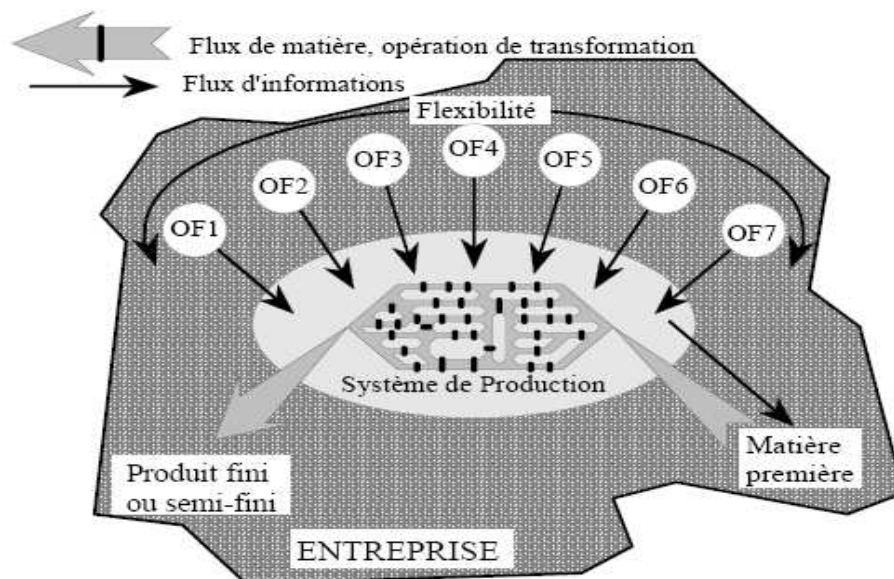


Figure 1.1 : Flexibilité d'un système de production.

1.2.2. La réactivité [Beslon 95], [Draghici et al 98] :

Si la flexibilité est la capacité pour un système de production, à accepter des ordres de fabrication différents, la réactivité est la capacité d'absorption des perturbations (l'ensemble des événements inattendus, à l'exception des ordres de fabrication) toujours sans dégradation de la productivité.

A l'inverse de la flexibilité qui représente un potentiel d'utilisation du système de production (la marge de manoeuvre des niveaux décisionnels supérieurs), la réactivité est une caractéristique interne du système. Ainsi un système totalement réactif est aussi totalement transparent. Tout ordre de fabrication conduit à la production des pièces désirées en temps voulu quelque soient les événements perturbateurs apparus au cours de la production (bris d'outil, panne de machine, ...).

1.2.3. La robustesse [Beslon 95], [Draghici et al 98] :

La robustesse est comme la réactivité, une caractéristique interne des systèmes de production. Toutes deux sont d'ailleurs fortement liées. En effet, les perturbations apparaissant au cours de la production peuvent être d'origines internes (panne, bris d'outil, ...) ou externes (rupture d'approvisionnement, erreur d'étiquetage, ...). Si les origines externes ne peuvent pas être directement éliminées (par la politique interne de l'atelier), celles internes peuvent, par contre être évitées en utilisant un matériel plus robuste. La robustesse est donc la capacité d'un système de production à transformer des matières premières en produits finis ou semi-finis sans générer d'événements perturbateurs, c'est-à-dire sans dégradation de ses constituants.

La robustesse peut donc être considérée comme l'application aux systèmes de production du principe « d'homéostasie » développé dans le cadre de la cybernétique. L'outil principal de la robustesse est la maintenance préventive.

La notion de robustesse est souvent associée avec celle de « tolérance » qui est, elle aussi, fortement liée à la réactivité. La tolérance est la capacité du système de production à maintenir son fonctionnement (sans modifications) malgré l'apparition d'événements perturbateurs. C'est donc une caractéristique particulière du système : des aléas peuvent apparaître en cours de production (contrairement à la robustesse) mais le système est conçu et dimensionné afin qu'il n'y ait aucun caractère perturbateur pour la production. La réunion de ces deux aspects conduit à une définition plus large de la robustesse : la robustesse d'un système de production est sa capacité à réaliser les objectifs de production (c'est-à-dire à suivre le plan de production) en absorbant les perturbations (internes ou externes).

1.2.4. Les structures de production flexibles et réactives [Beslon 95], [Draghici et al 98] :

La transition vers une architecture fédératrice décentralisée a entraîné, au niveau du système de production, un accroissement important des capacités de décision. En effet, la flexibilité et la réactivité imposent un traitement local de l'ensemble des événements entrants.

Seuls les flux d'information indispensables au bon fonctionnement d'un système de production doivent donc être conservés : les ordres de fabrication et les commandes de matières premières. Tout autre échange d'information entraîne une hausse importante des délais. De plus les échanges de matières doivent être limités au maximum (zéro stock) afin de limiter les coûts de production.

L'utilisation des Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) et l'automatisation ont permis de réaliser un compromis entre la productivité des lignes de transfert et la flexibilité/réactivité des machines servies par l'opérateur humain (figure 1.2).

La décomposition des différents types de production n'est en fait que le fruit de l'introduction progressive de l'informatique au coeur du système de production.

L'automatisation flexible est ainsi largement due à l'incorporation de la flexibilité propre à l'informatique dans les schémas de pilotage des systèmes de production. Cette évolution peut être décomposée en trois étapes majeures d'après [Hatchuel 92].

Dans un premier temps l'apparition de l'informatique industrielle a permis la création de processus automatiques plus complexes et plus souples que ceux supportés antérieurement (automatismes mécaniques et automates programmables de la première génération).

L'application de ces processus aux systèmes de production a conduit à l'apparition des MOCN qui permettent d'approcher la productivité et la flexibilité de l'opérateur humain (figure 1.2, flèches 1).

La réactivité, par contre, est loin d'être aussi élevée mais les machines à commande numérique compensent ce défaut par une excellente robustesse.

Dans un second temps, ces mêmes processus automatiques ont permis la réalisation de systèmes robotisés de plus en plus performants. Les MOCN ont alors pu être regroupées en cellules (petits groupes de machines regroupés autour d'un mécanisme robotisé et orienté vers la fabrication d'une gamme de pièce) puis pour des productions en plus grandes séries, en lignes flexibles. Cette structure permet en effet de conserver la cadence propre aux lignes de transfert (en limitant l'appel aux procédures complexes d'ordonnancement) tout en produisant, grâce aux MOCN, des pièces différentes au sein d'une même famille (figure 1.2, flèche 2).

Enfin, dans un dernier temps, l'introduction directe de l'ordinateur dans la gestion du cycle de production a favorisé l'utilisation des techniques avancées de l'informatique (système d'information, intelligence artificielle, ...). Celles-ci ont alors apporté à l'automatisation flexible les processus de

décision qui lui manquaient pour décentraliser au maximum les processus de décision et se libérer des structures linéaires ou parallèles caractéristiques des lignes ou des cellules flexibles.

Dès lors, une pièce entrant dans un atelier peut suivre des cycles d'usinage complexes grâce au gain de puissance apporté par l'informatique au système de pilotage humain (figure 1.2, flèches 3). L'atelier flexible constitue ainsi un compromis efficace entre la flexibilité/réactivité des machines servies manuellement et la productivité des lignes de transfert.

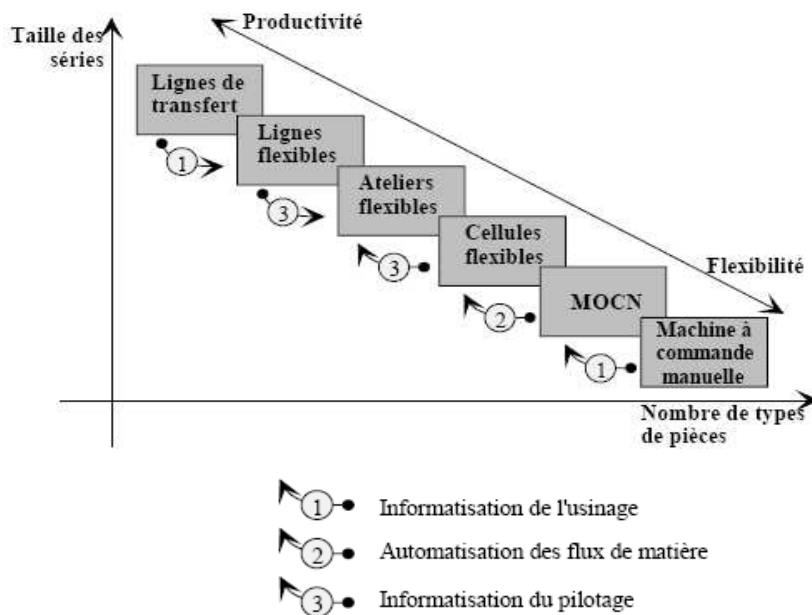


Figure 1.2 : Les différents types de production.

a. Atelier Flexible :

• Définition

Selon [Giard 94] un atelier flexible (Flexible Manufacturing System, FMS) est «Un ensemble de machines reliées par un système de manutention automatique, le tout contrôlé par un système central informatisé ». Cette définition est en parfaite cohérence avec les trois phases énumérées ci-dessus. Cependant elle doit être complétée : ce ne sont pas ses composants qui font d'un système de production, un atelier flexible mais ses performances en termes de flexibilité et de réactivité.

Un atelier flexible doit donc être capable de produire à une cadence relativement élevée (intermédiaire entre la ligne de transfert et les ateliers manuels), des pièces différentes dans un ordre et/ou avec des lots de taille aléatoire. La variabilité des pièces est limitée par des contraintes de conception mais elle doit être supérieure à celle obtenue par la simple utilisation des MOCN.

En effet, l'atelier flexible doit permettre des cycles de fabrication complexes variables, passant par des machines différentes ou dans un ordre différent. Ces caractéristiques le distinguent de la ligne flexible (un cycle de fabrication, plusieurs usinages possibles) et de la cellule flexible qui n'effectue généralement qu'un nombre restreint d'opérations sur une même pièce.

Pour [Bonetto 87], on doit ajouter à la définition précédente deux critères supplémentaires : le niveau d'automatisation et la désynchronisation du travail entre l'homme et la machine.

- **Constituants**

Pour définir les différents éléments constitutifs d'un atelier flexible, nous pouvons préciser ces différentes notions :

- **Les entités** : D'après la définition de l'atelier flexible (voire même de la flexibilité), les entités produites doivent pouvoir être toutes différentes. Cependant leur variabilité est limitée en raison de contraintes techniques évidentes (matière, taille des pièces, ...). De plus les ateliers flexibles sont plus particulièrement adaptés aux entreprises manufacturières et de transformation.

Les entités manipulées seront donc généralement des pièces mécaniques usinées. Malgré ces restrictions, nous sommes loin des principes du « total FMS » développé au Japon au début des années quatre-vingts (cet atelier devait pouvoir usiner, 24h/24, n'importe quelle pièce dans un cube d'acier [Bonetto 87]). Les pièces usinées dans un atelier flexible appartiennent généralement à une famille particulière.

- **Les Ressources** : Un atelier flexible doit être constitué de trois éléments principaux : un système de fabrication, un système de manutention et un système de montage [Bonetto 87]. Cette décomposition n'est cependant que rarement appliquée. On trouve souvent des ateliers de fabrication distincts des ateliers d'assemblage. Quoi qu'il en soit, les ressources sont généralement constituées de MOCN, de robots de manutention ou d'assemblage et d'un système de convoyage complexe, auxquels il faut ajouter les outils de réglage et de test.

- **Les Tâches** : Une tâche est l'application d'une ressource à une entité. L'atelier flexible est donc susceptible d'effectuer un nombre très important de tâches et il est impossible d'en dresser une liste exhaustive.

- **Le Pilotage** : La principale évolution ayant donné naissance aux ateliers flexibles est l'informatisation et l'utilisation de processus de décisions complexes pour le pilotage des systèmes de production. De ce fait, la principale caractéristique d'un atelier flexible tient à son système de pilotage.

Celui-ci doit être capable de gérer dynamiquement un grand nombre de tâches, d'entités et de ressources. Il doit veiller à la parfaite coordination de tous les composants de l'atelier tout en gérant les aléas apparaissant de façon quasi-permanente au cours de la production. Le système de pilotage d'un atelier flexible comprend généralement deux unités distinctes : l'ordonnancement chargé de la planification prédictive et le suivi chargé de l'application du plan. De la répartition exacte des fonctions entre ces deux unités dépend la politique de gestion de l'atelier (court, moyen ou long terme) et sa capacité à gérer l'aléa (réactivité).

b. Les Architectures de pilotage [Beslon 95]:

Les tâches attribuées au système de pilotage sont très diverses. Il doit en effet, effectuer le transfert des ordres de haut niveau émanant des fonctions « décisionnelles » de l'entreprise (essentiellement la GPAO) vers le système physique de production. Pour cela, ces ordres doivent être décomposés en opérations élémentaires regroupées dans la gamme de fabrication. L'ensemble des opérations doit alors être séquencé (ordonné) en fonction des machines disponibles. Le système de pilotage doit ensuite s'assurer de la bonne marche de la production et transmettre vers la GPAO, un compte-rendu de fabrication.

Cette variété d'opérations impose pour le pilote une décomposition modulaire complexe en fonction des règles de gestion choisies.

Nous appelons *architecture de pilotage* d'un atelier flexible sa décomposition en différents groupes fonctionnels et la répartition des différents groupes en fonctions de décision.

Au fur et à mesure du développement des méthodes informatiques et de la montée en puissance du matériel, l'organisation des pilotes d'ateliers flexibles s'est affinée pour aboutir à des architectures modulaires complexes, basées sur des principes de gestion de plus en plus performants.

b.1 Les architectures centralisées :

Issue des premiers pas de l'informatique moderne, cette architecture concentre la gestion de l'atelier au sein d'un unique contrôleur « qui voit tout et fait tout ».

L'ensemble des ordres de fabrication donne lieu à un ordonnancement prévisionnel des différentes tâches (intégrant donc l'ensemble des ressources et des entités). Le calcul de l'ordonnancement est basé sur une charge moyenne des machines ce qui permet de conserver une certaine souplesse d'exécution (maintenance, réparation, ...).

Le pilote peut ainsi continuer à suivre le plan prévisionnel malgré l'apparition de perturbations, dans la mesure où celles-ci restent limitées. Des perturbations trop importantes entraînent cependant un décalage important par rapport à la planification

prévisionnelle. Un nouvel ordonnancement doit alors être calculé pour la période de temps restante (figure 1.3).

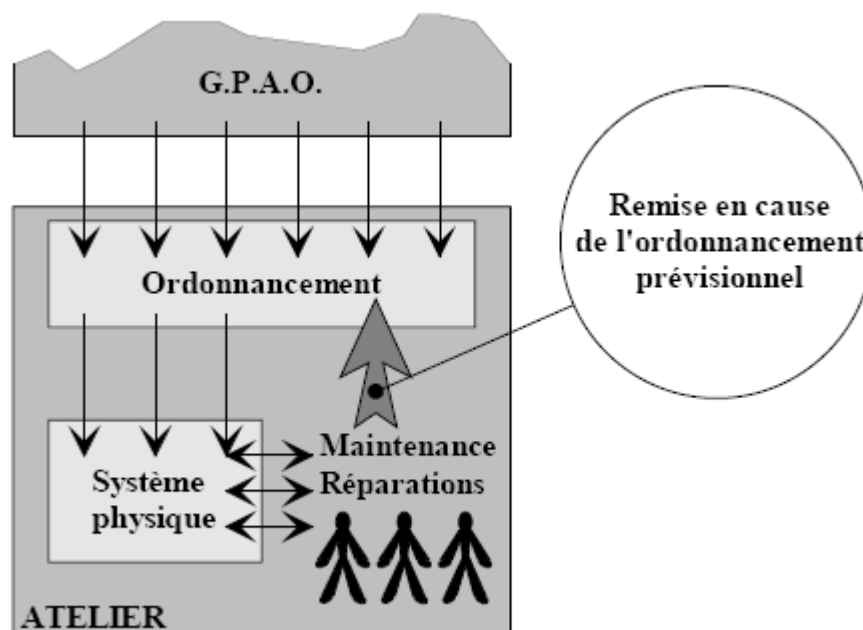


Figure 1.3 : Architecture centralisée

L'inconvénient majeur de cette politique de gestion est le temps de calcul de l'ordonnancement. Etant donné le nombre important de paramètres mis en jeu (nombre de ressources, d'entités, de tâches, ...), le calcul de l'ordonnancement nécessite généralement plusieurs jours. Il est souvent simplifié aux dépens de la flexibilité (limitation du nombre de pièces différentes fabriquées simultanément). L'ordonnancement est ensuite appliqué pendant une période au moins supérieure au temps de calcul (généralement quelques semaines). De plus, la charge des machines est volontairement limitée afin de permettre les opérations de maintenance.

Ce type de pilotage n'est, en effet, absolument pas réactif et l'ordonnancement ne peut être appliqué qu'au prix d'une robustesse à toute épreuve.

L'apparition trop fréquente de perturbations au cours de la production entraîne en effet une explosion combinatoire : le temps de calcul des ordonnancements successifs bloque rapidement la production.

Ce type de contrôleur monolithique est immédiatement saturé lorsque la taille des ateliers croît ou lorsque des aléas apparaissent en cours de production (du fait de l'explosion combinatoire). De plus il ne permet pas de modifier les cycles de production ou la

structure de l'atelier. Ceux-ci sont en effet des paramètres essentiels dans le calcul de l'ordonnancement prévisionnel et leur modification risque de rendre le logiciel inutilisable. Enfin, ce type de planification prévisionnelle sur plusieurs semaines est contraire aux principes du flux tiré et ne peut en aucun cas permettre la fabrication en Juste à Temps.

Diamétralement opposées aux principes des structures flexibles, les architectures centralisées ont été rapidement abandonnées au profit de structures plus complexes mais aussi plus souples à l'utilisation.

b.2 Les architectures hiérarchisées :

Tout en conservant le principe de la planification prévisionnelle, les architectures hiérarchisées opèrent une division successive du travail au fur et à mesure qu'on descend dans les couches hiérarchiques.

A chaque étape, le travail à effectuer est réparti entre plusieurs modules fonctionnels qui traitent chacun un aspect particulier du problème. Il n'y a pas dans cette architecture de liaisons transversales entre les différents modules (figure 1.4).

Par rapport au modèle centralisé, la décomposition hiérarchique permet de limiter l'impact des perturbations. Ainsi, dans l'exemple présenté figure 1.4, les perturbations causées par l'arrêt d'une machine peuvent rester confinées au module « usinage » si une deuxième machine peut recevoir le surplus de travail correspondant. L'apparition de perturbations de plus grande ampleur entraîne cependant la remise en cause des décisions de haut niveau.

C'est en particulier le cas lorsqu'un dépassement de temps trop important intervient. Le fonctionnement de l'ensemble de l'atelier est alors perturbé et un réordonnancement devient nécessaire. Le principe de fonctionnement de chacun des modules est relativement simple.

Chacun d'eux est doté de deux fonctions principales :

- **Fonction planification** : Les ordres reçus des niveaux supérieurs sont traités et décomposés en sous-ordres transmis au niveau inférieur.
- **Fonction d'observation** : Chaque module du niveau inférieur envoie un compte-rendu. Ceux-ci sont collectés, traités, et forment un compte-rendu global transmis au niveau supérieur.

Dans les premiers systèmes de pilotage utilisant cette structure, seul le niveau supérieur était doté d'une réelle capacité de décision et les délégations successives n'étaient que des raffinements de ses choix initiaux. Une telle architecture est totalement incompatible avec les besoins de réactivité des ateliers modernes. En effet, le moindre incident apparaissant à

n'importe quel niveau, perturbe le plan de production et remonte jusqu'à la planification.. Ce principe pose alors les mêmes problèmes que l'architecture centralisée.

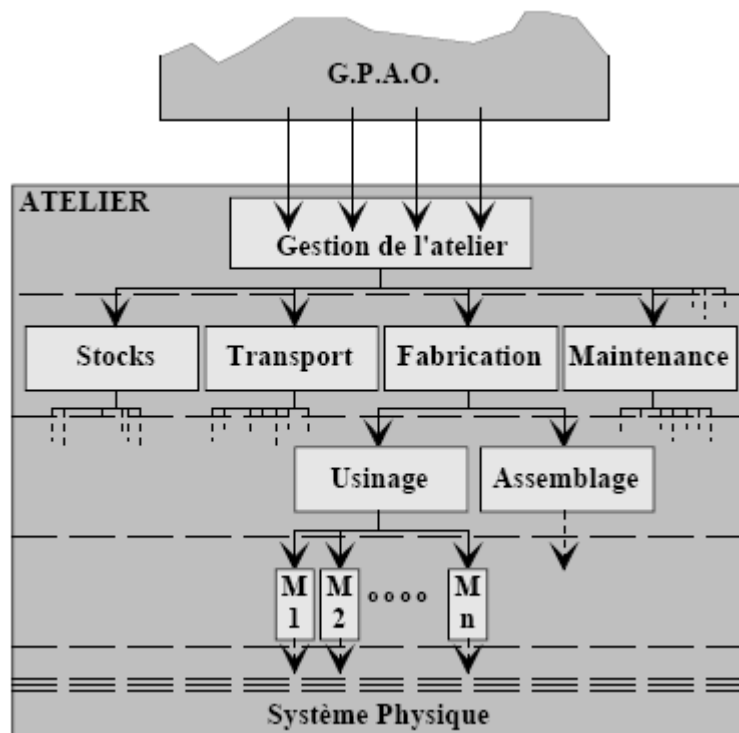


Figure 1.4 : Architecture hiérarchique

Pour éviter de remettre en cause l'ensemble du plan de production dès qu'un événement perturbateur apparaît au cours du cycle de production, les modules successifs peuvent être dotés de capacité décisionnelle. Dès lors, la remontée des informations peut être stoppée dès qu'un module dispose de l'ensemble des « commandes » nécessaires pour absorber la perturbation.

Cependant des liaisons transversales deviennent rapidement nécessaires, en particulier vers le système de transport (souvent concerné par la gestion des perturbations) ou vers la maintenance. Le rôle prépondérant de la planification est alors remis en cause et l'architecture hiérarchisée se mue en une architecture décentralisée coopérative, plus souple mais aussi plus difficile à gérer.

b.3 Les architectures décentralisées :

Le passage d'une architecture de pilotage hiérarchisée à une architecture décentralisée, motivé par la dualité ordonnancement/réactivité, s'est amorcé dès le début des années quatre-vingts pour progressivement prendre corps avec le développement de méthodes de

conception adaptées telles que la méthode CODECO (COnduite DEcentralisée COordonnée).

Déjà, en 1983, le « total FMS » que nous avons cité plus haut utilise une architecture de pilotage dans laquelle les modules ne sont plus résolument organisés hiérarchiquement : chaque tâche est gérée par un module indépendant et l'ensemble est organisé sous la forme d'un graphe de communication sans qu'une quelconque hiérarchie ne soit imposée à priori (figure 1.5).

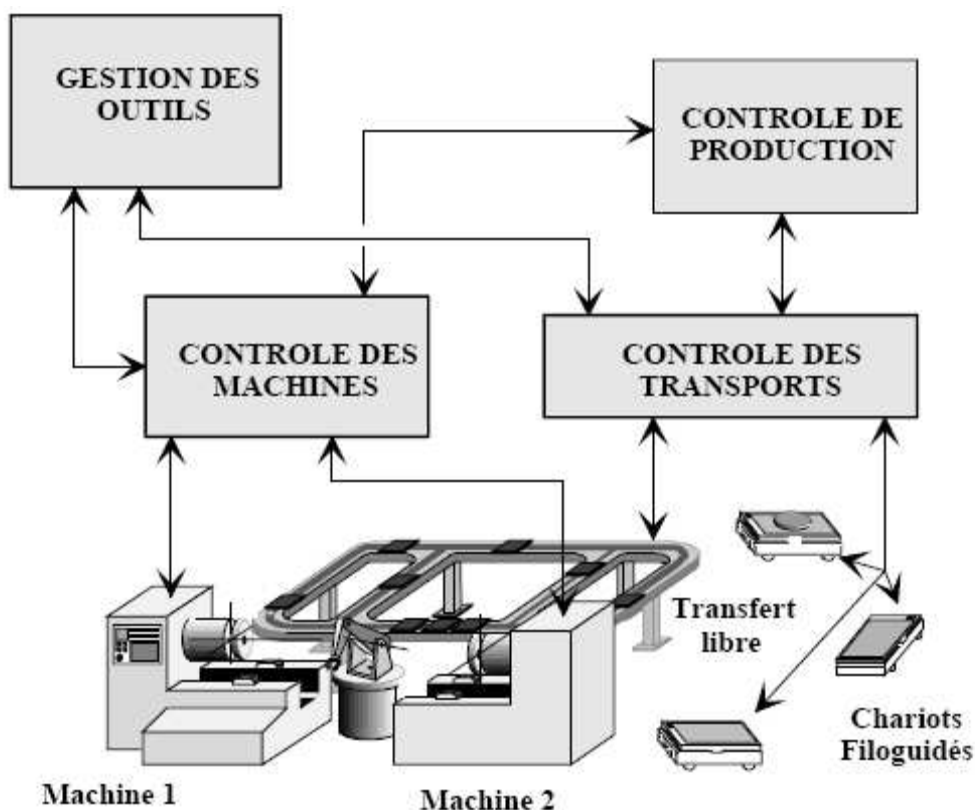


Figure 1.5 : Décentralisation par les tâches

Bien qu'elle ne soit pas imposée, la structure hiérarchique est intrinsèque à ce type d'architecture : les tâches de suivi de la production ou de lancement des opérations apparaissent comme des entités de haut niveau distribuant le travail aux autres modules.

L'existence de voies de communication latérales entre les modules de plus bas niveau offre cependant à chacun d'eux une marge de manoeuvre beaucoup plus importante que dans les modèles strictement hiérarchisés et la « décentralisation par les tâches » constitue déjà une progression importante vers une autonomie des différents modules décisionnels.

Plus récemment plusieurs architectures génériques délibérément orientées vers une décentralisation du processus de décision en atelier ont été proposées. Ainsi, en France, les années quatre-vingts ont vu la naissance de l'architecture CODECO (COnduite DEcentralisée COordonnée d'atelier) développée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble [**Kallel 85**].

Dans ce modèle le processus de décision est réparti sur deux niveaux hiérarchiques : au niveau supérieur un « coordinateur d'atelier » et au niveau inférieur un ensemble de modules de « conduite locale » coopérant directement les uns avec les autres pour absorber les perturbations (figure 1.6).

De plus, cette organisation s'accompagne d'une décomposition verticale de chaque processus de décision intégrant directement les différents modes de communication : hiérarchique (c'est à dire avec les niveaux décisionnels supérieurs ou inférieurs) ou transversal pour la coopération entre modules d'un même niveau (essentiellement entre les conduites locales d'un même atelier mais aussi, éventuellement, entre coordonnateurs d'atelier différents).

Le passage d'une architecture centralisée/hiérarchisée à une architecture décentralisée est en grande partie rendue possible par l'introduction des nouvelles techniques de l'informatique (systèmes d'information, bases de données partagées, intelligence artificielle) dans les ateliers de production.

L'intelligence artificielle autorise en effet chaque centre décisionnel à planifier localement ses actions en fonction des informations locales (l'état de la ressource associée), latérales (états des ressources voisines) et des informations générales (en particulier les gammes de fabrication) stockées dans le système d'information.

Plusieurs architectures décentralisées, similaires au modèle CODECO, ont été proposées dans la littérature, la plupart d'entre elles conservant une organisation hiérarchique en deux niveaux : supervision/coordination et coopération [**Craye 89**]. Les systèmes de pilotage totalement décentralisés sont restés marginaux, principalement en raison des problèmes de synchronisation entre les contrôleurs locaux.

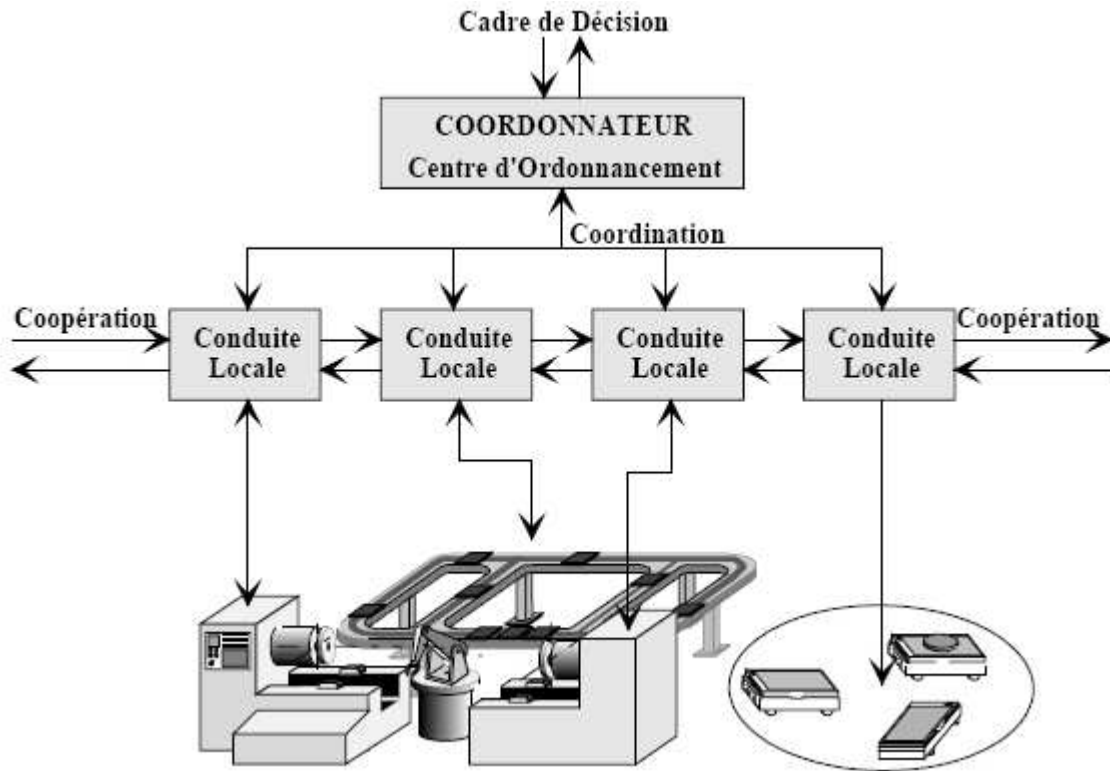


Figure 1.6 : Organisation de l'architecture CODECO.

De ce fait, la gestion décentralisée pose un certain nombre de problèmes : chaque contrôleur doit avoir une vue suffisamment large de l'atelier (pour que la gestion de celui-ci soit au moins sub-optimale) mais la complexité de son processus de décision est directement fonction de la quantité d'information reçue.

1.3 Technologie de Groupe :

1.3.1 Introduction :

La fabrication en lots est une activité dominante dans le monde. Elle compte 60 à 80 pour cent de toutes les activités de fabrication. Les graves difficultés dans la fabrication en lots sont dues au niveau élevé de la variété de produit et des petites tailles des lots de fabrication [Askin 93].

Les variations de produits présentent aux ingénieurs de conception le problème de concevoir beaucoup de pièces différentes.

L'impact de ces variations de produits dans la fabrication est : l'investissement élevé dans les équipements, le coût élevé des outils, la programmation complexe, le temps de chargement et le coûts de contrôle de qualité élevés.

Cependant, pour concurrencer sur un marché, il est essentiel d'améliorer la productivité dans des industries de fabrication en lots.

À cette fin, quelques méthodes innovatrices sont nécessaires pour réduire le coût de produit et le délai d'exécution pour améliorer la qualité du produit afin d'augmenter la part du marché et la rentabiliser.

Parmi ces méthodes on trouve la technologie de groupe qui est une philosophie de gestion qui essaye de grouper les produits et les pièces, car l'idée de la technologie de groupe est de décomposer un système de fabrication en sous-système, ce qui rend son contrôle plus facile.

Selon [Askin 93] l'introduction de la technologie de groupe dans la fabrication a des avantages dans :

- **L'ingénierie de la conception :**

- Réduction de la conception de nouvelles pièces.
- Réduction du nombre de schéma par la standardisation.
- Réduction de l'effort de rédaction dans de nouveaux schémas d'atelier.
- Réduction du nombre et des fonctions de pièces semblables.
- Récupération et identification facile des pièces de rechanges.

- **La planification de disposition :**

- Réduction dans l'espace d'atelier requis à la production.
- Réduction de l'effort du matériel de manutention.

- **Les spécifications d'équipement, d'outils, de gabarits et de montages :**

- Standardisation d'équipements.
- Implantation des systèmes de fabrication cellulaire.
- Réduction du nombre d'outils, de palettes et de montages.
- Réduction significative en coûts payés d'avance encourus dans le dégagement de nouvelles pièces pour la fabrication.

- **La planification de processus de fabrication :**

- Réduction dans le temps de changement et de production.
- Acheminement alternatif des pièces.
- Chargement amélioré de machine et cycles de production raccourcis.
- Réduction en nombre d'opération d'usinage et de temps de programmation numérique de la commande.

- **La gestion de la production :**

- Réduction des en-cours.
- Identification facile du goulet d'étranglement.
- Amélioration d'écoulement de la matière et réduction des coûts d'entrepôt.

- ❑ Réponse plus rapide aux changements de programme.
- **Le contrôle de la qualité de fabrication :**
 - ❑ Réduction des nombres de défauts menant à réduire l'effort d'inspection.
 - ❑ Réduction du rebut (produits dont les spécifications ne sont pas respectées).
 - ❑ Un rendement de qualité meilleure.
- **L'achat :**
 - ❑ Codage des pièces achetées.
 - ❑ Économie possible dans l'achat en raison de la connaissance précise de la matière première.
 - ❑ Réduction du nombre de pièces et de la matière première.
 - ❑ Procédures simplifiées d'évaluation du fournisseur (vendeur) menant à l'achat "juste à temps".
- **Le service de la clientèle :**
 - ❑ Estimations des coûts, précises et plus rapides.
 - ❑ Gestion efficace des pièces de rechange, menant à améliorer le service clientèle.

Depuis 1950 l'année de l'introduction de la technologie de groupe par [Mitrofanov 83], de nombreux chercheurs ont développé des techniques pour résoudre les problèmes de la technologie de groupe.

1.3.2 Classification des techniques de la technologie de groupe :

Ces techniques ont été classées et reclassées plusieurs fois. Dans ce paragraphe on va voir les classifications de ces techniques élaborées par les chercheurs.

a. Classification selon [Burbidge 63] :

Burbidge a classé les techniques comme suit :

➤ Techniques de règle empirique [Black 83]:

Ces techniques utilisent des règles empiriques simples pour identifier les familles de pièces et les cellules de machines. De telles techniques ne sont pas utilisées dans la résolution des problèmes de grandes échelles, elles sont utilisées pour trouver des solutions rapides aux petits problèmes de technologie de groupe.

Aujourd'hui cette technique est rarement utilisée à cause de l'apparition de plusieurs techniques plus sophistiquées et plus efficaces.

➤ Techniques de classification et de codage [Kusiak et Heragu 87]:

Le codage se rapporte au processus d'assigner des symboles aux pièces. Les symboles représentent des attributs de conception de pièces, des dispositifs de fabrication des pièces, les matériaux dont se composent les pièces. Cette classification se rapporte au

processus de la catégorisation d'un ensemble de pièces dans des familles. Plusieurs méthodes de codage sont utilisées pour classifier ces pièces dans des familles.

□ Mono code ou code hiérarchique.

□ Poly-code.

□ Mode de code mixte ou hybride.

➤ **Technique d'Analyse du Flux de Production (Production Flow Analysis) PFA [Burbidge 92] :**

La technique PFA introduit la liste systématique d'information contenue dans les routages et l'identification des familles de pièce et des cellules de machine par inspection soignée.

L'une des dernières méthodes de cette technique utilise une matrice pièce - machine pour définir les conditions d'usinage sur les pièces, puis essayer de réarranger les lignes et les colonnes de cette matrice pour identifier le groupe de pièces et les cellules de machines.

b. Classification selon [King et Nakornchai 82] :

Ils ont utilisé principalement les deux catégories suivantes :

➤ **Algorithmes des coefficients de similitude [Sneath et Sokal 73]:**

Cet algorithme mesure les coefficients de similitudes entre chaque paire de machine ou de pièces pour construire des familles de pièce ou des cellules de machine.

➤ **algorithmes évolutifs :**

Cet algorithme est basé sur la technique PFA cité ci dessus.

c. Classification selon [Han et Ham 86] :

Han et Ham classifient les algorithmes de la technologie de groupe comme suit :

➤ **Techniques péries pathétiques et oculaires :**

Ces techniques sont similaires à la technique de la règle empirique déjà décrite. Les informations concernant les pièces et les systèmes de fabrication sont utilisées dans la détermination des groupes de pièces et de machines. Cette technique n'est plus utilisée aujourd'hui.

➤ **Techniques d'analyse du flux de production [Burbidge 92].**

➤ **Techniques de classification et de codage [Kusiak et Heragu 87].**

➤ **Techniques de programmation mathématique :**

Pour déterminer les cellules de machines et les familles de pièces ces techniques utilisent les mathématiques floues, les modèles de reconnaissance, l'analyse de groupe etc.

d. Classification selon [Vakharia 86] :

Il utilise les classifications suivantes :

- **Techniques descriptives.**
- **Techniques du bloc diagonale.**
- **Techniques des coefficients de similitude.**

e. Classification selon [Wemmerlov et Hyer 86] :

Ils classent les techniques de la technologie de groupe comme suit :

- **Techniques d'identification des familles de pièces sans les machines de routage.**
- **Techniques d'identification des familles de pièces utilisant le routage.**
- **Techniques d'identification des groupes de machines.**
- **Techniques d'identification des familles de pièces et des groupes de machines simultanément.**

1.4 Système de fabrication cellulaire [Kamrani et Logendran 98]:**1.4.1 Introduction :**

Dans les marchés internationaux, le besoin d'améliorer la productivité et la fabrication a obligé les petites et les grandes entreprises à utiliser les technologies de fabrication modernes. La fabrication cellulaire est considérée comme la première technologie de fabrication qui permet de réaliser ce besoin. Cette technologie consiste à diviser ou partager un grand système de fabrication qui contient un ensemble de machines et de pièces, en plusieurs sous-systèmes plus petits appelés *cellules de fabrication*.

La création des cellules de fabrication rapporte à la production des avantages très remarquables :

- Augmentation de la productivité.
- Réduction du temps de cycle.
- Réduction du stock d'en-cours.
- Réduction de l'investissement dans le matériel de manutention.
- Réduction du temps de changement.
- Centralisation des responsabilités.

1.4.2 Contraintes de conception et de planification dans les systèmes de production cellulaire :

Comme on la déjà vu précédemment, de nombreuses techniques ont été développées pour la technologie de groupe et la conception des systèmes de fabrication cellulaire.

La plupart de ces techniques et algorithmes sont concernées par l'identification des familles de pièces et des cellules de machines et ne prennent pas en considération d'autres contraintes.

Parmi ces contraintes on peut citer :

- Capacité des machines.
- Considération de la technologie et de la sûreté.
- Limite maximum sur le nombre de machines dans une cellule et la taille des cellules.
- Minimisation du matériel de manutention.
- Utilisation des machines.
- Ordonnancement des tâches dans les cellules individuelles.
- Maximisation du taux de production.

1.4.3 Méthodes de conception des cellules de production :

La conception des cellules de production utilise les trois formulations suivantes :

- Formulation de matrice.
- Formulation par la programmation mathématique.
- Formulation graphique.

a. Formulation de matrice :

Dans la formulation matricielle, on va construire une matrice d'incidence machine / pièce A_{ij}

$$A_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & 1 & & 1 & 1 \\ 1 & & 1 & & \\ & 1 & & 1 & \\ 1 & & 1 & & \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Nombre de machines. (a)} \\ \\ \\ \text{Nombre de pièces} \end{matrix}$$

Cette matrice d'incidence va être composée de valeurs entières 0 et 1, où :

La valeur 1 implique que la machine i est utilisée pour usiner la pièce j .

La valeur 0 implique que la pièce j n'est pas usinée par la machine i .

Généralement quand une matrice d'incidence est construite on ne peut pas remarquer les groupes de pièces et de machines.

Des algorithmes de groupement sont utilisés pour transformer cette matrice en une matrice mieux structurée en blocs diagonales si c'est possible.

Pour résoudre le problème de formulation de matrice les approches suivantes ont été développées [Kusiak et Chow 88]:

- Analyse de flux de production.

- Méthode de coefficient de similitude.
- Algorithme de groupement par ordre de rang.
- Algorithme lié à l'énergie.
- Méthodes basées sur le coût.

a.1 Analyse de flux de production :

Pour implémenter la technologie de groupe dans les systèmes de fabrication, dans [Burbidge 71] on introduit le concept d'analyse de flux de production (PFA). Ce concept est appliqué dans les trois niveaux suivants :

Dans le niveau 1, la matrice d'incidence machine-pièce est générée après l'analyse des flux de la pièce. En se basant sur les résultats du niveau 1, une tentative pour identifier les cellules de machine est faite dans le niveau 2.

Dans ce niveau, l'identification peut être réalisée par le réarrangement des lignes et des colonnes de la matrice jusqu'à ce que les groupes et les cellules soient visibles.

Les groupes réalisés sont utilisés dans le 3^{ème} niveau pour :

- Analyser le modèle d'écoulement dans l'atelier.
- Déterminer la disposition des machines et les machines à goulet d'étranglement.

Cette méthode présente deux points faibles majeurs :

- La difficulté d'automatisation.
- L'absence d'une technique précise ou systématique.

a.2 Méthode de coefficient de similitude SLCA (Single Linkage Cluster Analysis) :

Cette méthode est basée sur le calcul de coefficient de similitude entre deux machines i et j .

Dans ce paragraphe on présente une méthode qui utilise les coefficients de similitude introduite par [McAuley 72].

Le calcul des coefficients de similitude S_{ij} mesurés entre deux machines i et j est donné comme suit :

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n d^1(a_{ik}, a_{jk})}{\sum_{k=1}^n d^2(a_{ik}, a_{jk})} \quad (1.1)$$

$$d^1(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{si } a_{ik} = a_{jk} = 1 \\ 0, & \text{si non.} \end{cases} \quad (1.1.1)$$

$$d^2(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 0, & \text{si } a_{ik} = a_{jk} = 0 \\ 1, & \text{si non.} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

Pour résoudre les problèmes de la technologie de groupe en utilisant la SLCA, les coefficients de similitude pour toutes les paires de machines sont calculés.

Les cellules de machines sont ensuite générées à partir d'une valeur qui représente un seuil des coefficients de similitude.

a.3 Algorithme de groupement par l'ordre des rangs (Rank Order Clustering)

ROC :

Cet algorithme développé par [King 80] contient les étapes suivantes :

Etape1 : Pour chaque ligne de la matrice d'incidence, attribuer un poids binaire et calculer son équivalent décimal.

Etape2 : Classer les lignes de la matrice binaire dans l'ordre décroissant de leurs poids décimaux correspondants.

Etape3 : Répéter les deux étapes précédentes pour chaque colonne.

Etape4 : Répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la position de chaque élément dans chaque ligne et colonne ne change pas.

Le poids de chaque ligne i et colonne j est calculé comme suit :

$$\text{Ligne } i: \sum_{k=1}^m a_{ik} 2^{n-k} \quad (1.2)$$

$$\text{Colonne } j: \sum_{k=1}^m a_{kj} 2^{n-k} \quad (1.3)$$

a.4 Algorithme d'entrepôt d'énergie [McCormick 72]:

Cet algorithme cherche à former une matrice de bloc diagonale, la maximisation de la mesure de l'efficacité qui est définie par :

$$ME = 1/2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} [a_{i,j-1} + a_{i,j+1} + a_{i-1,j} + a_{i+1,j}] \quad (1.4)$$

Les étapes de cet algorithme sont les suivantes ;

Etape1 : L'ensemble $i=1$.

Sélectionner une colonne aléatoirement.

Etape2 : Placer chacune des $(n-i)$ colonnes restantes, dans chacune des $(i+1)$ positions une par une puis calculer la contribution de chaque colonne ME.

Placer la colonne qui donne la plus grande contribution incrémentale dans le ME au meilleur emplacement.

Etape3 : Quand toutes les colonnes sont placées, répéter la procédure pour les lignes.

a.5 Méthode basée sur le coût [Askin and Subramanian 87]:

Cette méthode prend en considération les coûts de la fabrication dont on peut citer :

- Le coût fixe et variable de l'usinage.
- Le coût de changement.
- Le coût du stock d'en-cours.
- Le coût du matériel de manutention.

L'algorithme de cette méthode comprend trois étapes :

Etape1 : Les pièces sont classées en utilisant un système de codage.

Etape2 : Un groupage entre les pièces, basé sur le coût de fabrication.

Etape3 : L'analyse de la disposition effective d'un groupe de cellule de machine.

b. Formulation par programmation mathématique :

Nous considérons les méthodes de programmation mathématique suivante :

- Le modèle p-médiane.
- Le modèle p-médiane généralisée.
- Le modèle de programmation quadratique.
- Le modèle de programmation fractionnel.

b.1 Modèle p-médiane [Mulvey 79]:

Ce modèle est utilisé pour grouper n pièces dans p familles de pièce.

Les variables suivantes sont définies pour étudier ce modèle :

m : numéro de machine.

n : numéro de pièce.

p : numéro de famille de pièce.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la pièce } i \text{ appartient à la famille de pièce } j. \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

d_{ij} : La distance (la dissimilitude) de Hamming mesurée entre les pièces i et j.

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n z(a_{ik}, a_{jk})$$

où

$$z(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} 1 & \text{si } a_{ik} \neq a_{jk} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

La fonction objectif du modèle p-médiane est de maximiser la somme totale des distances entre deux pièces quelconques i et j .

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1.5)$$

Cette fonction est soumise aux contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ pour tous } i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.5.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p \quad (1.5.2)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \text{ pour tous } j = 1, \dots, n \quad (1.5.3)$$

$$x_{ij} = 0, 1 \text{ pour tous } i = 1, \dots, n \text{ et } j = 1, \dots, n. \quad (1.5.4)$$

La contrainte (1.5.1) assure que chaque pièce appartient à une seule famille de pièce.

La contrainte (1.5.2) spécifie le nombre nécessaire de famille de pièce.

La contrainte (1.5.3) assure que la pièce i appartient à la famille de pièce j seulement si cette famille de pièce est formée.

La contrainte (1.5.4) assure que toutes les valeurs sont entières.

b.2 Méthode p-médiane généralisée :

Cette méthode a été développée pour détourner la contrainte qui garantit l'appartenance d'une pièce à un seul groupe de machine. [Kusiak 87] a modifié le modèle de telle sorte qu'il permet de considérer plus d'un plan d'usinage pour chaque pièce.

Il a ajouté le coût de production pour chaque plan d'usinage.

L'objectif est de minimiser la somme totale des mesures de distance et des coûts de production.

Pour présenter le modèle p-médiane généralisé définissons les notations suivantes :

F_k : Ensemble de plan d'usinage pour les pièces k , $k=1, \dots, l$.

p : Le nombre de familles de pièce nécessaire.

d_{ij} : La distance de Hamming mesurée entre les plans d'usinage i et j .

C_j : Coût de production du plan d'usinage j .

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^n c_j x_{ij} \quad (1.6)$$

Cette fonction est soumise aux contraintes suivantes :

$$\sum_{i \in F_k} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ pour tous } k = 1, \dots, l. \quad (1.6.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq p \quad (1.6.2)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \text{ pour tous } j = 1, \dots, n \quad (1.6.3)$$

$$x_{ij} = 0, 1, \text{ pour tous } i = 1, \dots, n \text{ et } j = 1, \dots, n \quad (1.6.4)$$

La contrainte (1.6.1) assure que chaque pièce sélectionne un seul plan d'usinage.

La contrainte (1.6.2) impose la borne supérieure sur le nombre de familles de pièce.

Les contraintes (1.6.3) et (1.6.4) correspondent aux contraintes (1.5.3) et (1.5.4) du modèle p-médiane.

b.3 Le modèle de programmation quadratique [Kusiak 86]:

C'est une formulation des problèmes de la technologie de groupe qui permet un traitement avec un nombre restreint de groupe et des tailles de groupes.

Le modèle de programmation quadratique est exprimé comme suit :

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{l=1}^p d_{ij} x_{il} x_{jl} \quad (1.7)$$

Cette fonction est soumise aux contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ pour tous } i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.7.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = m_j \quad (1.7.2)$$

$$x_{ij} = 0, 1 \text{ pour tous } i = 1, \dots, n \text{ et } j = 1, \dots, n. \quad (1.7.3)$$

La contrainte (1.7.1) assure que chaque pièce appartient à une seule famille de pièce.

La contrainte (1.7.2) impose que la famille de pièce j contient exactement m_j pièces.

La contrainte (1.7.3) assure que toutes les valeurs sont entières.

b.4 Le modèle de programmation fractionnelle [Lashkari 87]:

C'est une extension du modèle p-médiane.

Les notations suivantes sont utilisées :

n : nombre de pièces.

p : nombre des familles de pièce.

d_{ij} : distance (dissimilitude) de Hamming entre la pièce i et j .

S_{ij} : Similitude entre la pièce i et j .

L : Le nombre minimum de pièces dans chaque famille de pièce.

L'objectif est de minimiser le rapport entre la somme total des distances et des similitudes, des pièces i et j .

$$\min \frac{\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_{ik} x_{jk}}{\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n s_{ij} x_{ik} x_{jk}} \quad (1.8)$$

Ce rapport est soumis aux contraintes suivantes :

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} = 1, \quad \text{pour tout } i = 1, \dots, n. \quad (1.8.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{jk} \geq L, \quad \text{pour tout } k = 1, \dots, p. \quad (1.8.2)$$

$$x_{ik} = 0, 1 \text{ pour tout } i = 1, \dots, n \text{ et } k = 1, \dots, p. \quad (1.8.3)$$

La contrainte (1.8.1) assure que chaque pièce appartient à une seule famille de pièce.

La contrainte (1.8.2) assure que chaque famille de pièce contient au moins L pièces.

La contrainte (1.8.3) assure que toutes les valeurs sont entières.

c. Formulation graphique [Kusiak 88]:

Dans la formulation graphique, la matrice d'incidence A_{ij} est représentée par un graphe.

On peut utiliser les trois types de graphes suivants :

- Graphe Bipartite.
- Graphe de transition.
- Graphe de limite (Frontière).

c.1 Graphe Bipartite :

Dans ce type de graphe un ensemble de nœuds représente les pièces et l'autre représente les machines.

Afin de discuter l'application du graphe Bipartite à la technologie de groupe on considère le graphe de la figure 1.7, qui représente la matrice d'incidence (a).

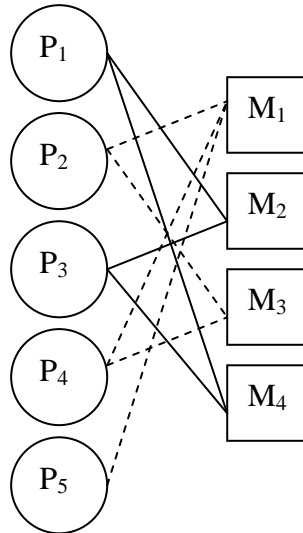


Figure 1.7 : Représentation de la matrice (a) par le Graphe Bipartite.

On peut voir dans la figure 1.8 que le premier graphe est décomposé en deux graphes disjoints.

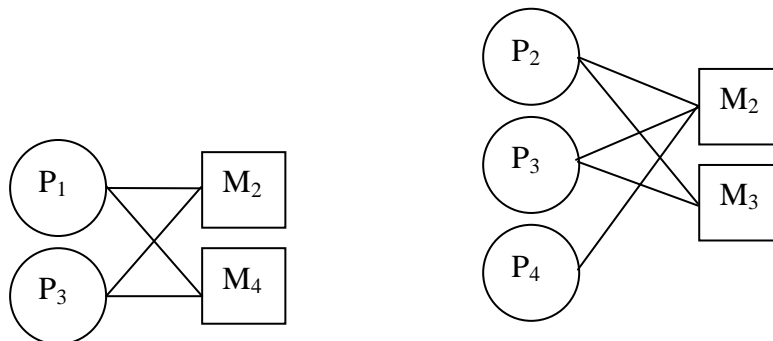


Figure 1.8 : Représentation de la matrice (a) par le Graphe Bipartite avec deux parties disjointes.

c.2 Graphe de transition :

Dans le graphe de transition une pièce est représentée par un nœud quand une machine est représentée par une ligne.

Le graphe de transition qui représente la matrice (a) est montré dans la figure 1.9.

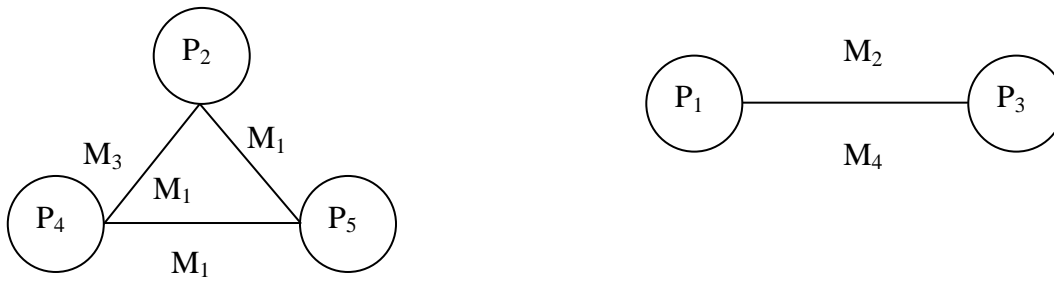


Figure 1.9 : Le graphe de transition représentant la matrice d'incidence (a).

c.3 Graphe de limite :

Un graphe de limite est une hiérarchie de graphes bipartites.

A chaque niveau du graphe de limite, les nœuds du graphe bipartite représentent les machines ou les pièces.

Le graphe de limite correspondant à la matrice (a) est représenté sur la figure 1.10, sous la forme de deux graphes de limites disjoints. Chaque graphe dans cette figure représente une famille de pièce.

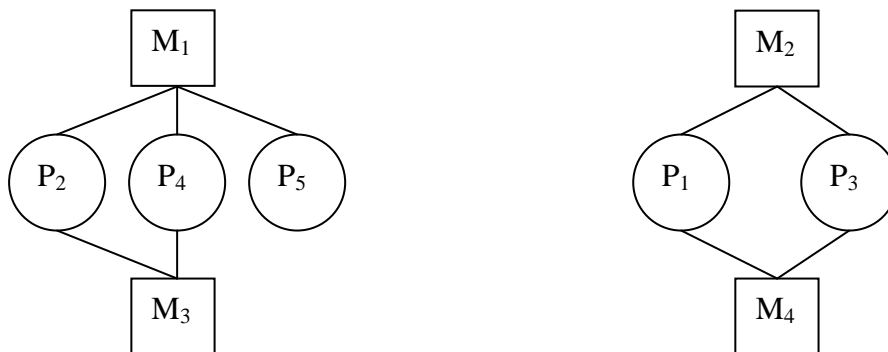


Figure 1.10 : Graphe de limite correspondant à la matrice (a).

1.4.4. Conception des cellules de production :

Dans ce paragraphe, on aborderait la hiérarchie des décisions de planification des cellules de production.

a. Hiérarchie des décisions de planification dans la fabrication cellulaire [Kamrani et Logendran 98]:

Les décisions de la planification dans la fabrication cellulaire peuvent être groupé dans les trois niveaux qui suivent :

a.1 Le niveau stratégique :

Dans ce niveau toutes les décisions liées à la conception des cellules sont prises.

Parmi ces décisions on peut citer :

- Formation des familles de produit.
- Détermination des conditions des machines.
- Formation des cellules.
- Détermination du nombre de cellule.
- Préparation des dispositions de cellule.
- Formation de produit correspondant à la matrice de cellule.

a.2 Le niveau tactique :

Dans ce niveau le chargement de cellules est la principale activité.

Les tâches incluses dans ce niveau sont :

- Affectation des familles et/ou des produits aux cellules.
- Ordonnancement des familles et des produits dans chaque cellule.

Dans ce niveau les rapports de production sont utilisés pour affecter les produits aux cellules.

a.3 Le niveau des opérations :

Dans le dernier niveau on trouve :

- L'ordonnancement de cellule après la détermination des temps de début et d'exécution de chaque opération.
- La détermination du temps de cycle.
- La détermination du nombre de station.
- La prise en considération de la main d'œuvre.

Dans la figure suivante on peut illustrer la hiérarchie de planification des cellules de fabrication.

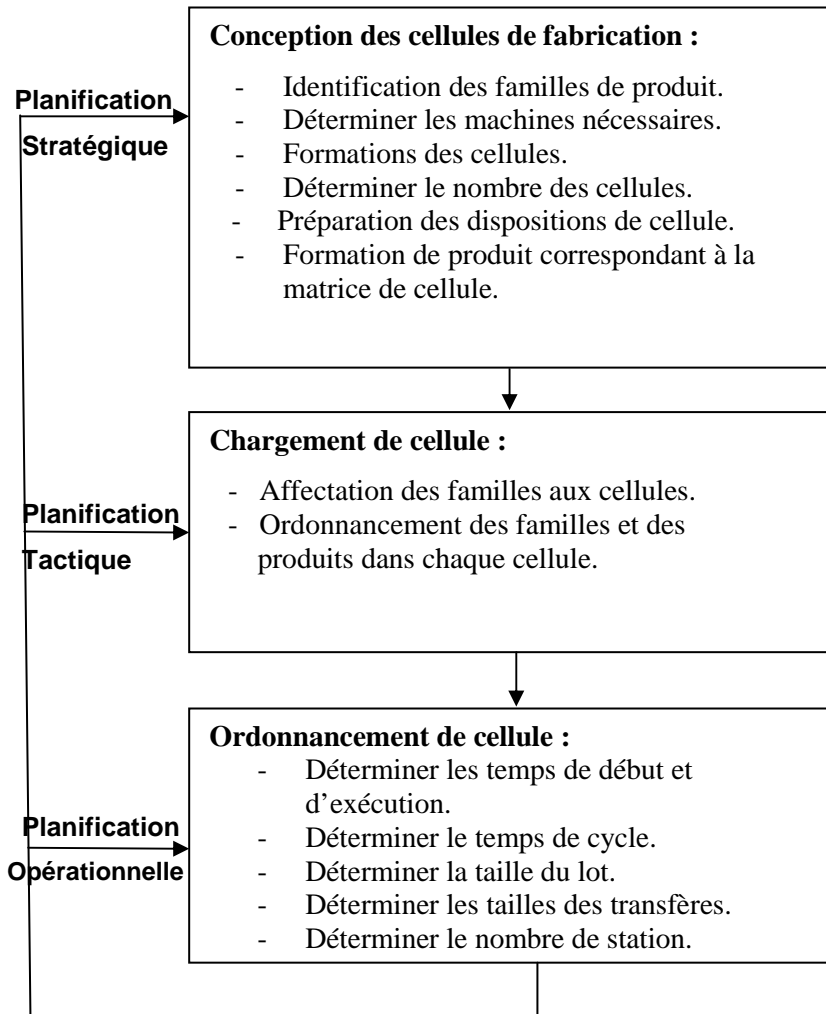


Figure 1.11 : Hiérarchie de planification des cellules de fabrication.

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entamé des généralités sur les systèmes flexibles de production.

La première partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation de notions essentielles aux systèmes flexibles de production tel que la flexibilité, la réactivité, la robustesse, l'atelier flexible et les architectures de pilotage.

Dans la seconde partie, nous avons parlé de la notion de technologie de groupe, en donnant les avantages de l'introduction de cette technique dans les systèmes flexibles de production et en citant quelques techniques de classification de la technologie de groupe.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée aux systèmes de production cellulaire où nous avons discuté de quelques méthodes de conception et de formulation des cellules flexibles de production.

Chapitre 2

Ordonnancement et règles de priorité dans les Systèmes Flexibles de Production

2.1 Ordonnancement des Systèmes Flexibles de Production :

Dans un système flexible de production, 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 ou de capacité (heures ou équipes supplémentaires) peuvent être faits. Les données sont transmises à la fonction d'ordonnancement que nous détaillons dans la première partie de ce chapitre.

2.1.1 Définition :

L'ordonnancement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (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 [Gotha 93] [Esquirol et Lopez 99].

Les Ordres de Fabrication (OF), évoqués par le calcul des besoins, représentent chacun une demande 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 d'ordonnancement doit planifier.

Une tâche est localisée dans le temps par une date de début avec une durée ou une date de fin.

Elle utilise une ou plusieurs ressources. Elle est dite préemptive si elle peut être interrompue, ou non préemptive si elle ne peut pas être interrompue.

En sortie de la fonction d'ordonnancement, on obtient un planning, ou ordonnancement, qui restitue l'affectation des tâches fournies en entrée à des dates précises pour des durées déterminées sur les différentes ressources. Ce planning cherche à satisfaire des objectifs, en respectant le plus possible des contraintes que nous allons préciser.

La fonction d'ordonnancement est une fonction à court terme, même si elle est parfois utilisée à moyen terme [Esquirol et Lopez 99]. Son horizon et sa période sont donc relativement courts.

L'horizon d'un ordonnancement est en général d'une à trois semaines et la période varie de deux ou trois jours à une semaine.

2.1.2 Contraintes sur l'ordonnancement :

On peut distinguer trois grandes catégories de contraintes : temporelles, technologiques et de ressources.

Le premier type concerne les délais de fabrication imposés. Le deuxième type correspond aux contraintes technologiques, en général décrites dans les gammes de fabrication des produits. On y trouve des contraintes d'enchaînement temporel, mais aussi l'obligation d'utilisation de certaines ressources. Le dernier type de contraintes concerne la limitation de la quantité de ressources de chaque type.

Ces contraintes distinguent les différents types de ressources, qui peuvent être disjonctives (exécuter une seule tâche à la fois), ou cumulatives (exécuter plusieurs tâches en parallèle).

Les ressources n'ont pas la même disponibilité et la même capacité, celle-ci pouvant être modulée par la modification des calendriers d'utilisation ou l'emploi de ressources externes.

Une ressource peut aussi être consommable, lorsqu'après sa libération, elle n'est pas disponible en même quantité. Dans le cas contraire, elle est dite renouvelable.

On peut aussi distinguer les contraintes suivant qu'elles soient strictes ou pas. Les contraintes strictes sont des exigences à respecter alors que les contraintes dites « relâchables » (contraintes de préférences) peuvent éventuellement n'être pas satisfaites.

2.1.3 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 [Esquirol et Lopez 99].

- **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 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 [Farhoodi 90] [Grabot 98]. Un exemple de structure d'objectifs est présenté dans la figure 2.1.

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 d'ordonnancement (grisés sur la Figure 2.1).

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.

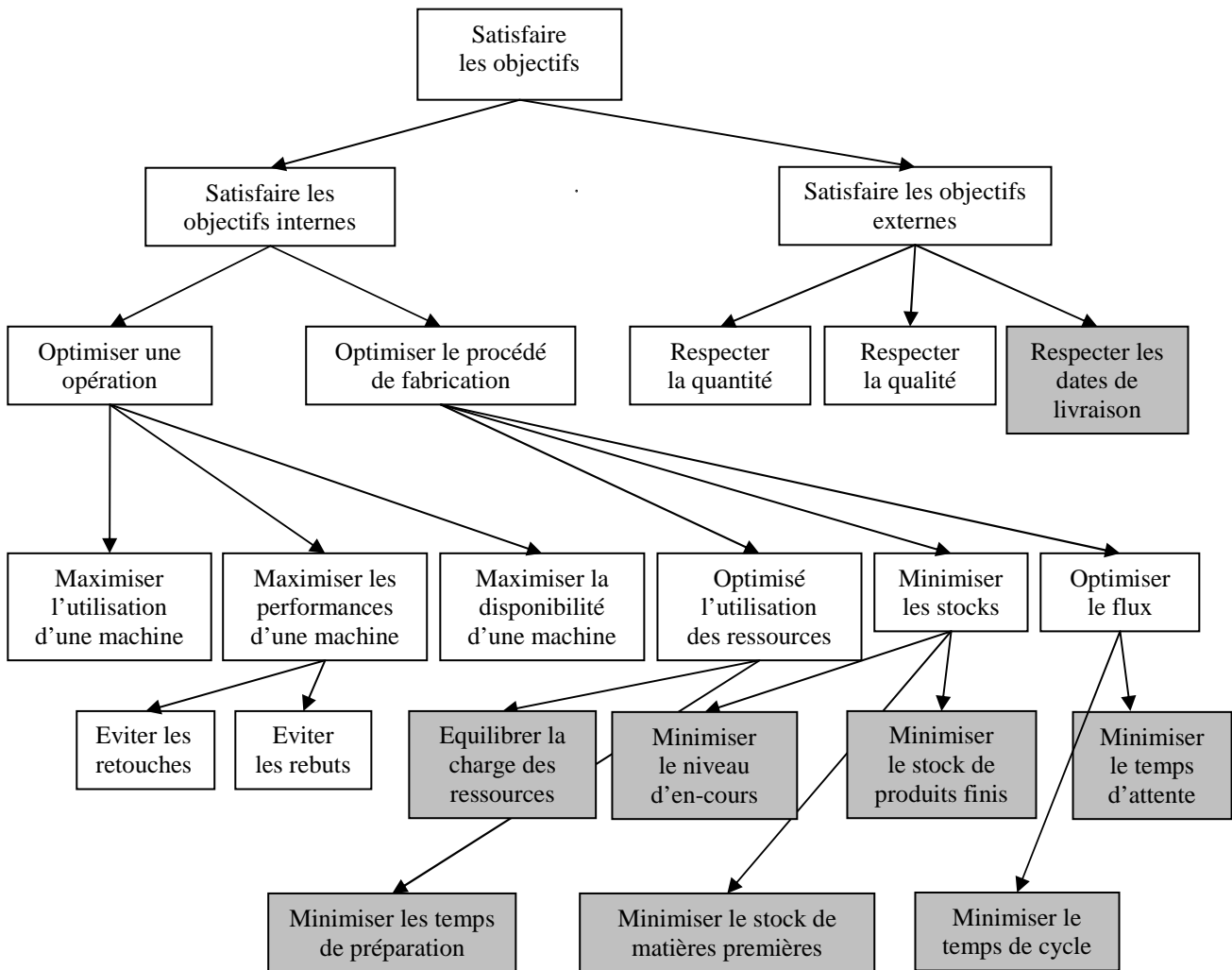


Figure 2.1 : Structure d'objectifs [Grabot 98].

2.1.4 Le problème d'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 des différents paramètres décrits aux paragraphes précédents (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 [Gotha 93] [Esquirol et Lopez 99].

- L'ordre des opérations est fixe et commun à tous les travaux : on est dans le cas d'un «flow shop», dans lequel la séquence des opérations est toujours la même pour tous les produits de l'atelier, l'ordonnancement concerne essentiellement l'ordre de lancement des différents OF.
- L'ordre des opérations est fixe mais propre à chaque travail : on est dans le cas d'un « job shop », dans lequel la séquence des opérations peut varier d'un produit à l'autre, les séquences (ou gammes) étant définies en avance pour chaque produit.
- L'ordre des opérations est indéterminé : on est dans le cas d'un « open shop », dans lequel chaque produit doit effectuer un nombre fixé d'opérations dans n'importe quel ordre.

2.1.5 Les différentes approches de résolution :

On peut distinguer deux grandes familles parmi les approches de résolution d'ordonnancement :

- Les approches résolvant le problème en une seule passe que l'on qualifiera d'approches « directes ».
- Les approches, qualifiées « d'itératives », permettant de produire une solution puis de l'améliorer par itérations successives.

a. Approches directes :

Ce paragraphe présente quelques méthodes de résolution d'ordonnancement parmi les plus courantes et les plus connues. Comme pour toute activité de décision, on distingue en ordonnancement deux approches fondamentales pour la résolution du problème :

- Une approche dite « optimale » consistant à rechercher une décision optimale par rapport à un critère donné, à partir d'hypothèses fortement réductrices qui seules permettent d'établir et de prouver cette optimalité.
- Une approche orientée « rationalité limitée » ne cherchant pas à atteindre l'optimalité de la solution et préconise de poser un ensemble d'hypothèses moins réductrices qui vont favoriser la recherche d'une décision satisfaisante [Simon 77].

a.1 Méthodes de résolution optimales :

Ces méthodes considèrent le problème d'ordonnancement comme un problème d'optimisation où l'on cherche à satisfaire une fonction objective généralement unique. Elles sont décrites dans de nombreux ouvrages traitant des problèmes d'ordonnancement, comme par exemple [Gotha 93] ou [Esquirol et Lopez 99]. Les méthodes optimales permettent d'avoir des solutions optimisant un seul et unique critère, sous des conditions bien particulières. Ces conditions sont rarement satisfaites dans les problèmes industriels. Les problèmes d'ordonnancement les plus courants sont en général des problèmes NP complets [Maccarthy et Liu 93] et le temps de résolution par des méthodes optimales augmente de façon exponentielle avec la taille du problème.

a.2 Méthodes de résolution non optimales :

a.2.1 Placement des ordres de fabrication :

Dans un premier temps, les OF sont classés suivant un critère quelconque (priorité, date de livraison, date de commande...). Une fois cette liste établie, toutes les opérations du premier OF de la liste sont planifiées sur les ressources quand celles-ci sont libres, puis toutes les opérations du deuxième OF... Une fois planifiées, ces tâches ne sont plus remises en cause.

Les opérations d'un OF peuvent être placées sur les ressources de deux manières : au plus tôt (les tâches sont planifiées de la première à la dernière dès que possible) ou au plus tard (les tâches sont planifiées en partant de la dernière date de livraison et remontant jusqu'à la première).

Des techniques « mixtes » sont aussi possibles. C'est une méthode simple, rapide et facile à comprendre. Peu consommatrice en temps de calcul, elle a été utilisée par les premiers logiciels d'ordonnancement. Néanmoins, ne permettant aucune optimisation, même partielle ou locale, elle n'est quasiment plus utilisée dans les logiciels d'ordonnancement.

a.2.2 Files d'attente :

Le principe est de simuler le fonctionnement de l'atelier. Les opérations sont placées sur les ressources par ordre chronologique. Lorsqu'une opération arrive sur une machine, celle-ci n'est pas disponible, la tâche est placée dans une file d'attente. Lorsque la ressource se libère, si la file d'attente comprend plusieurs opérations, on utilise une règle de priorité pour résoudre le conflit. Une règle de priorité est une formule qui associe une valeur à chaque opération d'une file d'attente, calculée en général sur les paramètres de l'opération [Boucon 91].

L'opération de la file qui sera placée sur la machine est celle dont la valeur est la plus faible ou la plus forte. De très nombreuses règles de priorité existent, utilisant des critères variés.

Un grand nombre d'études ont été faites pour essayer de déterminer les effets de ces règles sur l'ordonnancement et leurs performances globales par rapport à quelques critères. Il ressort essentiellement de toutes ces analyses qu'aucune règle ne surpasse les autres sur tous les objets et dans toutes les configurations d'ateliers [Montazeri et Van Wassenhove 90] [Pierreval et Mebarki 97] [Ferrell et al. 00].

Les effets d'une règle de priorité sur l'ordonnancement sont difficiles à prévoir car fortement dépendants de l'atelier.

L'approche par files d'attente est très répandue dans les logiciels d'ordonnancement.

Cela est principalement dû au fait que c'est la méthode la plus proche du raisonnement humain face à la résolution d'un problème d'ordonnancement. Elle est très attractive pour les utilisateurs de logiciels d'ordonnancement car ils en comprennent bien le fonctionnement.

a.2.3 Théorie des graphes :

Le principe de cette technique d'ordonnancement repose sur l'utilisation d'un graphe dont les sommets représentent les tâches et dont les arcs modélisent les contraintes entre opérations.

Au départ, seules les contraintes liées aux gammes sont représentées. A chaque étape, l'ensemble des opérations est séparé entre les tâches déjà ordonnancées, celles qui peuvent l'être et celles ni ordonnancées ni ordonnancables.

On choisit une opération parmi celles ordonnancables ainsi que la ressource sur laquelle elle est affectée. A chaque conflit rencontré, on utilise une règle de résolution prédéfinie.

Chaque résolution de conflit entraîne l'apparition de nouvelles contraintes sur le graphe.

a.2.4 Approches par satisfaction de contraintes :

Le principe général de ces approches consiste à réduire l'espace dans lequel on recherche la solution en exploitant les contraintes que doit satisfaire cette solution, et à rechercher cette solution dans l'ensemble restreint des solutions admissibles obtenues.

Parmi les travaux sur l'utilisation de la satisfaction de contraintes en ordonnancement, on trouve par exemple ceux présentés dans [Erschler 76], ou plus récemment ceux relatés dans [Schwalb et Dechter 97], sur la propagation de contraintes temporelles. [Lopez et al. 92] proposent des méthodes d'ordonnancement qui combinent les contraintes d'utilisation des ressources et les contraintes temporelles. Des systèmes

d'ordonnancement tels que ISIS [Fox 83], l'un des premiers ordonnancements dits « intelligents », combinent l'utilisation de propagation de contraintes à celle de systèmes experts afin de minimiser le retard des OF.

L'optimisation de l'utilisation des ressources a été ajoutée dans le système suivant OPIS [Ow et Smith 88]. On peut aussi trouver des systèmes faisant intervenir la logique floue afin de relâcher progressivement certaines contraintes [Dubois et Prade 89] [Fargier 94].

a.2.5 Méthodes issues de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle a fourni de nouvelles approches et tendances en ordonnancement depuis deux décennies, notamment par l'utilisation de réseaux de neurones [Sabuncuoglu 98] ou de systèmes experts [Smith 92].

L'utilisation de la logique floue dans l'ordonnancement n'a pas pour but de proposer une nouvelle méthode, mais d'apporter ponctuellement des techniques qui vont permettre d'être plus proche de la réalité. L'incertitude et l'imprécision caractérisant les données d'une entreprise, bien que fréquemment constatées [Gousty et Kieffer 88] [Smith 92], sont rarement prises en compte à court terme. La gestion de cette incertitude et de cette imprécision est plus souvent faite par le biais de méthodes statistiques, mais l'utilisation de la logique floue [Zadeh 65] et de la théorie de possibilités [Zadeh 78] [Dubois et Prade 87] a connu un succès certain.

Elle concerne généralement les aspects suivants :

- La modélisation de critères de performance imprécis [Berrah 97] [Türksen 97].
- La modélisation de l'imprécision des connaissances sur les flux de produits [Grabot et al. 97] [Türksen 97].
- La modélisation de l'imprécision des connaissances sur les méthodes d'amélioration de l'ordonnancement [Bensana et al. 88].
- La modélisation de l'imprécision temporelle (durées des tâches, dates de livraison, ...) [Fargier 97] [Fortemps 97].

L'intelligence artificielle est susceptible d'être d'un grand intérêt pour l'ordonnancement, lui permettant notamment d'être plus proche de la réalité.

Les méthodes d'ordonnancement issues de l'intelligence artificielle sont toutefois peu implantées dans l'industrie car elles ne sont pas encore suffisamment matures ni suffisamment transparentes pour l'utilisateur.

b. Approches itératives :

Il a été fréquemment constaté dans la littérature ([Farhoodi 90], [Bérard et al.98], [Grabot et al. 99] ou [Van Bael 99]) qu'un ordonnancement est rarement idéal « du premier coup » et qu'il est généralement nécessaire de procéder à des améliorations successives. On distingue deux approches d'amélioration d'un ordonnancement :

- Réparation de la solution par un processus automatique.
- Intervention de l'opérateur dans l'amélioration de la solution.

b.1 Réparation automatique :

La « réparation automatique » d'un ordonnancement consiste, à partir d'un ordonnancement déjà existant, à obtenir une solution plus ou moins optimale, cette amélioration étant entièrement faite par l'ordinateur. On considère trois approches dans cette automatisation de l'amélioration de l'ordonnancement : l'utilisation de l'intelligence artificielle, les méta heuristiques et les techniques de choix de la meilleure méthode de résolution.

b.1.1 Intelligence artificielle :

L'intelligence artificielle est fréquemment utilisée pour améliorer des ordonnancements déjà existants. Dans [Bel et al. 88] et [Bensana et al. 88], les auteurs proposent de faire un ordonnancement par satisfaction de contraintes (voir § 2.1.5.1.2.4), puis d'améliorer le résultat grâce à un système expert. On peut aussi citer le système OPIS [Ow et Smith 88], qui détermine grâce à un système expert basé sur l'utilisation de tableaux noirs, les ressources goulots et relance un ordonnancement par satisfaction de contraintes en planifiant ces ressources en premier. On trouve dans [Artiba et Aghezzaf 97] la présentation d'un système d'ordonnancement de systèmes complexes comportant un module « base de connaissances » qui en fonction des problèmes et des performances de l'ordonnancement en cours, re-modélise le problème et choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la mieux adaptée au modèle.

Partant d'un ordonnancement fait par gestion des files d'attente, il est proposé dans [Lereno et al. 01] de capitaliser les résultats successifs de l'ordonnancement pour constituer une base de connaissances qui pourra choisir le réglage des meilleurs paramètres.

b.1.2 Méta heuristiques :

Les méthodes dites « méta heuristiques » consistent à explorer « intelligemment » l'espace des solutions possibles pour trouver l'optimum ou une solution proche. Parmi les métras heuristiques les plus connus on trouve :

- Les méthodes de recherche avec tabous [Glover 89] [Glover 90], appliquées au problèmes d'ordonnancement dans, entre autres, [Hertz et Widmer 94], [Dell'Amico et Trubian 93] ou [Taillard 94]. La recherche avec tabous est alliée à un algorithme génétique dans [Chang et Lo 01] pour améliorer une solution d'ordonnancement par rapport à des objectifs quantitatifs et qualitatifs.
- Les algorithmes génétiques ([Holland 75], [Goldberg 89] ou [Davis 91]). Dans [Bérard et al. 97], un ordonnancement obtenu par une simulation à événements discrets est amélioré au moyen d'un algorithme génétique. Dans [Li et al. 00], une approche par algorithmes génétiques est aussi utilisée pour améliorer un ordonnancement multi objectif. Dans [Ponnambalam et al. 01], un nouvel algorithme génétique est proposé pour améliorer des solutions d'ordonnancement.
- La méthode du recuit simulé [Metropolis et al. 53], qui permet par exemple d'améliorer un ordonnancement obtenu par satisfaction de contraintes [Van Bael 99] ou par la gestion des files d'attente [Ponnambalam et al. 99].

b.1.3 Choix de la meilleure méthode :

On peut aussi classer dans cette catégorie les différentes approches qui proposent de sélectionner automatiquement la meilleure méthode de résolution en fonction des paramètres de l'atelier considéré. On trouve différentes approches de sélection comme les réseaux de neurones [Boukachour et al. 97] ou les systèmes experts [Romanowicz et al. 97]. Dans [Riane et al. 99] est proposée une plate-forme qui évalue et compare les différentes heuristiques de résolution. On peut aussi rappeler [Artiba et Aghezzaf 97] dans lequel le système présenté comporte un module « base de connaissances » qui choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la plus adaptée au modèle. Des tentatives de sélection des meilleures règles de priorité en fonction des paramètres de l'atelier ont été faites dans l'ordonnancement de job shop [Boucon 91].

b.1.4 Remarques

En général, ces méthodes d'amélioration automatique de l'ordonnancement, bien que tentant de répondre à un réel besoin, sont peu mises en oeuvre dans l'industrie. Leur complexité et leur temps d'exécution les rendent pour l'instant peu attractives pour des logiciels d'ordonnancement commerciaux.

De plus, si les industriels veulent un ordonnancement qui s'adapte à leur spécificité, ils veulent aussi en rester maîtres. Les « automatisations » proposées du processus d'amélioration isolent le gestionnaire d'atelier de son ordonnancement et peuvent ainsi le conduire à le rejeter [Myers 00] [Aldanondo et Cavallé 01].

b.2 Intervention humaine :

Il est fréquemment reconnu que la résolution d'un problème d'ordonnancement est fortement dépendante de l'atelier auquel l'ordonnancement s'applique. Cet aspect explique l'échec relatif de toutes les solutions d'amélioration automatique qui ne permet pas de s'adapter aux spécificités de chaque entreprise. [Baek et al. 99] ont notamment constaté que globalement, les choix de l'opérateur humain donnent de meilleurs résultats que les choix de l'ordinateur. La recherche s'est donc tournée vers des solutions permettant d'intégrer la participation de l'utilisateur du logiciel d'ordonnancement, afin que celui-ci puisse guider la résolution en fonction de ses besoins particuliers [Farhoodi 90] [Bérard et al. 98] [Grabot et al. 99]. On distingue en général deux approches de l'intervention humaine dans l'ordonnancement : la coopération et l'interaction.

b.2.1 Ordonnancement coopératif :

L'ordonnancement coopératif est défini dans [Bérard et al. 98], [Lopez et al. 98] ou [Grabot et al. 99] comme la mise au point conjointe de l'ordonnancement par le logiciel et par le gestionnaire d'atelier (Figure 2.2).

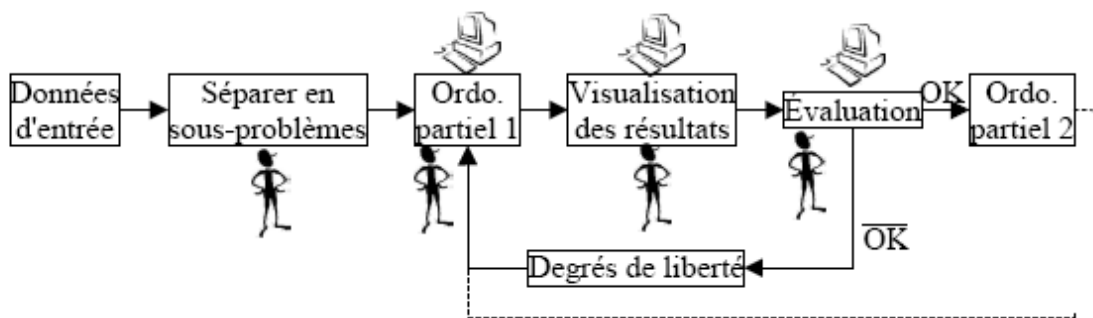


Figure 2.2 : Une approche coopérative de l'ordonnancement [Grabot et al. 99].

La coopération présentée Figure 2.2 présente plusieurs conditions :

- Une interface « homme machine » très développée et très interactive pour que l'opérateur puisse pleinement participer à l'élaboration de l'ordonnancement,
- Une évaluation des résultats qui permet à l'utilisateur du logiciel d'avoir un ordonnancement correspondant réellement à ses besoins,
- Une forte implication de l'opérateur dans l'obtention de l'ordonnancement, ce qui permet à l'utilisateur de pouvoir s'approprier les résultats.

Néanmoins, la forte participation de l'utilisateur dans le processus d'obtention d'un ordonnancement nécessite aussi que celui-ci connaisse parfaitement le processus de résolution du logiciel afin de pouvoir participer activement. L'opérateur humain doit

aussi être capable de séparer le problème d'ordonnancement en sous problèmes pour réaliser des ordonnancements partiels.

b.2.2 Ordonnancement interactif :

L'ordonnancement interactif se définit comme une alternance de décisions de l'opérateur et du logiciel. [Farhoodi 90] propose les étapes présentées Figure 2.3.

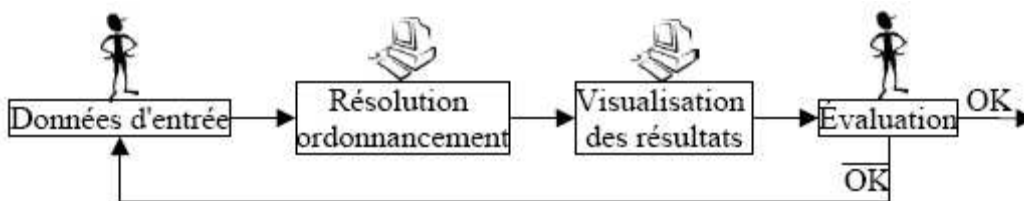


Figure 2.3 : Une approche interactive de l'ordonnancement.

L'approche de l'ordonnancement interactif présentée Figure 2.3 fait ressortir l'alternance des décisions humaines (au niveau des données d'entrée de l'ordonnancement et de l'évaluation des résultats) et des décisions du logiciel (au niveau de la résolution du problème d'ordonnancement et de l'affichage des résultats). De plus, une telle approche met en avant l'aspect « évaluation des résultats » de l'ordonnancement qui nous semble être une étape indispensable à une utilisation pertinente des résultats de l'ordonnancement.

On peut néanmoins lui reprocher l'absence de l'aide logicielle au niveau de la boucle de retour. En effet, si l'ordonnancement produit par le logiciel ne convient pas à l'utilisateur, celui-ci va chercher à modifier divers paramètres, règles, données ou degrés de liberté pour obtenir un ordonnancement « meilleur ». Ces modifications, indispensables à l'amélioration de l'ordonnancement, sont difficiles à déterminer sans guide ou informations.

2.1 Les règles de priorité :

La gestion des files d'attente par des règles de priorité est l'une des méthodes les plus utilisées pour ordonnancer en temps réel les ateliers. En effet, dans bon nombre d'ateliers, les responsables desancements ne raisonnent qu'en terme de capacité, et non de priorité, de ce fait de nombreux ordres prennent du retard et finissent par devenir urgents.

Dans ces conditions, seuls les ordres urgents pilotent l'atelier et provoquent une surcharge à très court terme que la capacité de l'atelier ne peut résorber. Pour éviter une telle situation on ne doit donc pas se limiter à accélérer les ordres urgents, mais on doit simultanément retarder les ordres devenus entre-temps moins urgents. Dans ce cas, il peut apparaître nécessaire de définir l'ordre de priorité des travaux pour suivre l'évolution de ces priorités. Pour cela, il existe des règles appelées règles de priorité des files d'attente [Mebarki 95].

2.2.1 Définition :

Les règles de priorité permettent de sélectionner parmi une liste de lots en attente le prochain lot à traiter sur la machine en fonction de critères purement locaux (données dépendant uniquement du lot) ou plus globaux (prenant en compte tout ou une partie de l'état du système).

Il existe un grand nombre de règles de priorité utilisées dans la recherche et dans l'industrie. Ainsi [Panwalker et Iskander 77] ont compté 113 règles et de nouvelles règles continuent d'être publiées.

Parmi ces règles de priorité nous pouvons citer : First In First Out (FIFO), Shortest Processing Time (SPT), Earliest Due Date (EDD). Le choix d'une règle de priorité peut se faire en fonction de ses performances par rapport à un critère d'évaluation, éventuellement de son coût de mise en oeuvre, ou des deux.

2.2.2 Les principaux critères d'évaluation :

L'objectif d'un ordonnancement, qu'il soit statique ou dynamique, prévisionnel ou temps réel, est d'optimiser un certain nombre de critères de performances (basés sur le temps de cycle, les en-cours, le retard...). Pour juger de l'efficacité d'une stratégie à atteindre les objectifs fixés, on prend en compte un certain nombre de mesures de performance issues des critères d'évaluation (temps de cycle moyen, retard maximum...). La littérature spécialisée propose un grand nombre de critères d'évaluation et de mesures de performance associées.

a. Critères d'évaluation et mesures de performance :

[Kiran et Smith 84], [Ramasesh 90], [Boucon 91] ont classé les critères d'évaluation en trois groupes basés sur :

1. Les temps de cycle, les en-cours, la charge.
2. Les dates au plus tard (ou dates échéances).
3. Les coûts.

Nous présentons une liste des mesures de performance les plus utilisées. Les notations suivantes sont utilisées :

- C_i : Date de fin effective du job i .
- r_i : Date d'arrivée du job i .
- d_i : Date échéance du job i .
- N_i : Nombre d'opérations initiales du job i .
- ϕ : Ensemble des jobs terminés.
- $n = \text{Card}(\phi)$.

Critères relatifs aux temps :

1. Temps de cycle (Flow time)

Temps de cycle du job i : $F_i = C_i - r_i$ correspond au temps passé par le job i dans le système.

- Moyenne du temps de cycle : $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i \in \phi} F_i$
- Variance du temps de cycle : $\text{Var}(F)$
- Temps de cycle maximum

2. Temps de cycle par opération

Temps de cycle par opération du job i : $\frac{F_i}{N_i}$

- Moyenne du temps de cycle par opération : $\frac{1}{n} \sum_{i \in \phi} \frac{F_i}{N_i}$
- Variance du temps de cycle par opération

3. Temps d'attente : Correspond au temps passé dans les files d'attente.

- Moyenne du temps d'attente
- Variance du temps d'attente

4. Temps total d'exécution des tâches (Makespan) : c'est la date d'achèvement de la dernière opération dans l'atelier.

Critères relatifs aux en-cours :

1. Nombre de pièces en attente
 - Moyenne.
 - Variance.
2. Nombre de pièces dans l'atelier
 - Moyenne.
 - Variance.

Critères relatifs aux dates échues :

1. Retard algébrique (Lateness)

Retard algébrique du job i : $L_i = C_i - d_i$, si L_i est négative sa valeur indique l'avance du job i par rapport à sa date de fin au plus tard, sinon, L_i indique le retard du job i .

- Moyenne : $\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i \in \phi} L_i$
- Variance : $\text{Var}(L)$
- Maximum : correspond au retard maximum

2. Retard ou Retard global (Tardiness)

Retard du job i : $T_i = \text{Max}(0, C_i - d_i)$

- Moyenne : $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i \in \phi} T_i$, dans ce cas la moyenne est calculée sur tous les jobs terminés, qu'il soit en retard ou non.
- Variance : $\text{Var}(T)$
- Moyenne quadratique du retard (Root Mean Square of Tardiness) :

$$RMST = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^2 \right]^{1/2}$$

- Retard Maximum : $\text{Max}(T)$
4. Nombre de jobs en retard : NT
 - Pourcentage de jobs en retard : $PT = NT/n$

5. Retard conditionnel (Conditional Tardiness)

- Moyenne : $\overline{CT} = \sum_{i \in \phi} \frac{Max(0, C_i - d_i)}{NT}$, la moyenne est calculée uniquement sur les jobs effectivement en retard.
- Variance : $Var(CT)$

Critères relatifs aux coûts :

1. Coût du retard
2. Coût de non occupation des machines
3. Coût (ou valeur) des en-cours
4. Coût total par job

b. Conclusions sur les critères :

[Boucon 91] a mené une étude approfondie sur les mesures de performance utilisées dans la littérature en retirant les résultats d'une soixantaine d'articles. Ses conclusions sont les suivantes :

- La variance du temps de cycle mesure l'aptitude du système à favoriser une production par rapport à une autre. Une variance faible signifie que la plupart des pièces passent à peu près le même temps dans l'atelier, ce qui permet des prévisions plus sûres.
- Dans le cas d'une production "Juste à Temps", où on considère que l'avance est aussi pénalisante que le retard, en produisant des stocks inutiles et en surchargeant l'atelier, le retard algébrique est un critère plus intéressant que le retard.
- Pour différencier un système produisant peu de jobs en retard mais qui présentent des retards importants, d'un système produisant beaucoup de jobs en retard avec des retards faibles, on peut utiliser la moyenne quadratique du retard. Ce critère tend à pénaliser les systèmes produisant peu de jobs en retard mais avec des retards importants.
- Un critère de coût provient en général de la combinaison pondérée d'un certain nombre de critères, le plus souvent le temps de cycle et le retard. Les critères de coût sont sûrement les critères les plus intéressants pour un industriel mais leurs valeurs varient avec chaque système étudié. C'est pourquoi les mesures de coût rencontrées dans la littérature sont très diverses et les résultats associés difficilement généralisables.

La qualité de l'ordonnancement obtenu est souvent évaluée par rapport à deux problèmes principaux dans les ateliers : la réduction des en-cours et le respect des délais. Pour mesurer l'efficacité du système par rapport aux volumes d'en-cours, on utilise généralement les critères liés aux temps de présence des produits dans l'atelier (Flow time) ou aux dates d'achèvement des produits (Completion time). Pour évaluer les performances de l'atelier par rapport aux délais, on utilise les critères mesurant la performance du système par rapport aux dates échues (retard, retard algébrique, retard conditionnel, pourcentage de jobs en retard).

Pour juger de l'efficacité par rapport aux dates échues, [Baker 84], [Russel et al 87], [Schultz 89] privilégient trois mesures : le pourcentage de jobs en retard, le retard moyen et le retard conditionnel moyen.

Plusieurs études portant sur les règles de priorité ont analysé les performances des règles par rapport à une seule mesure de performance. Pourtant, le problème d'ordonnancement se présente souvent comme un problème d'optimisation multi-critères (réduire à la fois le temps de cycle et le retard).

[Baker 84] parle d'objectifs multidimensionnels pour exprimer la nature complexe des problèmes d'ordonnancement dans les ateliers. Cette complexité est également due au fait que les objectifs de production à atteindre peuvent être opposés. Cette opposition peut être intrinsèquement lié à la nature du problème et aux objectifs à atteindre, par exemple réduire la moyenne du retard conditionnel conduit souvent à augmenter le nombre de jobs en retard. D'autre part, cette opposition peut être induit par la stratégie adoptée, ainsi la règle SPT est très efficace pour réduire la moyenne du temps de cycle mais en contrepartie provoque un accroissement important de la moyenne du retard conditionnel.

2.2.3 Classification des règles de priorité :

[Baker 74], [Panwalker et Iskander 77], [Blackstone et al 82] ont tenté de classifier les règles de priorité selon :

- La portée des règles (locales ou globales)
- L'état des règles (statiques ou dynamiques)
- La complexité des règles (simples ou composées)
- En fonction des paramètres pris en compte par la règle.

Dans le dernier cas, il existe des règles :

- Prenant en compte les temps opératoires (SPT, SRT)
- Prenant en compte les délais (EDD, ODD)
- Combinant les deux (SPT-T, MST)
- Prenant en compte les coûts (VALUE).
- Ne tenant compte d'aucun de ces paramètres (FIFO, WINQ).

Pour les règles prenant en compte les délais (seuls ou combinés avec les temps opératoires), une classification plus précise peut être réalisée :

1. Les règles basées uniquement sur le délai restant (allowance) : Les règles Earliest Due Date et Operation Due Date.
2. Les règles basées sur la marge restante ou slack (i.e., délai restant - durée totale des opérations restant) : Les règles Minimum Slack Time et Operation Slack Time.
3. Les règles basées sur le ratio critique (i.e., délai restant / durée totale des opérations restant). L'intérêt du ratio critique est de permettre de repérer les jobs qui risquent d'être en retard (leur ratio est égal à 1), et ceux qui sont déjà en retard (ratio inférieur à 1). Les règles Smallest Critical Ratio et Operation Critical Ratio sont basées sur le ratio critique. Selon [Mestoudjian et De Crescenzo 87] les règles basées sur le ratio critique sont relativement présentes dans les ateliers.

Les règles basées sur la marge restante, ainsi que les règles basées sur le ratio critique, ont un comportement qui peut se révéler antagoniste avec les règles basées sur les temps opératoires. En effet, avec une règle basée sur la marge restante ou sur le ratio critique, pour deux lots ayant la même date d'échéance, le lot ayant la plus grande durée opératoire sera choisi en priorité. D'une certaine manière, ces règles ont tendance à privilégier des jobs ayant des durées opératoires importantes, contrairement à la stratégie SPT. Ainsi, la combinaison de la règle SPT avec des règles basées sur la marge est une opération plus complexe qu'il n'y paraît.

2.2.4 Combinaison des règles de priorité :

Le problème d'ordonnancement se présente le plus souvent comme un problème multi-critères. Non seulement les objectifs de production sont multidimensionnels, mais ils apparaissent souvent comme antagonistes. Il n'y a pas de règle reconnue comme étant efficace simultanément pour un grand nombre de critères d'évaluation. Ainsi, une règle ayant de très bonnes performances pour un ou plusieurs critères (SPT par exemple) apparaît comme ayant de très mauvaises performances pour d'autres (par exemple la règle SPT avec le retard conditionnel moyen). Or, la plupart des règles de priorité poursuivent au plus un seul objectif, et choisissent les jobs à traiter en fonction d'un seul critère, malgré la nature multi-critères du problème d'ordonnancement [Mebarki 95].

a. Intérêts de la combinaison des règles de priorité :

On a défini les règles de priorité, comme des règles d'ordonnancement local permettant une gestion en temps réel du problème d'ordonnancement global. Il est clair qu'une stratégie d'ordonnancement local dépend d'abord du comportement du poste sur lequel s'effectue cette stratégie. Ainsi, si la stratégie d'ordonnancement est basée sur des règles de priorité, il apparaît qu'une judicieuse combinaison de différentes règles de priorité devrait être plus efficace qu'une seule et même règle appliquée à tous les postes. L'objectif d'une combinaison de règles de priorité et d'appliquer une règle de priorité spécifique à chaque ressource de l'atelier, en fonction de son comportement (poste goulot) ou de ses caractéristiques (robot, outillage spécialisé...).

[Barrett et Barman 86] ont mis en oeuvre un système dont la stratégie d'ordonnancement est basée sur une combinaison de règles de priorité. Sur un modèle simplifié d'atelier Flow Shop (également utilisé par [Pierreval et Ralambondrainy 90]), ils ont montré que pour des critères de performance tels que le temps de cycle et le retard des jobs leur approche était plus efficace qu'une approche basée sur l'application d'une seule et même règle à toutes les machines. Cependant, leur approche ne prend en compte qu'un seul critère à la fois.

[Portmann et Ghedjati 94], [Caux et al 95], proposent de combiner des heuristiques d'ordonnancement avec des algorithmes génétiques. Pour cela, les algorithmes génétiques effectuent un "brassage" des heuristiques de manière à déterminer pour chaque machine une heuristique à appliquer. La combinaison retenue est celle optimisant la fonction objective.

b. Limites de la combinaison des règles de priorité :

Combiner différentes règles de priorité, revient en fait à sélectionner une règle adaptée à chaque ressource et aux paramètres du système (liés aux objectifs de production et aux conditions opératoires). Combiner différentes règles de priorité, c'est vouloir associer une règle spécifique à chaque ressource de l'atelier, et même dans certains cas, à chaque couple de jobs. Cette règle doit être adaptée aux caractéristiques techniques et au comportement de la ressource considérée. Mais le comportement de chaque ressource n'est pas figé et évolue en fonction de l'état de l'atelier. Aussi, il est nécessaire de pouvoir opérer un réajustement de la stratégie d'ordonnancement chaque fois que l'atelier change d'état afin d'assurer une bonne adéquation entre les règles de priorité et les ressources. Pour cela, les stratégies d'ordonnancement prennent en compte l'état réel de l'atelier au fur et à mesure que son évolution l'impose [Mebarki 95].

On peut conclure que si la performance des règles de priorité dépend de la configuration de l'atelier et des conditions opératoires, dans une vision d'ordonnancement temps réel la performance des règles de priorité dépend aussi grandement de l'état réel de l'atelier. Ainsi, [Boucon 91] suggère la possibilité "de changer la règle de priorité au cours de l'ordonnancement en fonction de la congestion de l'atelier".

Plusieurs auteurs ont proposé des approches basées sur une sélection des règles de priorité en fonction de l'état de l'atelier. D'autres auteurs ont également proposé des systèmes d'ordonnancement temps réel basés sur la sélection dynamique des règles de priorité.

2.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité de l'ordonnancement et des règles de priorité. La première partie visait à situer l'ordonnancement dans le contexte des fonctions de production et de gestion de production. Pour cela, nous définissons tout d'abord l'ordonnancement, ses objectifs et ses contraintes. En fonction de cette définition, le problème d'ordonnancement a été présenté. Des méthodes de résolution du problème d'ordonnancement ont ensuite été envisagées.

La seconde partie de ce chapitre, a été consacrée aux règles de priorités où nous avons défini ces règles et donné les principaux critères de leurs évaluations puis leurs classifications.

Pour terminer le chapitre, nous avons abordé la combinaison des règles de priorité, son intérêt et les limites de cette combinaison.

Chapitre 3

La règle DMM et proposition de la règle DMM modifiée

3.1 Introduction :

Les problèmes d'ordonnancement sont généralement de type NP Complet. L'une des premières études sur l'ordonnancement des systèmes flexibles de production est le travail de **[Nof et al 79]** où il démontre l'importance et l'effet des décisions d'ordonnancement sur les performances des systèmes de production.

La définition classique et traditionnelle dit que l'ordonnancement est une activité faite en temps différé où les opérations de production sont ordonnancées avant le début de la production.

Avec l'ordonnancement en temps différé on trouve beaucoup de problèmes à cause des changements inévitables en raisons du réordonnancement dues aux pannes des machines ou au manque de matériaux par exemple.

Les facteurs cités ci-dessus et beaucoup d'autres, rendent le réordonnancement obligatoire afin d'éviter l'augmentation des temps d'attente, l'augmentation des en-cours, la faible utilisation des machines et des équipements et éventuellement la dégradation des performances du système de production **[Wu et Wysk 89]** **[Ishii et Muraki 96]**.

Plusieurs chercheurs proposent différentes méthodes pour fournir une flexibilité à l'ordonnancement en temps différé afin d'augmenter les performances des systèmes **[Saygin et Kilic 99]** **[Liu et MacCarthy 97]** **[Saygin et Kilic 96]**.

Cependant, l'ordonnancement temps réel reste toujours le but souhaitable mais insaisissable **[Basnet et Mize 94]** **[Shukla et Chen 96]**.

En conséquence, établir un système intégré d'ordonnancement temps réel et de commande qui répond aux changements de l'état du système, est essentiel pour améliorer les performances du système de production.

Le contrôle et l'ordonnancement temps réel des systèmes flexibles de production sont devenus un domaine de recherche populaire depuis le début des années 80, période dans laquelle les systèmes

flexibles de production ont été adoptés par les pays industriels [Saygin et al 95] [Saygin et Kilic 97] [Peng et Chen 98].

Mais beaucoup d'études dans le contrôle et l'ordonnancement des FMS en temps réel ne prennent pas en considération la flexibilité des routages alternatifs [Byrne et Chutima 97] [Kazerooni et al 97] et la plupart des études qui prennent en compte ce point, règlent le problème de la sélection des routages avant le début de la production [Das et Nagendra 97] [Cho et Wysk 95].

Cette approche n'est pas applicable pour les systèmes flexibles de production aléatoires [Rachamadugu et Stecke 94], où on ne peut pas prévoir l'arrivée ou l'entrée des pièces dans le système avant le début de la production.

Car les routages des pièces peuvent être différents même pour des pièces de même type [Rachamadugu et Stecke 94]. Ainsi le système de commande d'un FMS aléatoire est obligé d'utiliser effectivement et efficacement la flexibilité des opérations et des routages en temps réel pour avoir la capacité de s'adapter, avec l'arrivée aléatoire des pièces et des événements imprévus [Mamalis et al 95] [Rachamadugu et Stecke 94].

L'emploi des règles d'affectation comme outils de décision, pour la commande et l'ordonnancement des FMS en temps réel, a été déjà traité par plusieurs études. Mais la nature myope des règles d'affectation mène à des ordonnancements imparfaits, puisque ces règles ne captent pas les informations correspondantes à certains niveaux des systèmes de production [Rachamadugu et Stecke 94] [Gupta et al 89]. En plus l'efficacité des règles d'affectation dépend des caractéristiques des systèmes de production, des conditions sur les opérations de traitement et des mesures de performances du système [Kouiss et al 97].

Les manques de ces méthodes d'ordonnancement des FMS en temps réel, qui utilisent la flexibilité des opérations et des routages sont la force motrice de cette règle de sélection des routages alternatifs en temps réel. Dans ce chapitre nous allons présenter la règle DMM, la règle DMM modifiée et le modèle FMS que nous allons étudier dans le prochain chapitre à l'aide de la simulation, afin de faire une comparaison entre les deux règles de sélection.

3.2 Règle de sélection des routages alternatifs en temps réel DMM :

La règle de sélection des routages alternatifs en temps réel DMM (Dissimilarity Maximization Method), est une méthode inspirée de la technologie de groupe que nous avons déjà définie dans le premier chapitre (section 1.3). La méthode DMM a un fonctionnement réciproque de la technologie de groupe puisqu'elle cherche à maximiser les dissimilarités au lieu des similitudes.

La DMM est une méthode de sélection des plans de processus alternatifs développée par [Saygin et Kilic 99] pour la sélection de routages alternatifs pour l'ordonnancement en temps différé des systèmes flexibles de production.

Afin de réduire les encombrements et augmenter le taux de production des systèmes flexibles de production, la DMM va être utilisée pour l'ordonnancement des FMS en temps réel.

Cette méthode est basée sur la maximisation des coefficients de dissimilarités entre les routages alternatifs. Ces coefficients utilisent les types de machines qui appartiennent à chaque routage.

La sélection d'un routage parmi les routages alternatifs de chaque type de pièce se fait en maximisant la somme des coefficients de dissimilarités.

Le coefficient de dissimilarité entre deux routages i et j est défini comme suit [Saygin et Kilic 99]:

$$D_{ij} = \frac{\text{Nombres de type de machine non commune entre les routages } i \text{ et } j}{\text{Nombres de machine total entre les routages } i \text{ et } j} \quad (3.1)$$

Pour la sélection des routages alternatifs nous allons maximiser la somme total des dissimilarités entre les routages comme suit [Saygin et Kilic 99]:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q X_j D_{ij} \quad (3.2)$$

•Contraintes :

$$\sum_{j=1}^q C_{ij} X_j = 1 \quad \text{pour toutes les pièces } i = 1, \dots, n \quad (3.2.1)$$

L'équation (3.2.1) implique que seulement un routage sera sélectionné pour chaque pièce.

$$\sum_{j=1}^q X_j = n \quad \text{pour tout les routages } j = 1, \dots, q \quad (3.2.2)$$

L'équation (3.2.2) implique que le nombre de routages sélectionnés sera égal au nombre de pièces.

•Notations :

n : Nombre de pièces.

q : Nombre de routages.

D_{ij} : Dissimilarité entre les routages i et j .

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } i \text{ est sur le routage } j. \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si le routage } j \text{ est occupé} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

3.3 Présentation de la règle DMM :

Dans ce paragraphe nous présentons la règle DMM (Dissimilarity maximization method) en proposant son algorithme et son organigramme où nous allons montrer les différentes étapes à suivre pour intégrer la règle DMM comme outil de sélection de routages alternatifs en temps réel.

3.3.1 Algorithme de la règle DMM [Saygin et al 01]:

Nous montrons dans ce qui suit, la manière d'appliquer la règle DMM dans un système flexible de production afin de sélectionner un routage parmi les routages disponibles pour chaque type de pièce. Les pièces qui arrivent en premier ont la plus grande priorité suivant la règle FIFO (First in First out), les autres pièces restent en attente dans les files d'attente d'entrée ou de sortie des différentes machines ou dans la station de chargement. L'algorithme de la règle DMM est donné comme suit :

Etape 1 : Tous les routages sont libres (disponible) donc $X(i) = 0$.

Etape 2 : Calcul des coefficients de dissimilitude D_{ij} comme suit :

$$D_{ij} = \frac{\text{Nombres de type de machine non commune entre les routages } i \text{ et } j}{\text{Nombres de machine total entre les routages } i \text{ et } j}$$

Etape 3 : Création des pièces.

Etape 4 : Selon le type de la pièce testée s'il y'a au moins un routage libre et au moins une place libre dans la file d'attente de la station de chargement.

Etape 5 : Si la condition précédente n'est pas vérifiée, la pièce va dans une file d'attente jusqu'à ce que la condition soit vérifiée.

Etape 6 : Si la condition de l'étape 4 est vérifiée alors on calcule la somme :

$$S(j) = \sum_{i=1}^q X(i) D(i, j).$$

Etape 7 : Trouver le maximum de $S(j)$.

Etape 8 : Le routage j correspondant à la valeur de $S(j)$ trouvée dans l'étape précédente est occupé donc : $X(j)=1$ (Le routage j contient une seule pièce à la fois).

Etape 9 : Traitement de la pièce selon le routage sélectionné j.

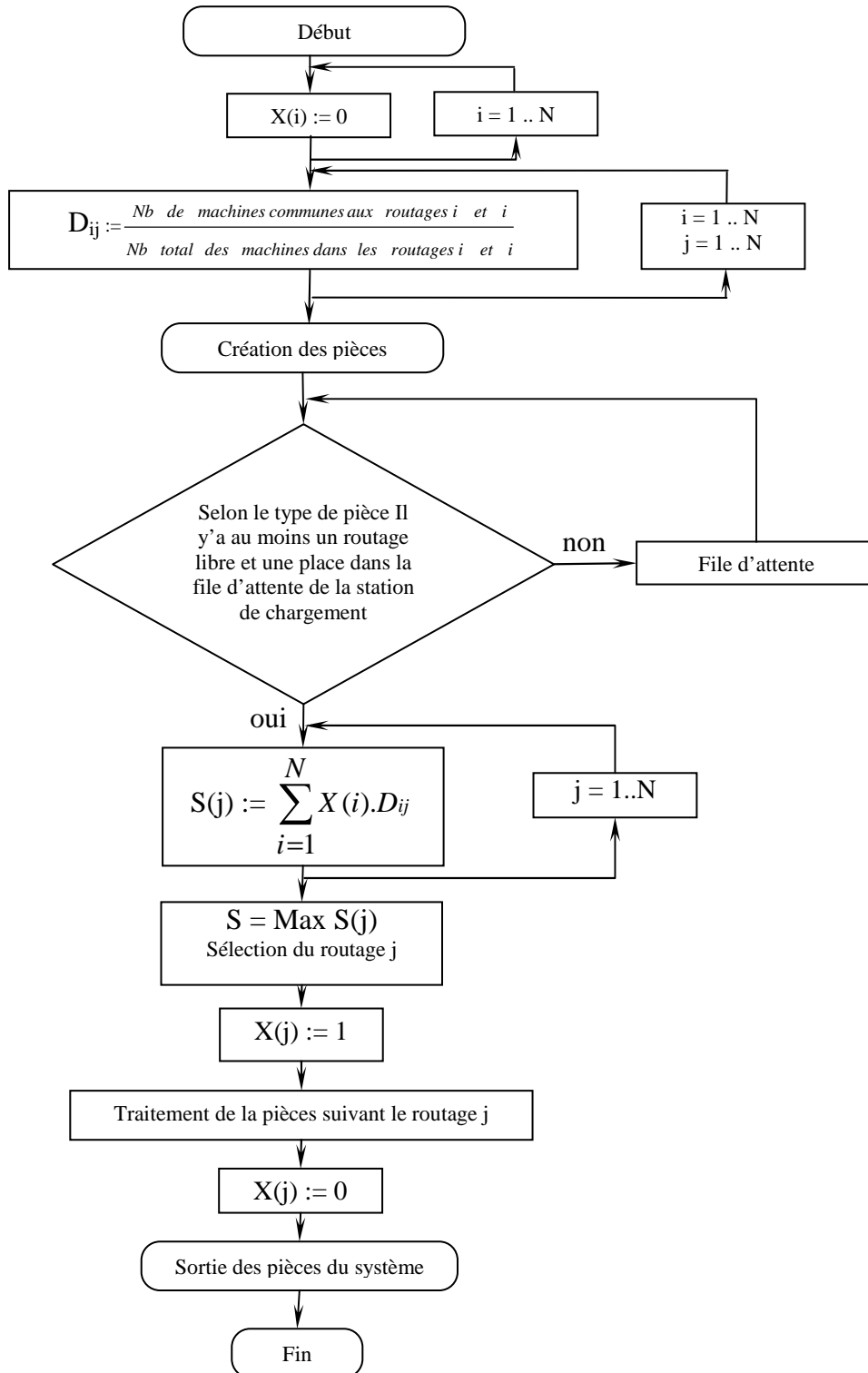
Etape 10 : A la fin du traitement, le routage devient de nouveau disponible $X(j)=0$.

Etape 11 : Sortie de la pièce du système.

- **Remarque :** Ce cycle va se répéter de l'étape 3 à l'étape 11 à chaque création de pièce, jusqu'à la fin du temps de simulation.

3.3.2 Organigramme de la règle DMM :

Après avoir présenté l'algorithme de la règle DMM, nous allons donner un schéma sous forme d'organigramme pour simplifier la présentation et la compréhension de cette règle.



$X(i), X(j)$: L'état du routage i ;

$$X(i) = \begin{cases} 0 & \text{si le routage } i \text{ est disponible} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

D_{ij} : le coefficient de dissimilarités entre les routages i et j

Figure 3.1 : Organigramme de la règle DMM [Saygin et al 01].

3.4 Présentation de la règle DMM modifiée :

Dans cette section nous allons expliquer la règle DMM modifiée que nous avons développée à partir de la règle DMM déjà citée précédemment, Cette règle est aussi utilisée dans la sélection des routages alternatifs en temps réel dans un FMS.

Dans notre étude de la règle DMM, nous avons remarqué que pour un taux de création de pièces important et pour une capacité des tailles de files d'attentes faible:

- Le système de production est saturé.
- Le taux d'utilisation des machines et du transporteur est assez faible.

Ce qui va influencer sur les performances du système de production. Pour cela nous proposons la règle DMM modifiée afin d'améliorer la règle DMM et augmenter les performances du système de production, donc l'augmentation du taux de production et l'augmentation de l'utilisation des machines et du système de transport.

Dans la règle DMM, après avoir sélectionné un routage pour une pièce, ce routage ne peut pas être utilisé par une autre pièce tant que la première pièce n'est pas sortie du système donc chaque routage ne peut contenir qu'une seule pièce à la fois. Notre modification de cette règle vise à garder le même principe qui dépend de la maximisation des coefficients de dissimilitude pour la sélection des différents routages alternatifs mais en affectant plusieurs pièces à un seul routage. Alors si tous les routages sont sélectionnés par une pièce, la pièce suivante va être acheminée dans le routage où la file d'attente de la première machine de ce routage, contient au moins une place libre.

3.4.1 Algorithme de la règle DMM modifiée :

Dans ce paragraphe nous montrons l'intégration de la règle DMM modifiée, dans un système flexible de production pour la sélection d'un routage alternatif parmi les routages disponibles pour chaque type de pièce. Les pièces arrivant en premier ont une priorité plus élevée suivant la règle FIFO (First In First Out) les autres pièces restent en attente dans les files d'attentes d'entrée ou de sortie des différentes machines ou dans la station de chargement. La règle DMM modifiée va utiliser l'algorithme suivant pour la sélection des routages alternatifs en temps réel dans un système flexible de production.

Etape 1 : Tous les routages sont libres (disponible) donc $X(i) = 0$.

Etape 2 : Calcul des coefficients de dissimilitude D_{ij} comme suit :

$$D_{ij} = \frac{\text{Nombres de type de machine non commune entre les routages } i \text{ et } j}{\text{Nombres de machine total entre les routages } i \text{ et } j}$$

Etape 3 : Création des pièces.

Etape 4 : Selon le type de la pièce testée :

- S'il y'a au moins un routage libre et au moins une place libre dans la file d'attente de la station de chargement.

Ou

- Si tout les routages sont occupés et la file d'attente d'entrée des premières machines de ces routages contient au moins une place libre et ces machines ne sont pas en panne.

Etape 5 : Si la condition précédente n'est pas vérifiée, la pièce va dans une file d'attente jusqu'à ce que la condition soit vérifiée.

Etape 6 : Si la condition de l'étape 4 est vérifiée alors on va calculer la somme :

$$S(j) = \sum_{i=1}^q X(i) D(i, j).$$

Etape 7 : Tester, si on a trouvé un maximum de $S(j)$ (Il y'a des routages libres).

Etape 8 : Si la condition précédente est vérifiée alors, aller à l'étape 10.

Etape 9 : Si la condition de l'étape 7 n'est pas vérifiée, alors sélectionner le routage où la file d'attente d'entrée de sa première machine contient au moins une place libre.

Etape 10 : Le routage j sélectionné d'après l'étape 7 ou l'étape 9 est donc occupé, $X(j)=1$.

Etape 11 : Traitement de la pièce selon le routage sélectionné j .

Etape 12 : A la fin du traitement, le routage devient de nouveau disponible $X(j)=0$.

Etape 13 : Sortie de la pièce du système.

- **Remarque :** Ce cycle va se répéter de l'étape 3 à l'étape 11 à chaque création de pièce, jusqu'à la fin du temps de simulation.

3.4.2 Organigramme de la règle DMM modifiée :

Après avoir présenté l'algorithme de la règle DMM modifiée, on va donner un schéma de cette règle sous forme d'organigramme.

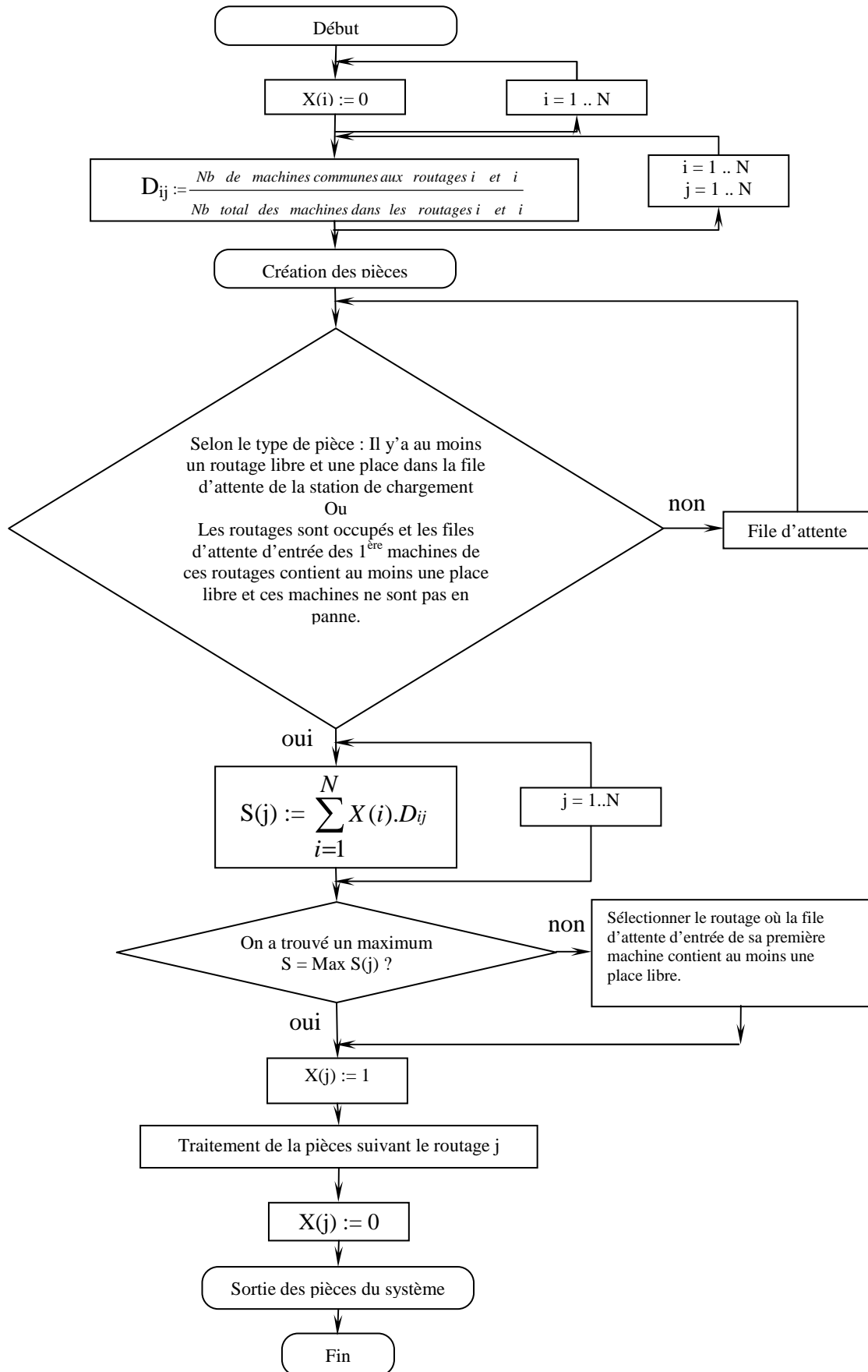


Figure 3.2 : Organigramme de la règle DMM modifiée.

3.5 Présentation du système FMS étudié [Saygin et al 01]:

Pour faire la comparaison entre les deux règles DMM et DMM modifiée, nous avons étudié et simulé un système flexible de production.

Ce système contient sept machines et deux stations : une station de chargement et une de déchargement. Six types de pièces différentes sont traités dans le système.

Les machines et les stations qui composent le système étudié sont définies comme suit :

- Deux fraiseuses verticales (FV).
- Deux fraiseuses horizontales (FH).
- Deux tours (T).
- Une toupie (TP).
- Une station de chargement (SC).
- Une station de déchargement (SD).

Chaque machine comporte une file d'attente d'entrée et une file d'attente de sortie, la station de chargement contient aussi une file d'attente d'entrée.

La configuration du système flexible de production est donnée dans la figure suivante :

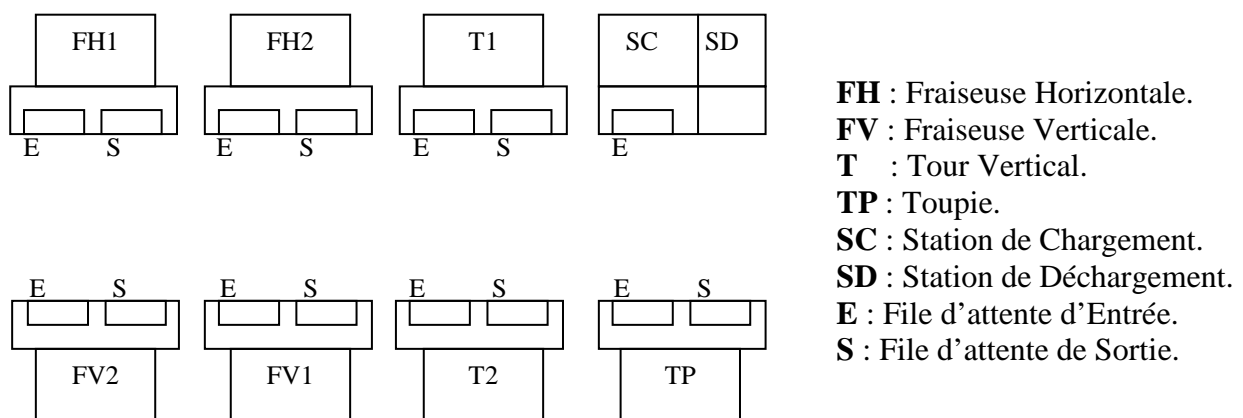


Figure 3.3 : Configuration du modèle FMS étudié [Saygin et al 01].

Les routages alternatifs et les temps de traitement de chaque type de pièce sont donnés dans le tableau suivant :

Type de pièces	Taux d'arrivée	Routages & temps de traitement (min)
A	17%	SC – T1 (30) – FV1 (20) - SD
		SC – T1 (30) – FV2 (20) – SD
		SC – T2 (30) – FV1 (20) – SD
		SC – T2 (30) – FV2 (20) - SD
B	17%	SC – T1 (20) – TP (1) – FV1 (15) – SD
		SC – T1 (20) – TP (1) – FV2 (15) – SD
		SC – T2 (20) – TP (1) – FV1 (15) – SD
		SC – T2 (20) – TP (1) – FV2 (15) – SD
C	17%	SC – T1 (40) – FV1 (25) - SD
		SC – T1 (40) – FV2 (25) – SD
		SC – T2 (40) – FV1 (25) – SD
		SC – T2 (40) – FV2 (25) – SD
D	21%	SC – T1 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH2 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH1 (35) – SD
		SC – T1 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH2 (35) - SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH1 (35) - SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T1 (20) – FH2 (35) - SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH1 (35) - SD
		SC – T2 (40) – TP (1) – T2 (20) – FH2 (35) - SD
E	20%	SC – T1 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH1 (50) - SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH2 (50) - SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH1 (50) - SD
		SC – T1 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH2 (50) - SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH1 (50) - SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T1 (35) – FH2 (50) - SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH1 (50) - SD
		SC – T2 (25) – TP (1) – T2 (35) – FH2 (50) - SD
F	8%	SC – FH1 (40) – SD
		SC – FH2 (40) – SD

Tableau 3.1 : Routages alternatifs et temps de traitement des pièces [Saygin et al 01].

Les opérations sur le système flexible de production étudié sont basées sur les suppositions suivantes :

- Les routages alternatifs de chaque type de pièce sont connus avant le début de la production.
- Le temps de traitement est déterminé et il comprend le temps de changement des outils et le temps d'exécution de la machine.

- Le temps de traitement d'une opération est le même sur les machines alternatives identifiées pour cette opération.
- Chaque machine peut traiter une seule pièce à la fois.

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé en premier, la méthode DMM [Saygin et Kilic 99], nous avons donné son algorithme et expliqué son fonctionnement. Ensuite nous avons présenté la méthode DMM modifiée, où nous avons modifié la méthode DMM afin d'augmenter les performances d'un système flexible de production. Nous avons tout d'abord présenté son algorithme puis son organigramme.

Pour faire la comparaison entre les deux règles DMM et DMM modifiée, nous avons étudié et simulé un système flexible de production que nous avons décrit à la fin de ce chapitre.

Chapitre 4

Résultats & Interprétations

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons les tests effectués, ainsi que les résultats obtenus de la comparaison des performances entre la règle DMM modifiée proposée dans le chapitre 3 et la règle DMM développée par [Saygin et Kilic 99].

Afin de comparer les performances de la méthode DMM modifiée par rapport à la méthode DMM, nous allons aborder une étude en simulation sur le taux de production, le temps de cycle, les encours, le taux d'utilisation des machines et le taux d'utilisation du transporteur (AGV).

Les tests ont été effectués sous des conditions opératoires très variées, en utilisant le logiciel de simulation ARENA.

ARENA est une interface graphique très puissante du langage de simulation des systèmes à événements discrets SIMAN. Elle est particulièrement adaptée à la simulation des systèmes de production [Sari 03]. Nous l'avons donc utilisé pour simuler un modèle FMS (section 3.4) afin de vérifier et de valider la règle DMM modifiée.

ARENA est conçu de telle sorte qu'elle simule les systèmes tels qu'ils fonctionnent réellement. Des modules sont utilisés pour simuler la création de produits, le transport de produits la mise en attente, etc. Cette conception d'ARENA permet de remplacer l'expérimentation réelle par de la simulation. Il n'y a pas de modèle mathématique, mais un ensemble de modules représentant des tâches similaires à celles qui s'effectuent dans un système réel [Sari 03].

4.2 Présentation du modèle simulé par ARENA :

Dans cette section nous allons donner une présentation du modèle simulé par ARENA.

Nous avons conçu deux modèles ARENA pour simuler le système FMS étudié (section 3.4). Un premier modèle utilisant la règle DMM et un second modèle utilisant la règle DMM modifiée. Les deux modèles ont été simulés sur un temps de simulation de 20000 heures avec 10 répliquations pour chaque simulation. La figure 4.1 présente la configuration du système FMS simulé où on présente les différentes stations de travail et les deux stations de chargement et de déchargement. La distance entre la station de chargement et de déchargement est de 2 mètres, la distance entre les stations de travail est de 10 mètres.

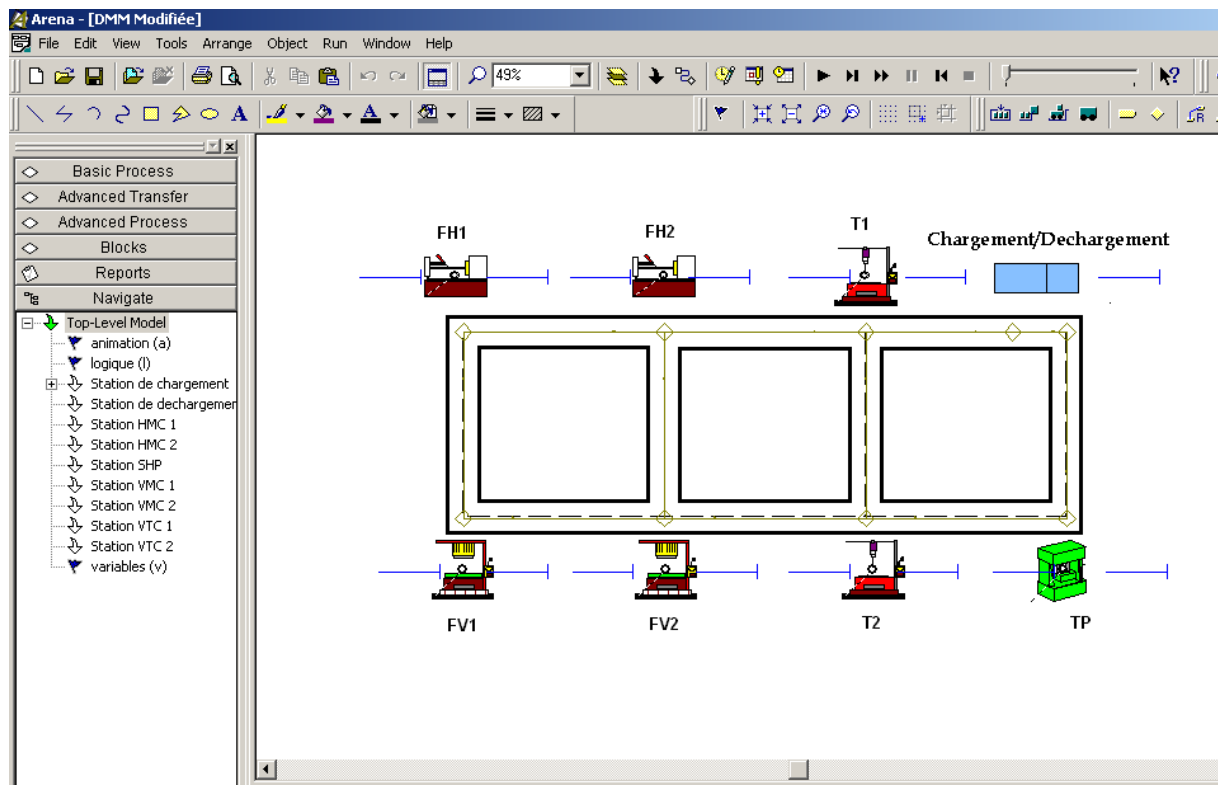


Figure 4.1 : Configuration du modèle FMS.

Ce modèle FMS contient 9 stations, chaque station est représentée dans ARENA par un sous-modèle (Figure 4.2).

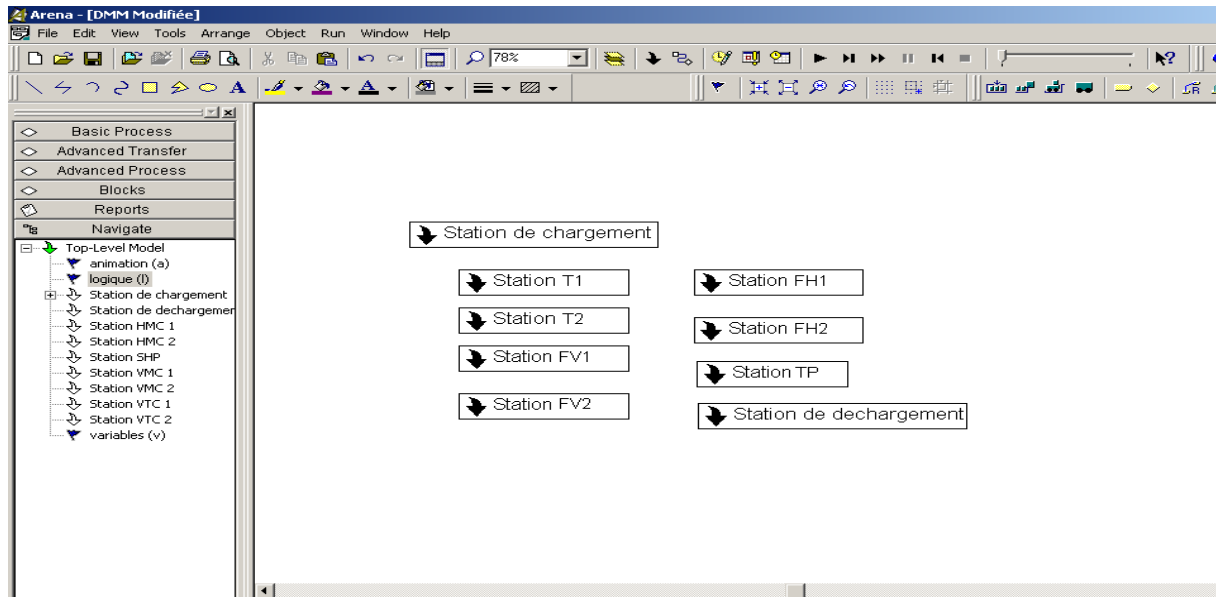


Figure 4.2 : Représentation des stations.

Chaque sous modèle représenté dans la figure 4.2 est composé de plusieurs modules dont chaque module représente une tâche.

La figure suivante montre les différents modules qui composent la station de chargement.

Dans ce module nous allons créer les pièces suivant une loi de distribution aléatoire de probabilité discrète.

Ce module contient 6 autres modules, où chacun représente un type de pièce.

Dans ces modules on va calculer les sommes des coefficients de dissimilitude, ensuite trouver le maximum entre les sommes calculées. Après on va sélectionner le routage que va suivre la pièce le long de son parcours dans le système (voir la figure 4.4).

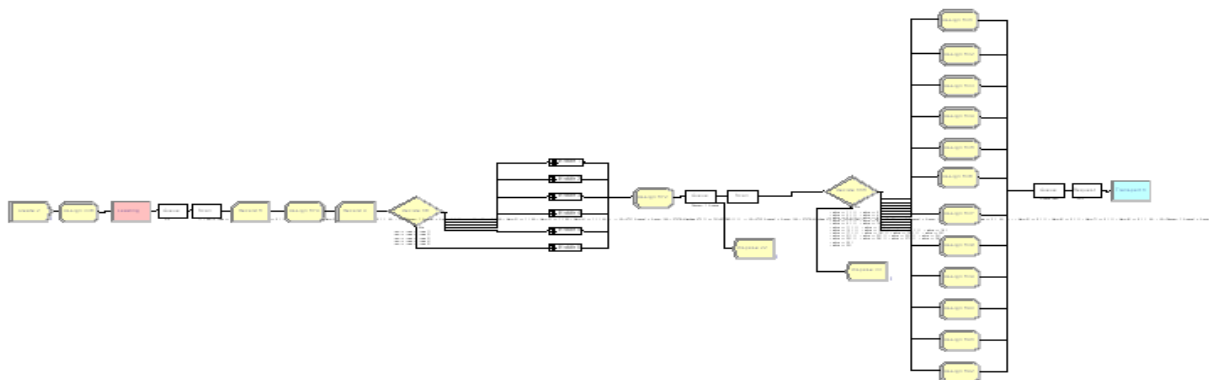


Figure 4.3 : Représentation de la station de chargement.

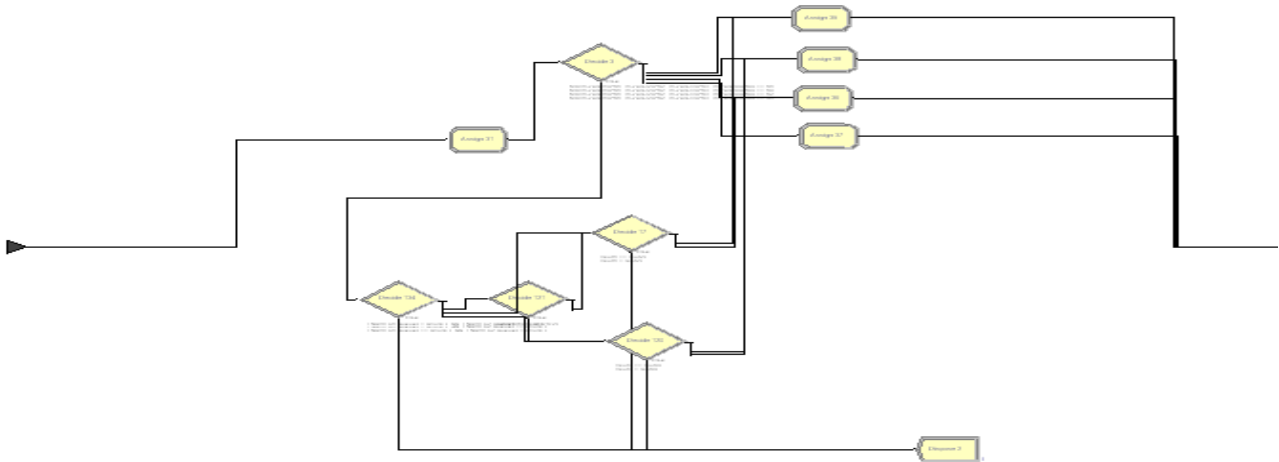


Figure 4.4 : Module représentant la sélection de routage pour l’entité 1 (pièce A).

La sélection des routages pour les autres entités (pièces) est représentée de la même manière que celle montrée dans la figure 4.4.

La figure suivante représente les différents modules constituant la station FV1 (Fraiseuse vertical). Parmi ces modules on peut citer : le module qui représente la station FV1 (en rouge sur la figure), les modules représentant les files d’attente d’entrée et de sortie et le module « transport » (en bleu à droite) qui va diriger le transporteur vers la station suivante.

Les figures de 4.6 à 4.12 représentent les autres stations, les modules utilisés pour représenter ces stations sont les même utilisés dans la station FV1 (figure 4.5).

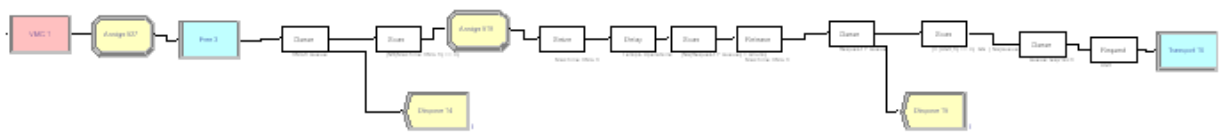


Figure 4.5 : Représentation de la station FV1.

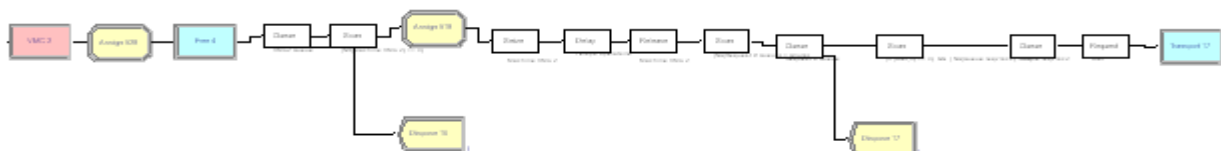


Figure 4.6 : Représentation de la station FV2.

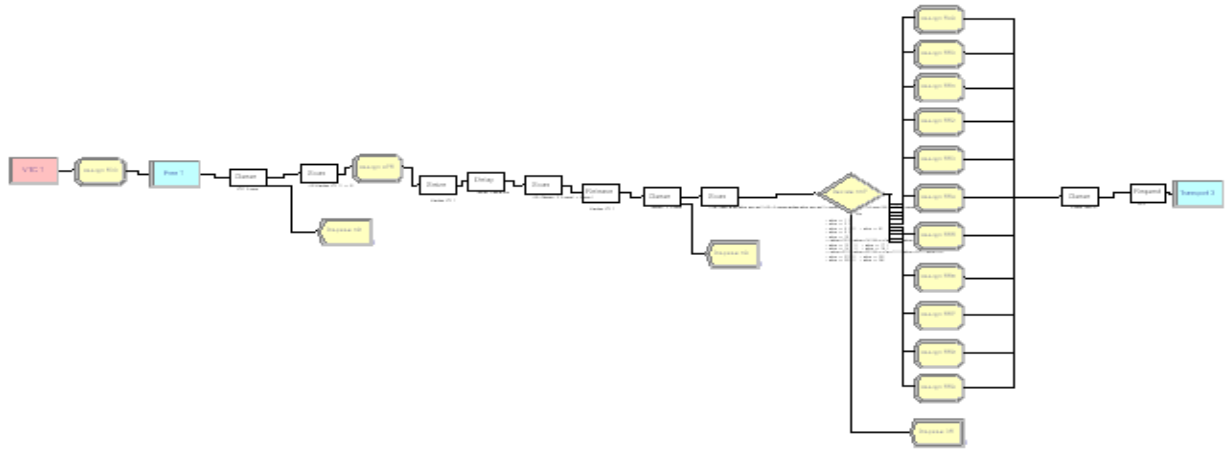


Figure 4.7 : Représentation de la station T1.

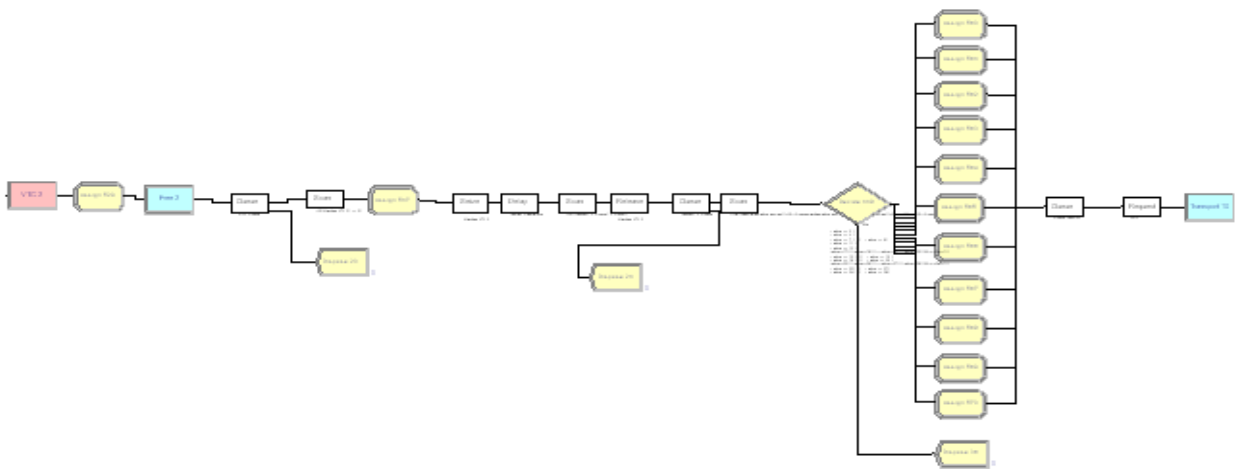


Figure 4.8 : Représentation de la station T2.

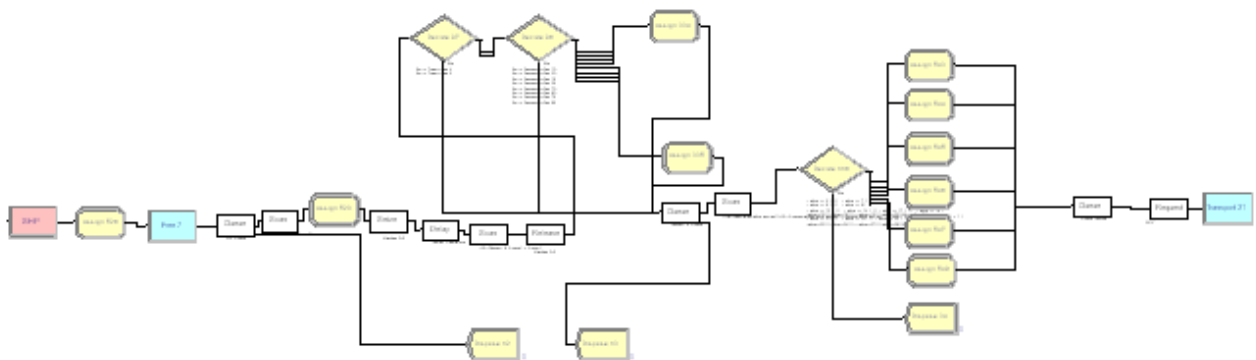


Figure 4.9 : Représentation de la station TP.

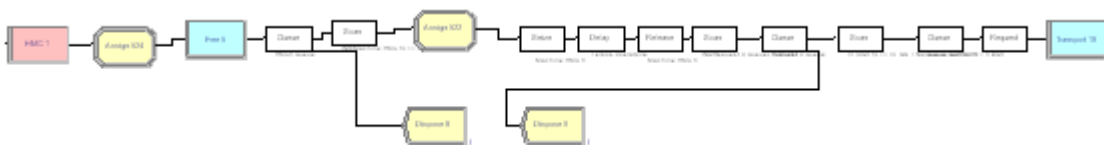


Figure 4.10 : Représentation de la station FH1.



Figure 4.11 : Représentation de la station FH2.



Figure 4.12 : Représentation de la station de déchargement.

4.3 Etude comparative entre la méthode DMM et la méthode DMM modifiée :

Afin de montrer les améliorations apportées par la méthode DMM modifiée à la méthode DMM [Saygin et Kilic 99] nous avons fait plusieurs études en simulation avec des variations sur les critères du système étudié.

Le but de la méthode DMM modifiée est d'augmenter les performances du système lorsqu'il est en état de saturation.

C'est pour ça que les résultats que nous allons présenter reposent sur deux critères principaux :

- Le taux de création des pièces.
- La taille des files d'attente d'entrée et de sortie des stations.

4.3.1 Taux de production :

Dans ce paragraphe nous allons présenter les résultats sur le taux de production. Ces résultats sont la moyenne de dix réplifications de chaque modèle, obtenus après la simulation des deux méthodes.

Le taux de sortie des pièces est calculé en divisant le nombre de pièces sorties du système sur le nombre de pièces créées, afin de faire une normalisation.

Les graphes des figures 4.13 à 4.16 représentent le taux de pièces sorties du système en fonction du taux de création des pièces et pour différentes capacités des files d'attente.

Les courbes des figures 4.13 à 4.16 montrent que pour un taux de création des pièces important les résultats obtenus par la méthode DMM modifiée sont bien meilleurs que celles de la DMM et qu'en dessous du taux de création 1/25 le taux de production est pratiquement le même pour les deux méthodes.

Les figures 4.17 et 4.18 nous montrent qu'en variant les capacités des files d'attente et en maintenant le temps de création fixe,

la méthode DMM modifiée donne de meilleurs résultats pour les files d'attente de petite capacité. En augmentant la capacité des files d'attente le taux de production est presque identique pour les deux méthodes.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	99,99	99,99	99,98	99,71	84,47	60,73	41,67	21,15
	DMM	99,99	99,99	99,97	81,4	24,65	32,05	15,43	8,88

Tableau 4.1 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

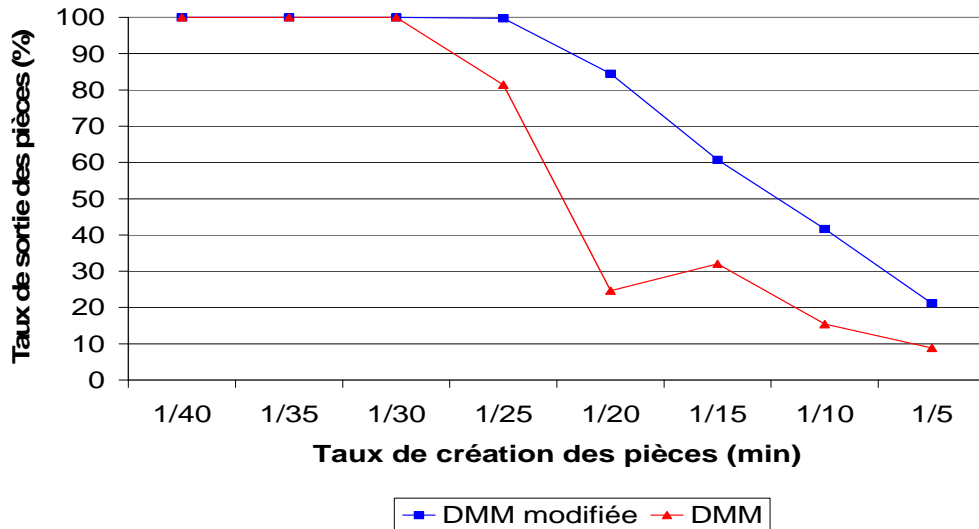


Figure 4.13 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	99,99	99,99	99,99	99,98	90,61	67,79	45,42	22,58
	DMM	99,99	99,99	99,99	99,98	57,84	34,11	33,03	15,76

Tableau 4.2 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 4.

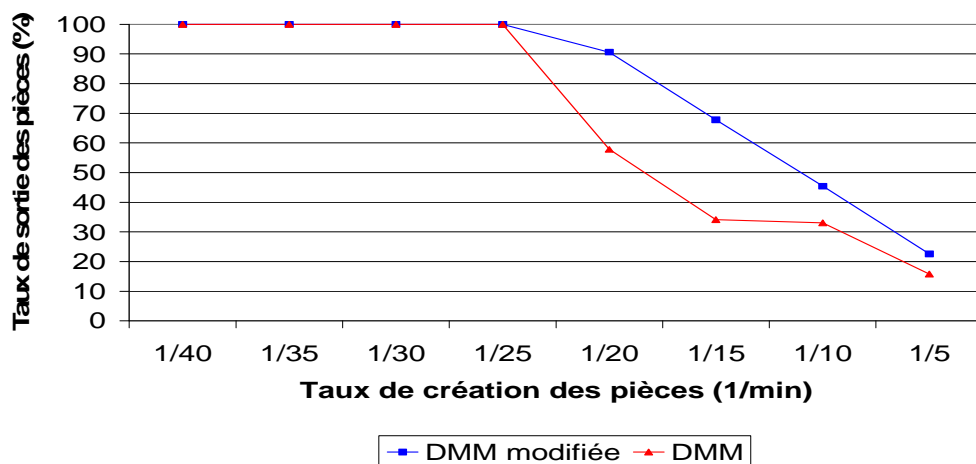


Figure 4.14 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 4.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	99,99	99,99	99,99	99,99	93,11	69,79	46,77	23,44
	DMM	99,99	99,99	99,99	99,99	91,94	53,33	41,3	18,42

Tableau 4.3 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d’attente = 6.

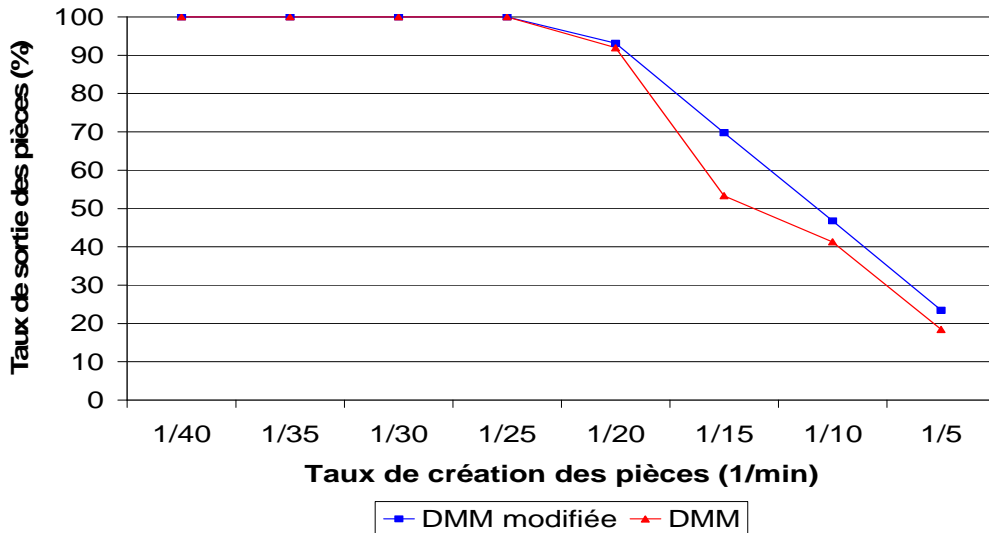


Figure 4.15 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d’attente = 6.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	99,99	99,99	99,99	99,99	94,25	70,83	47,32	23,51
	DMM	99,99	99,99	99,99	99,99	95,71	71,35	47,3	24,01

Tableau 4.4 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d’attente = 8.

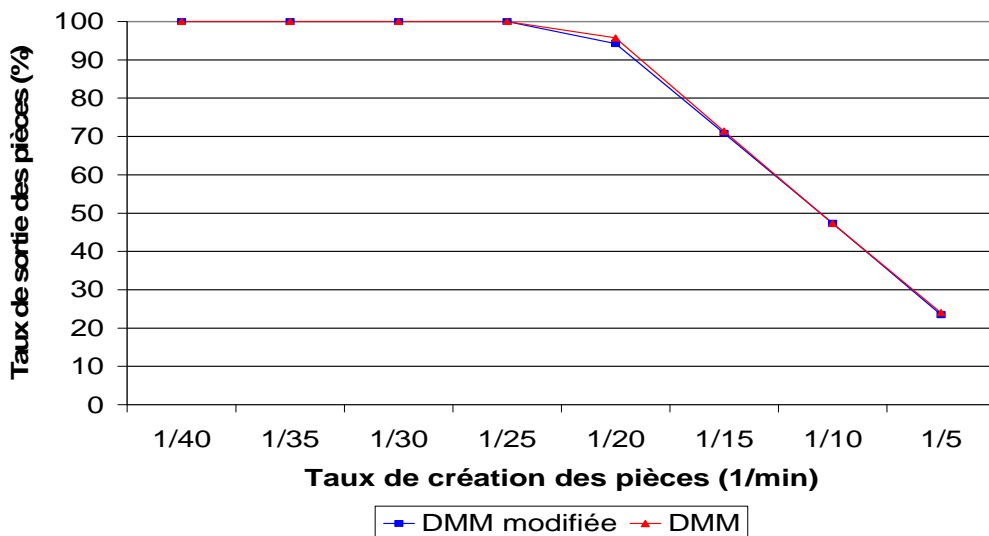


Figure 4.16 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d’attente = 8.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	41,67	45,42	46,77	47,32
	DMM	15,43	33,04	41,3	47,3

Tableau 4.5 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

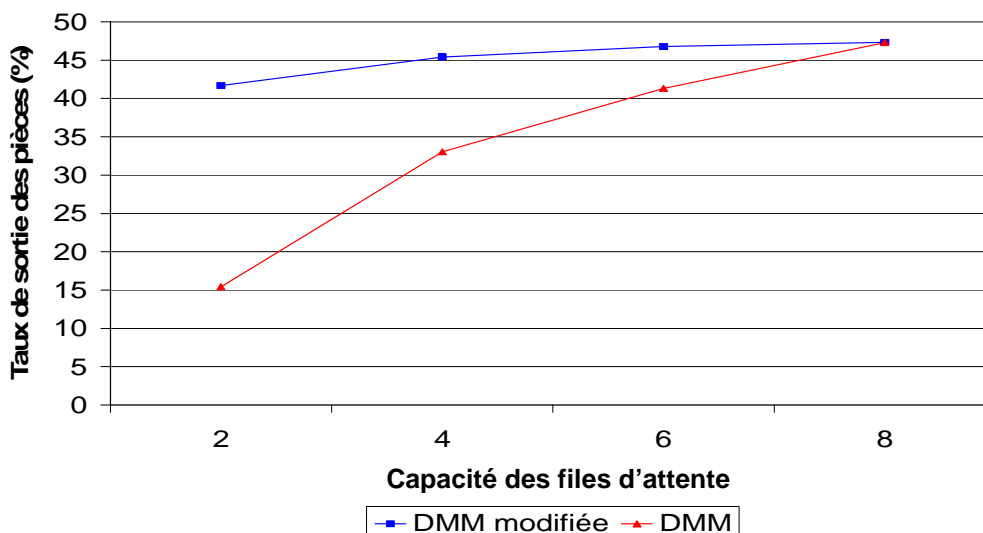


Figure 4.17 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	84,47	90,61	93,11	94,25
	DMM	24,65	57,84	91,94	95,71

Tableau 4.6 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

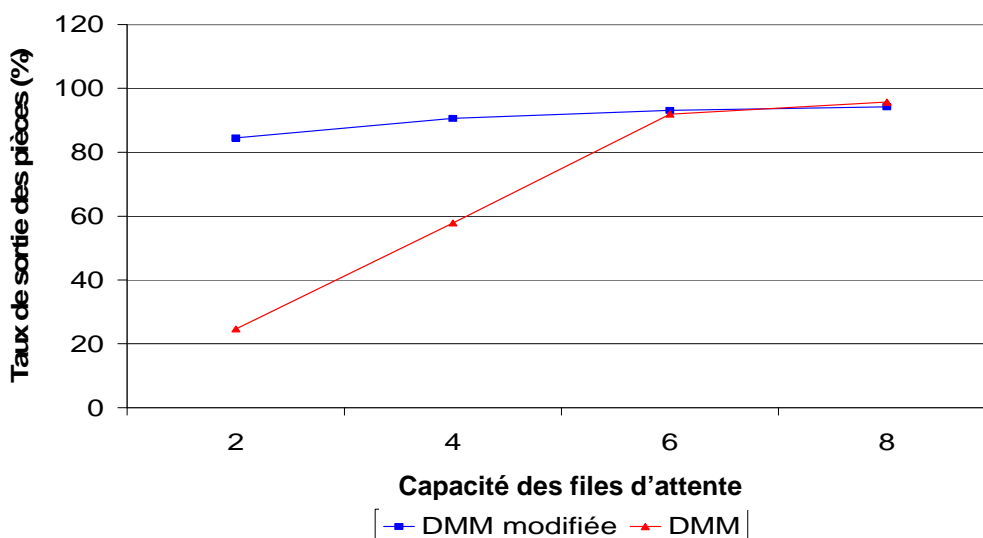


Figure 4.18 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.3.2 Temps de cycle :

Dans cette section nous allons montrer les résultats concernant le temps de cycle, les 4 figures suivantes (figures 4.19 à 4.22) nous montrent que le temps de cycle de la méthode DMM modifiée est supérieur à celui de la méthode DMM pour des taux de création supérieur à 1/25. Cela est dû aux taux de production très élevés pour la DMM modifiée dans cet intervalle ([1/20, 1/5]) et au nombre de pièce qui se trouve dans le système dans ce même intervalle.

Nous pouvons aussi remarquer que l’augmentation des capacités des files d’attente augmente le temps de cycle entre les deux méthodes.

En variant les capacités des files d’attentes et en gardant le taux de création fixe, on peut remarquer que le temps de cycle de la méthode DMM modifiée est supérieur à celui de la DMM (figure 4.23 et 4.24) et cela à cause de l’augmentation des pièces qui se retrouvent dans le système (en traitement ou en attente).

Taux de création des pièces (1/min)	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5	
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	81,94	87,83	101,63	155,89	203,37	204,70	207,22	204,21
	DMM	81,30	88,12	102,16	153,74	187,85	176,59	186,30	187,27

Tableau 4.7 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 2.

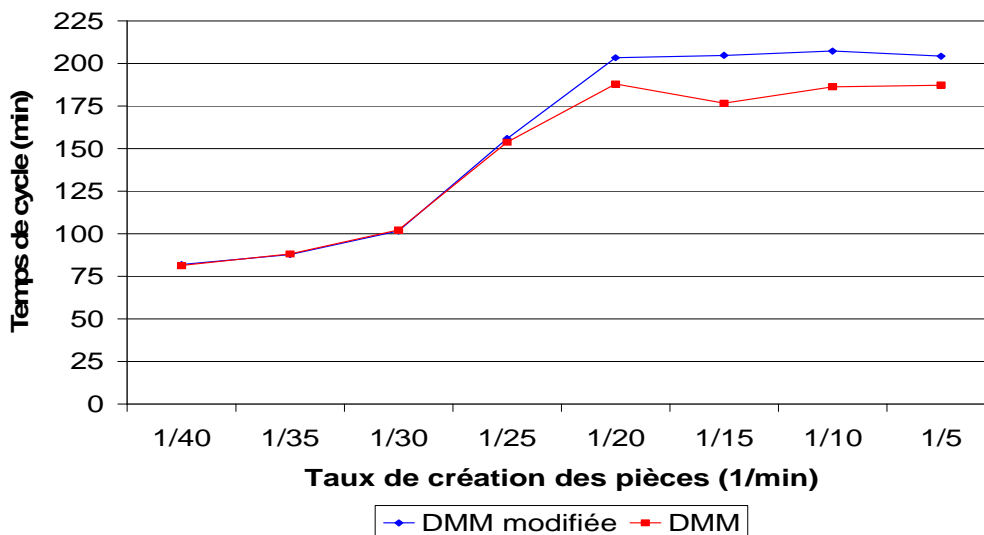


Figure 4.19 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5	
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	82,02	86,63	98,07	130,04	309,85	310,4	309,95	311,81
	DMM	82,03	86,69	98,07	129,99	245,21	247,23	231,06	246,35

Tableau 4.8 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 4.

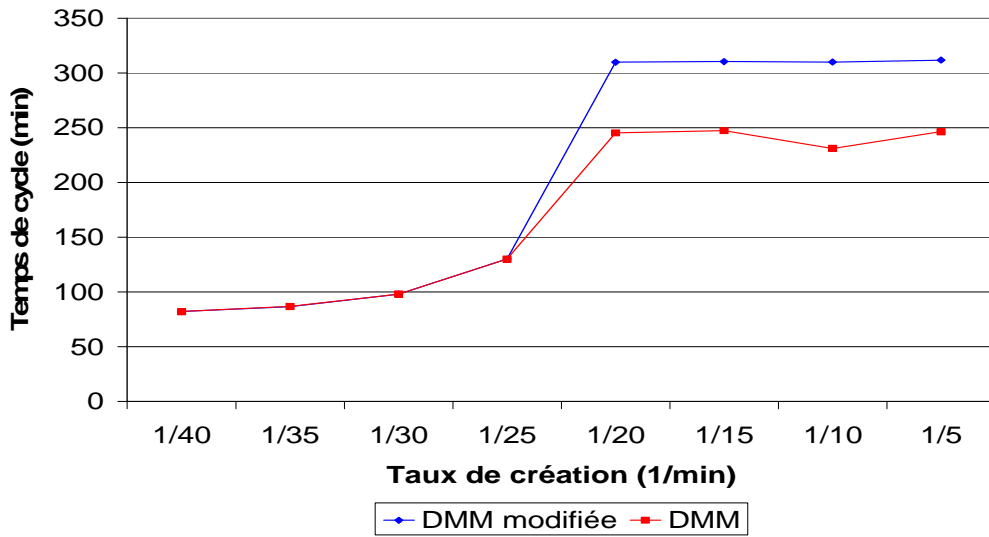


Figure 4.20 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 4.

Taux de création des pièces (1/min)	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5	
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	81,26	86,6	97,57	126,86	416,76	416,76	414,76	414,39
	DMM	81,26	86,67	97,65	127,23	276,95	279,26	269,96	283,97

Tableau 4.9 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 6.

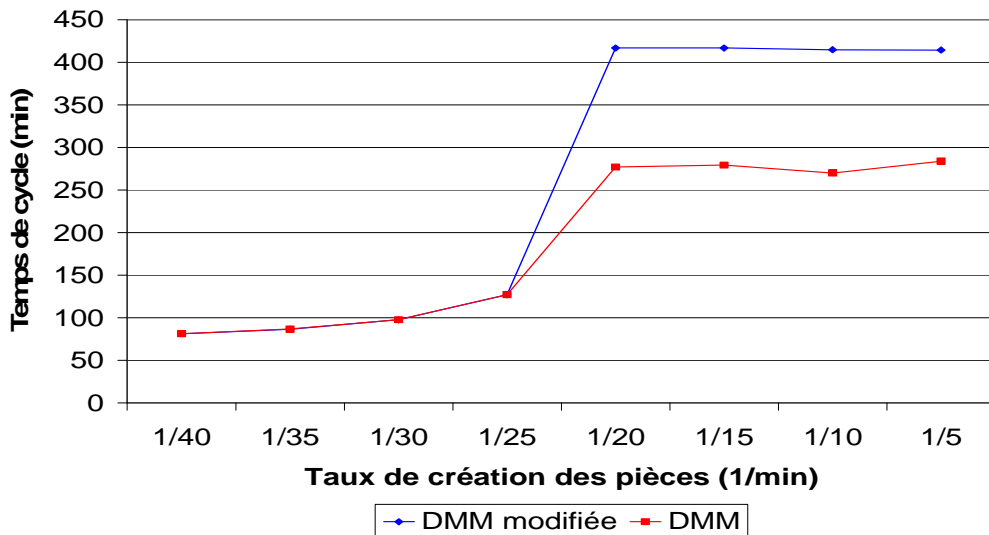


Figure 4.21 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 6.

Taux de création des pièces (1/min)	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5	
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	81,26	86,6	97,53	126,15	519,36	521,46	521,21	532,82
	DMM	81,26	86,67	97,7	125,87	319,23	310,91	311,4	321,33

Tableau 4.10 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 8.

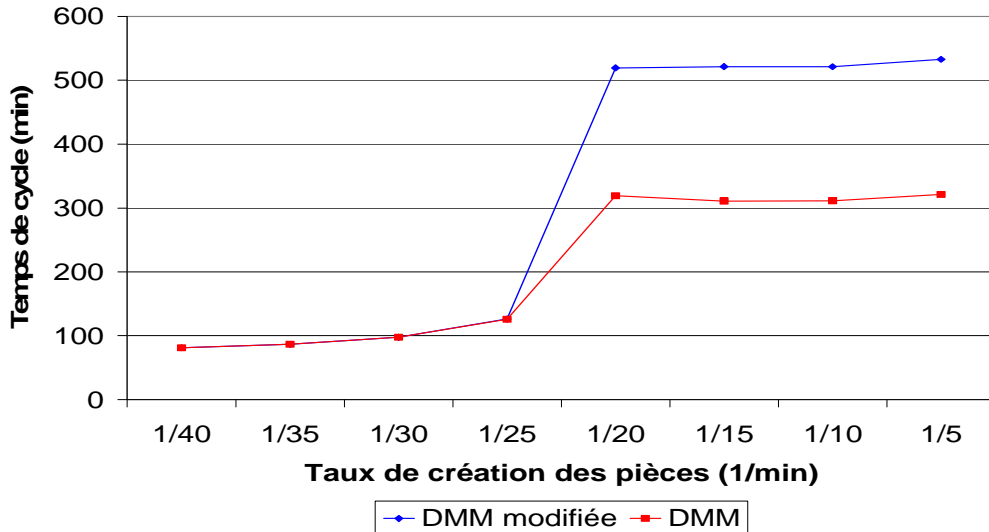


Figure 4.22 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 8.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	207,22	309,95	414,76	520,97
	DMM	186,30	231,06	269,96	311,4

Tableau 4.11 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

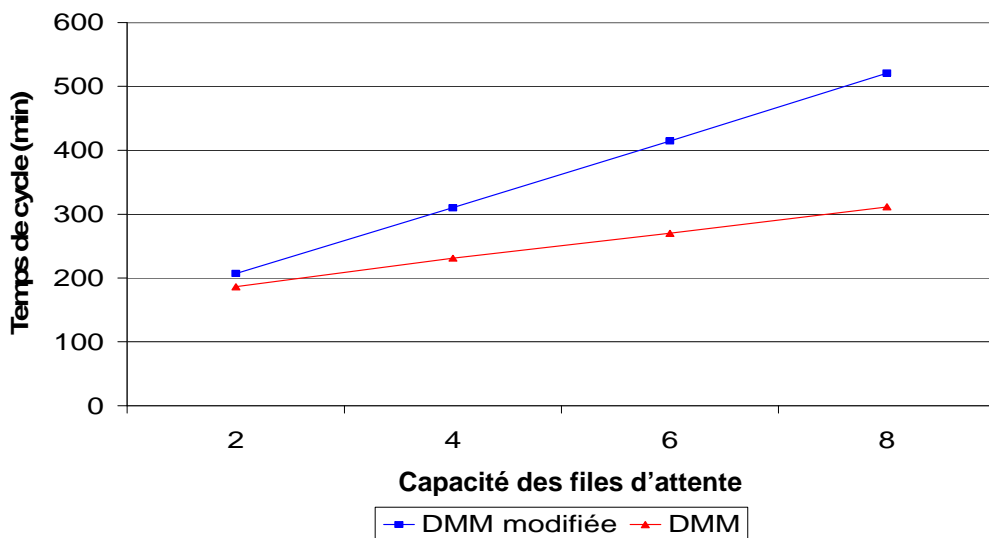


Figure 4.23 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	203,37	309,85	416,76	519,36
	DMM	187,85	245,21	276,95	319,23

Tableau 4.12 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

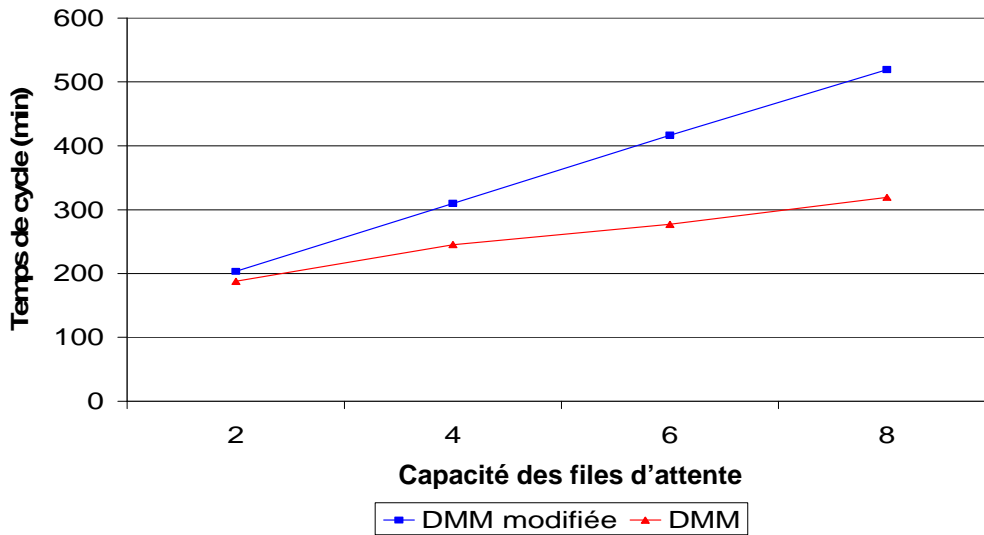


Figure 4.24 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.3.3 Les en-cours :

Le paragraphe suivant va être consacré au en-cours (pièces qui restent dans le système).

Les figures 4.25 et 4.26 montrent que si le taux de création des pièces est supérieur à 1/30, le nombre de pièces qui sont restées dans le système de la méthode DMM modifiée est supérieur à celui de la méthode DMM. L'augmentation des en-cours pour la méthode DMM modifiée est due au nombre élevé de pièces qui entrent dans le système et au taux de production élevé.

Les deux figures (4.27 et 4.28) présentent aussi l'augmentation des en-cours pour la méthode DMM modifiée par rapport à la méthode DMM, si nous augmentons les capacités des files d'attente.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	3,6	2,6	3,4	6,4	8,8	9,1	8,1	8,6
	DMM	3,5	1,8	4,8	1,2	0	1,3	0,7	0

Tableau 4.13 : Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2.

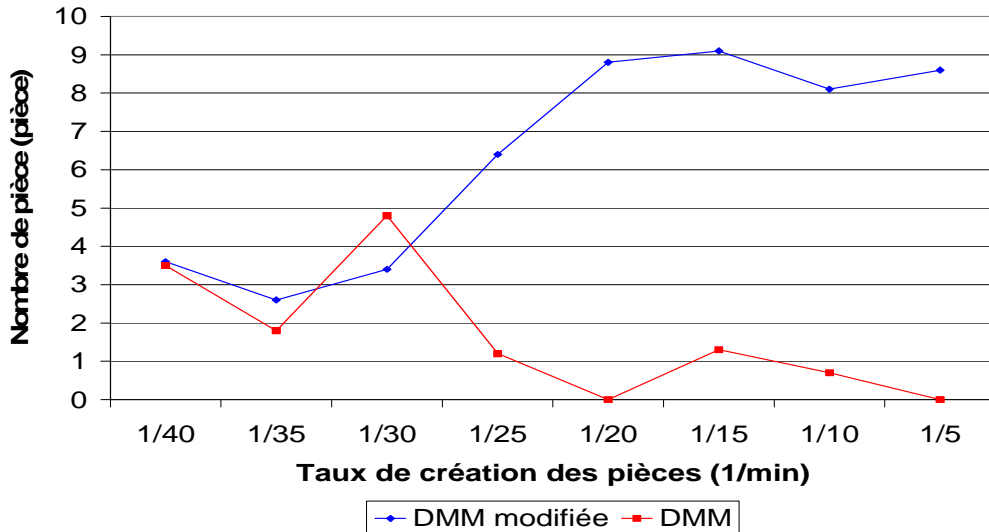


Figure 4.25 : Les en-cours pour une capacité de file d’attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	2,8	2,6	5,3	5,1	21,3	19,8	20,1	19
	DMM	2,8	2,2	3,7	6,4	9,4	5,1	4,4	4

Tableau 4.14 : Les en-cours pour une capacité de file d’attente = 6.

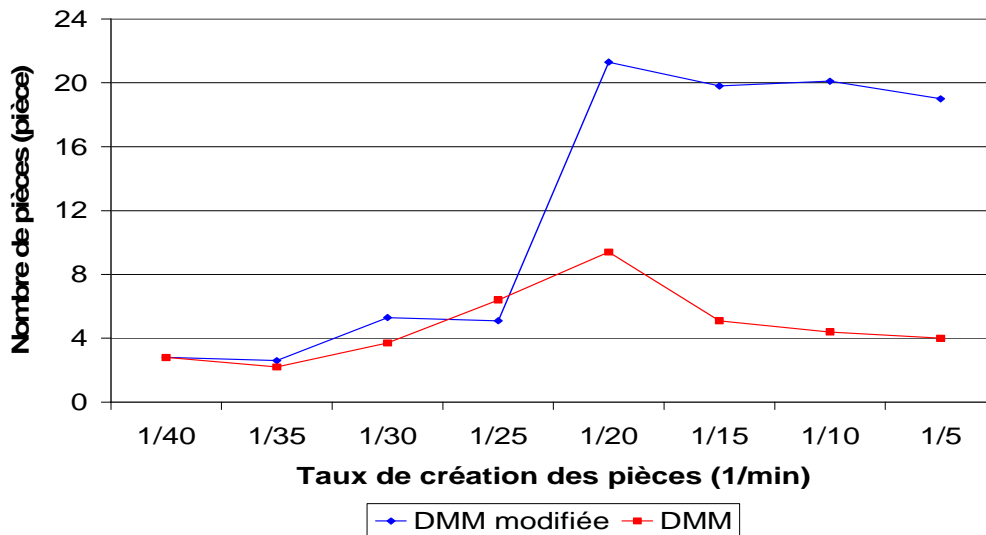


Figure 4.26 : Les en-cours pour une capacité de file d’attente = 6.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	8,1	13,4	20,1	23,1
	DMM	0,7	2,6	4,4	10,7

Tableau 4.15 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

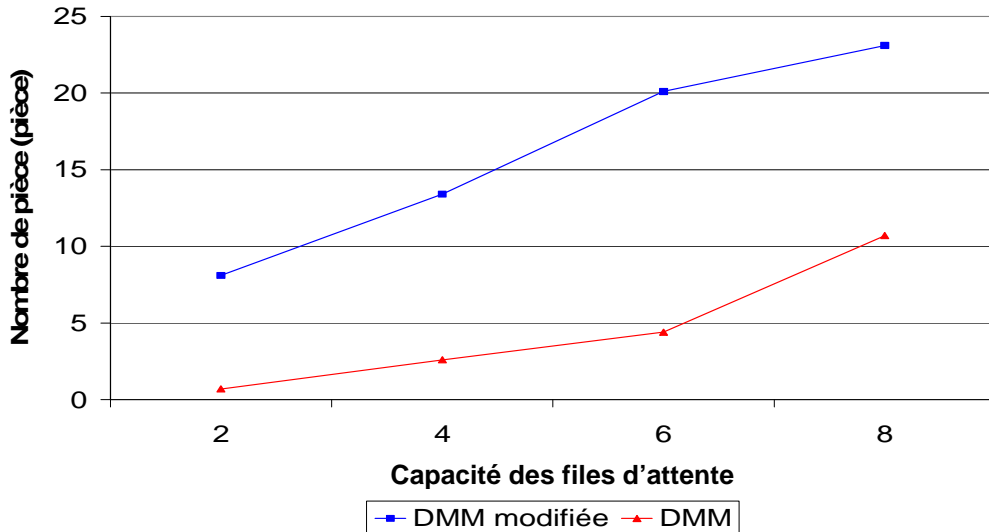


Figure 4.27 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	8,8	14,1	21,3	25,8
	DMM	0	2	9,4	14,1

Tableau 4.16 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

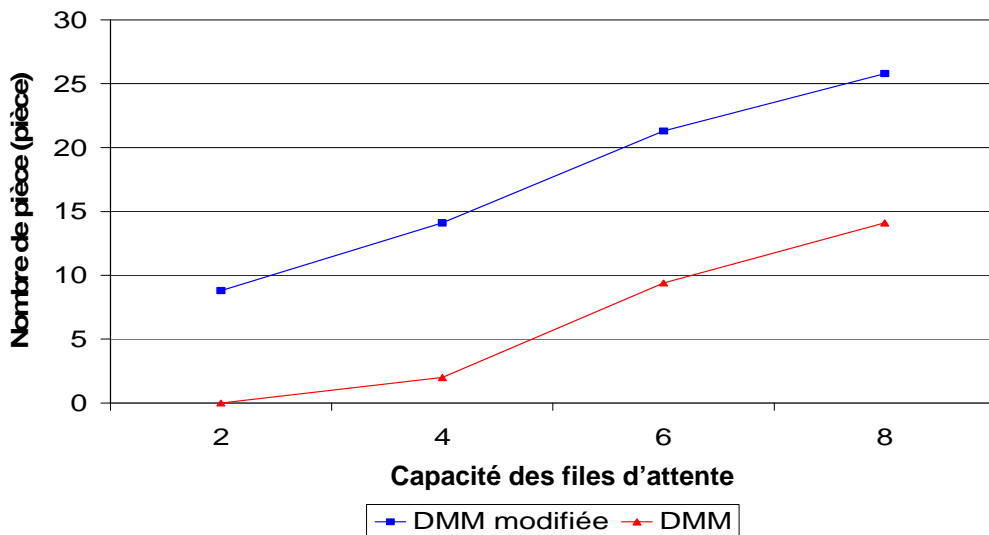


Figure 4.28 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.3.4 Taux d'utilisation des machines :

Le taux d'utilisation des machines est un critère très important dans la mesure des performances d'un système de production, les courbes des figures 4.29 et 4.30 nous donnent le taux d'utilisation moyen des machines FV1 et FV2. Nous pouvons bien remarquer que le taux

d'utilisation des fraiseuses verticales est plus élevé pour la DMM modifiée, pour un taux de création des pièces supérieur à 1/25.

Le taux d'utilisation pour les machines T1 et T2 est plus important pour la DMM modifiée que pour la DMM pour un taux de création important (supérieur à 1/25) (voir les figures 4.31 et 4.32).

Le taux d'utilisation de la toupie (voir les figures 4.33 et 4.34) est plus faible dans la méthode DMM que celui dans la Méthode DMM modifiée pour des taux de création supérieur à 1/25 pour les autres taux de création les taux d'utilisation sont pratiquement égaux.

Les machines FH1 et FH2 sont aussi moins utilisées dans la méthode DMM que dans la DMM modifié toujours pour des taux de création supérieur à 1/20 (voir les figures de 4.35 à 4.36).

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	12,70	14,61	16,99	20,32	21,65	17,52	21,13	21,58
	DMM	12,69	14,58	17,04	16,65	6,26	10,98	7,88	9,08

Tableau 4.17 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2.

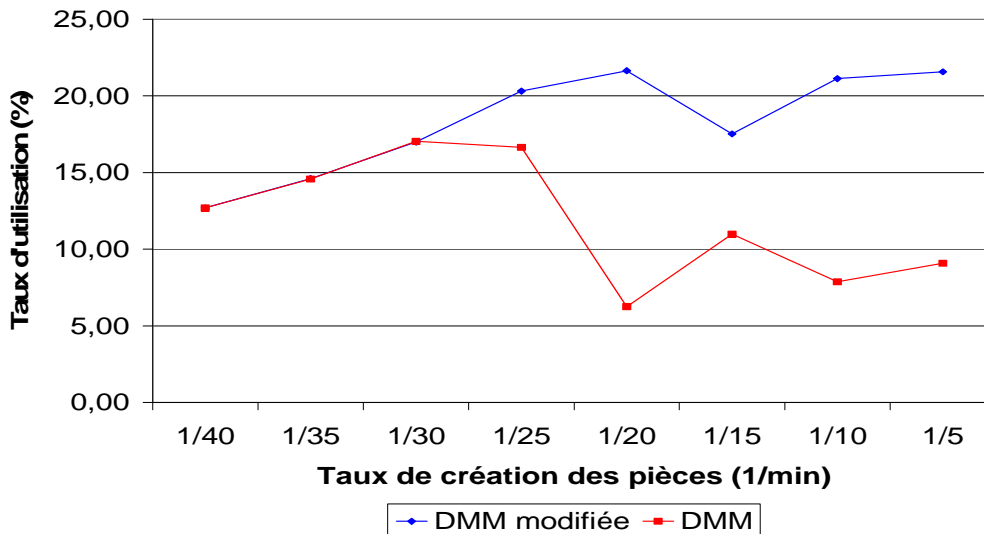


Figure 4.29 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	12,67	14,57	17,03	20,33	23,73	23,72	23,84	23,82
	DMM	12,68	14,57	17,04	20,39	23,46	18,03	20,92	18,74

Tableau 4.18 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 6.

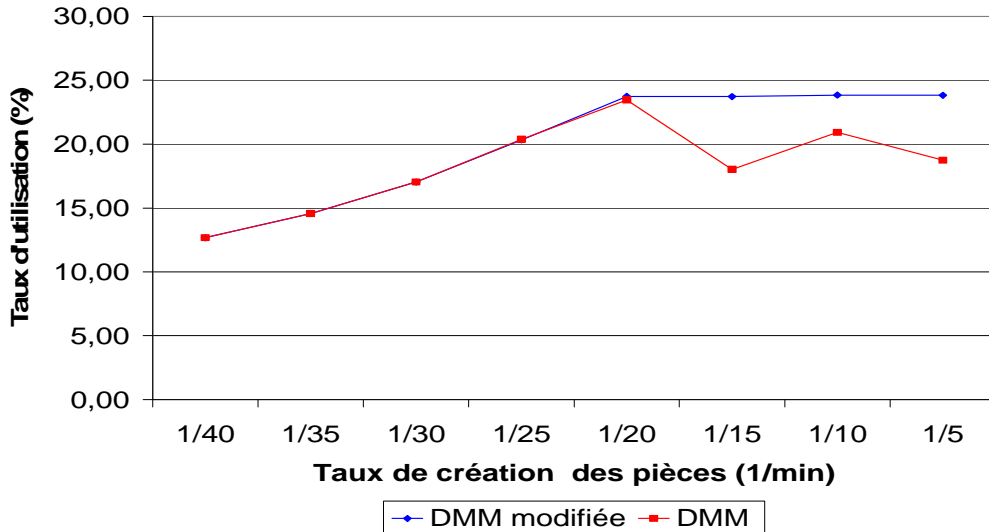


Figure 4.30 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 6.

Taux de création des pièces (1/min)	1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5	
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	49,97	56,94	66,59	79,85	84,52	82,72	83,58	84,70
	DMM	49,94	57,00	66,56	65,05	24,62	42,59	30,90	35,50

Tableau 4.19 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2.

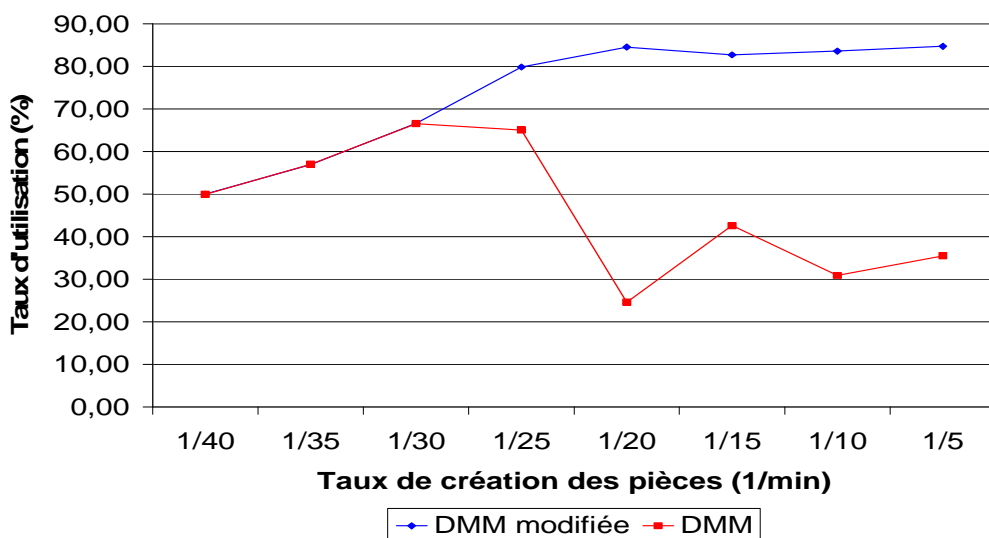


Figure 4.31 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	49,97	56,97	66,61	79,93	92,80	92,88	93,14	93,37
	DMM	49,96	56,98	66,62	79,99	91,72	71,00	82,46	73,54

Tableau 4.20 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 6.

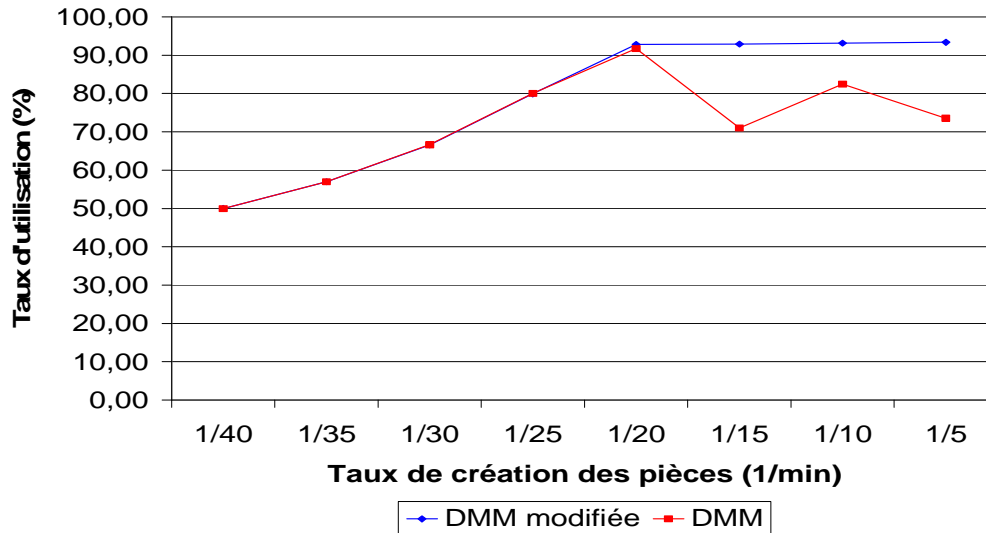


Figure 4.32 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 6.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	1,46	1,69	2,09	3,82	5,35	8,60	6,06	5,57
	DMM	1,45	1,68	2,09	2,79	1,25	2,03	1,60	1,91

Tableau 4.21 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2.

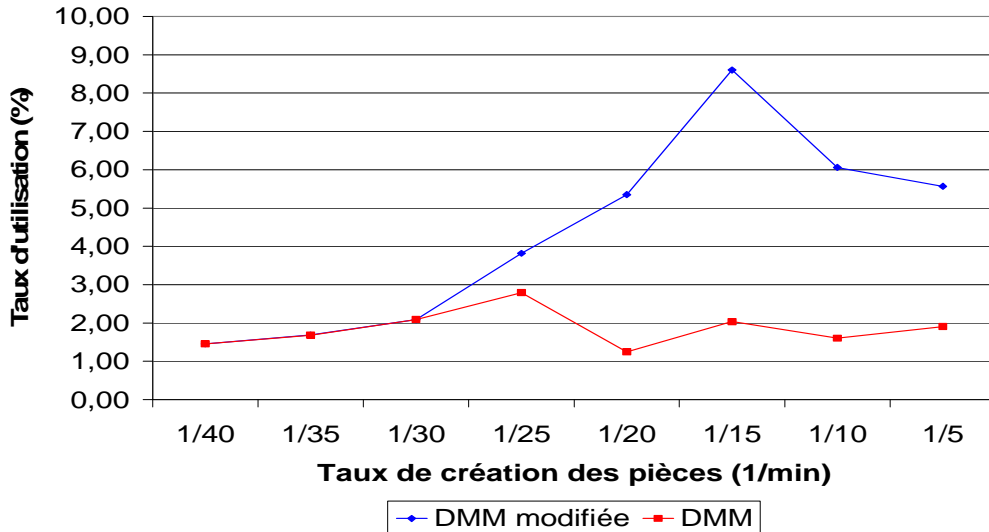


Figure 4.33 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	1,45	1,66	1,93	2,32	2,73	2,73	2,74	2,75
	DMM	1,45	1,66	1,94	2,32	2,67	2,07	2,41	2,14

Tableau 4.22 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 6.

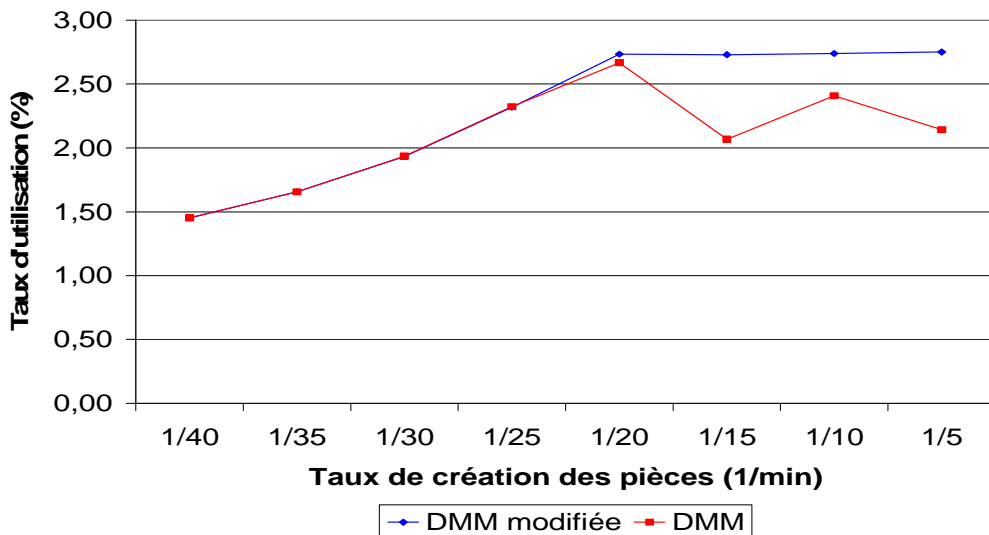


Figure 4.34 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 6.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	18,05	20,61	23,96	28,63	30,34	29,15	30,16	30,40
	DMM	18,07	20,61	23,94	23,46	8,87	15,33	11,11	12,78

Tableau 4.23 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2.

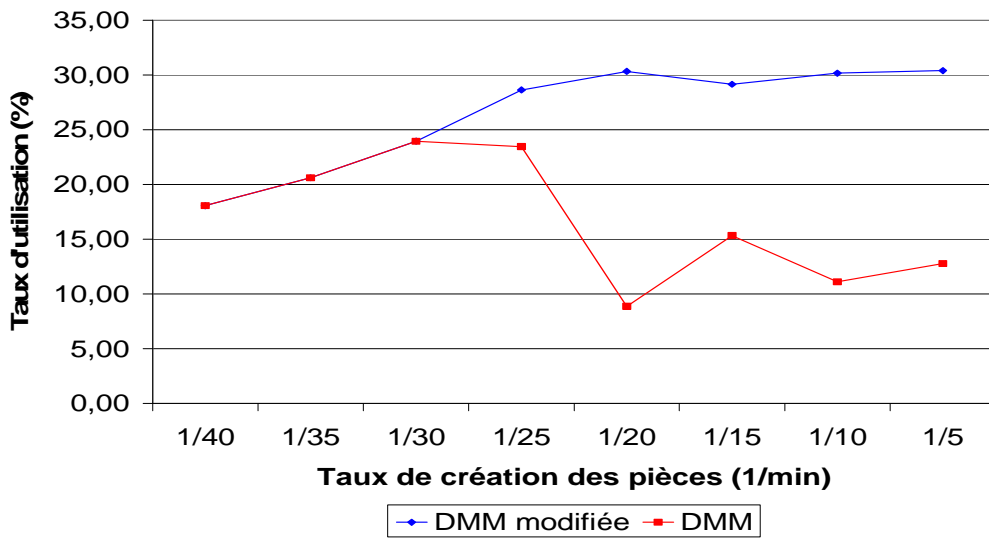


Figure 4.35 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	18,06	20,63	24,04	28,94	33,51	33,46	33,66	33,72
	DMM	18,06	20,63	24,08	28,81	33,17	25,62	29,85	26,64

Tableau 4.24 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 6.

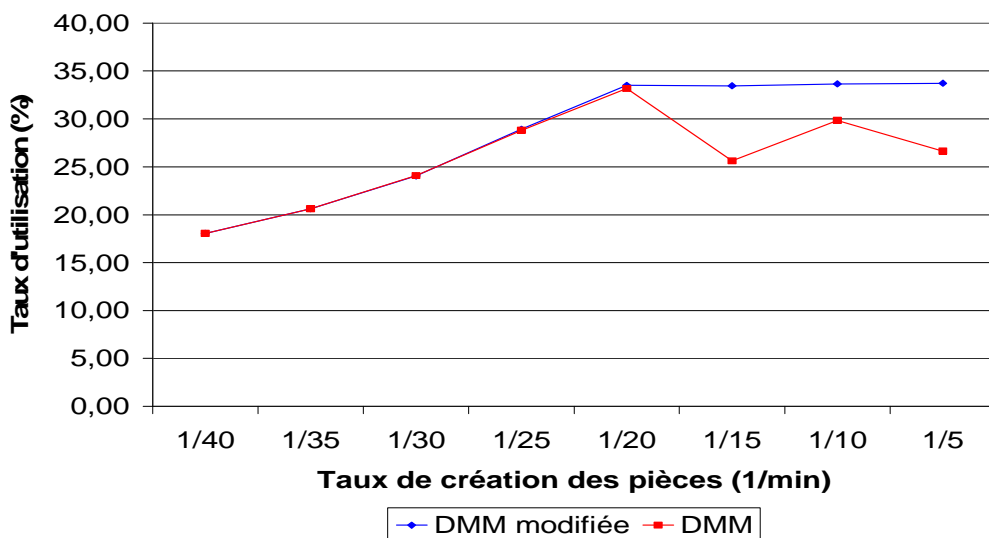


Figure 4.36 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 6.

Pour cette partie, on peut dire que le taux d'utilisation de toutes les machines est plus important pour la méthode DMM modifiée que pour la méthode DMM pour des files d'attente de taille inférieure à 6 (voir les figures de 4.37 à 4.44). Cela peut s'expliquer par le fait que le taux de production est plus important pour la DMM modifiée.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	21,13	23,15	23,84	24,05
	DMM	7,88	16,83	20,92	24,18

Tableau 4.25 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

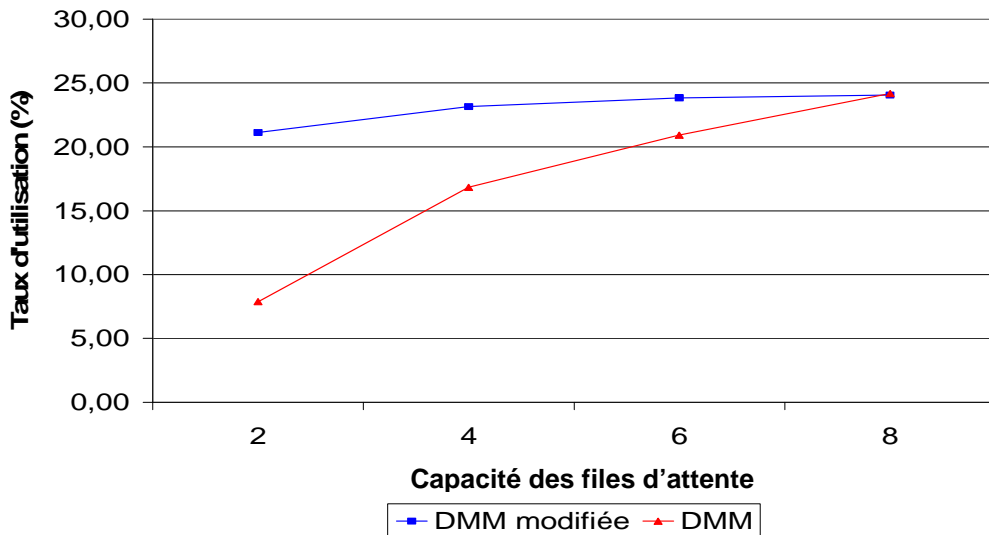


Figure 4.37 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	21,65	23,1	23,73	23,96
	DMM	6,26	14,78	23,46	24,3

Tableau 4.26 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

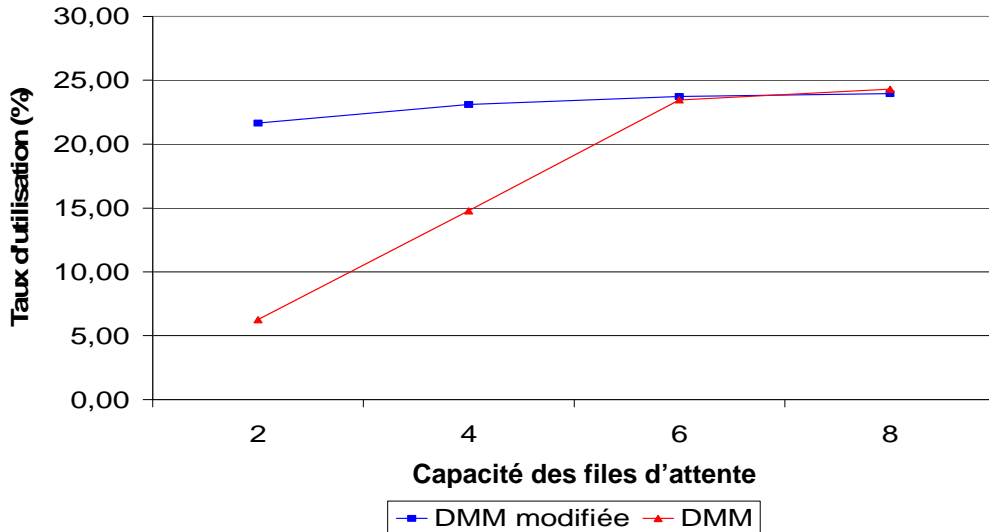


Figure 4.38 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	83,58	90,48	93,14	94,29
	DMM	30,9	66,09	82,46	94,35

Tableau 4.27 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

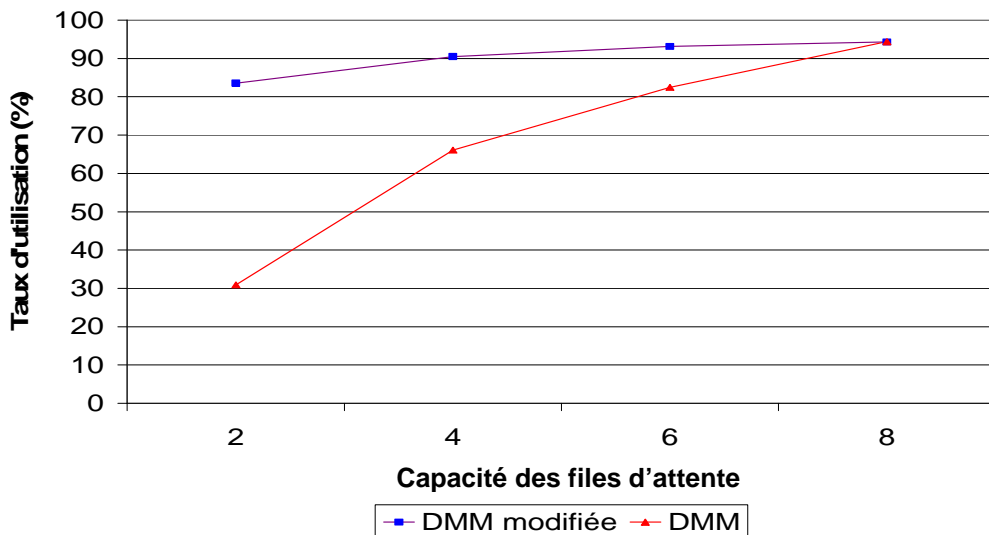


Figure 4.39 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	84,52	90,41	92,8	94,01
	DMM	24,62	57,74	91,72	95,5

Tableau 4.28 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

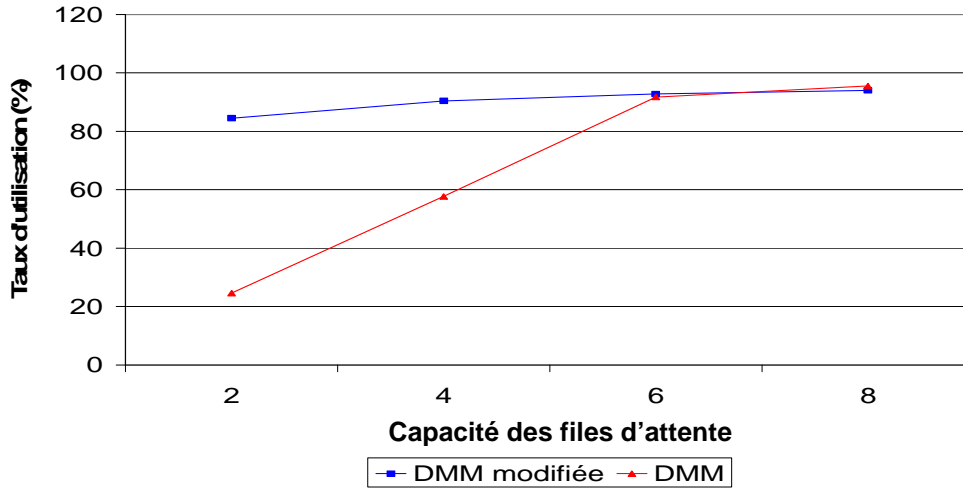


Figure 4.40 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

333

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	6,06	2,95	2,74	2,74
	DMM	1,60	1,99	2,41	2,74

Tableau 4.29 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

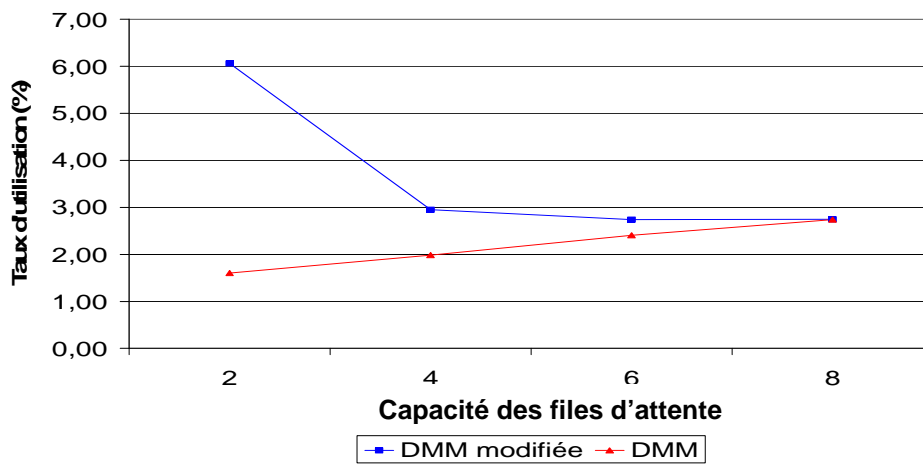


Figure 4.41 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	5,35	2,92	2,73	2,74
	DMM	1,25	1,75	2,67	2,78

Tableau 4.30 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

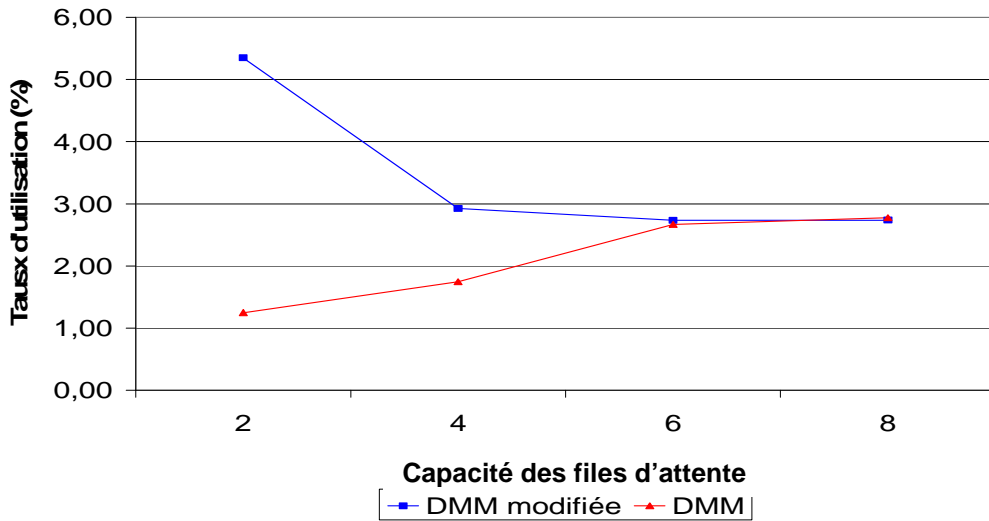


Figure 4.42 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	30,16	32,8	33,66	34,05
	DMM	11,11	23,89	29,85	34,11

Tableau 4.31 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

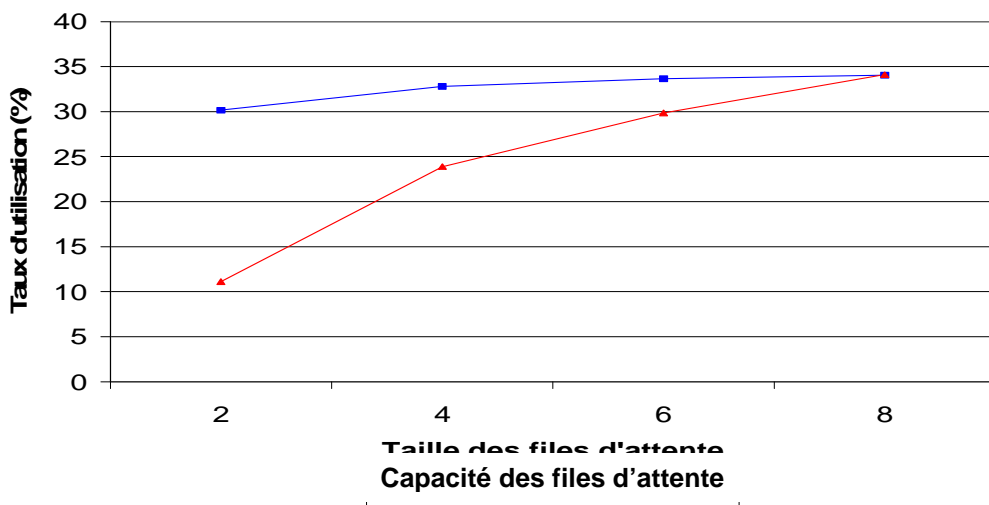


Figure 4.43 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	30,34	32,57	33,51	33,84
	DMM	8,87	20,83	33,17	34,55

Tableau 4.32 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

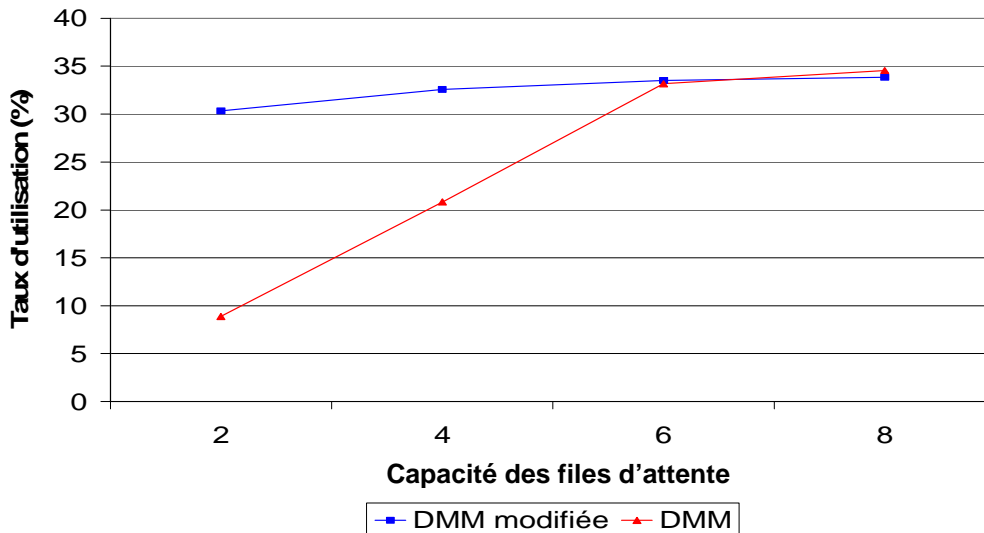


Figure 4.44 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.3.5 Taux d'utilisation de l'AGV :

Dans cette partie nous avons illustré les taux d'utilisation de l'AGV, les figures 4.45 et 4.46 montrent que l'utilisation de l'AGV est plus importante pour la méthode DMM modifiée pour des taux de création supérieur à 1/25.

Les figures 4.47 et 4.48 nous montrent que l'utilisation de l'AGV est plus élevée pour la méthode DMM modifiée pour des files d'attente plus ou moins petite.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	14,98	17,46	21	27,31	30,26	29,16	30,19	30,44
	DMM	15	17,4	20,93	21,67	8,43	14,35	10,55	12,08

Tableau 4.33 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

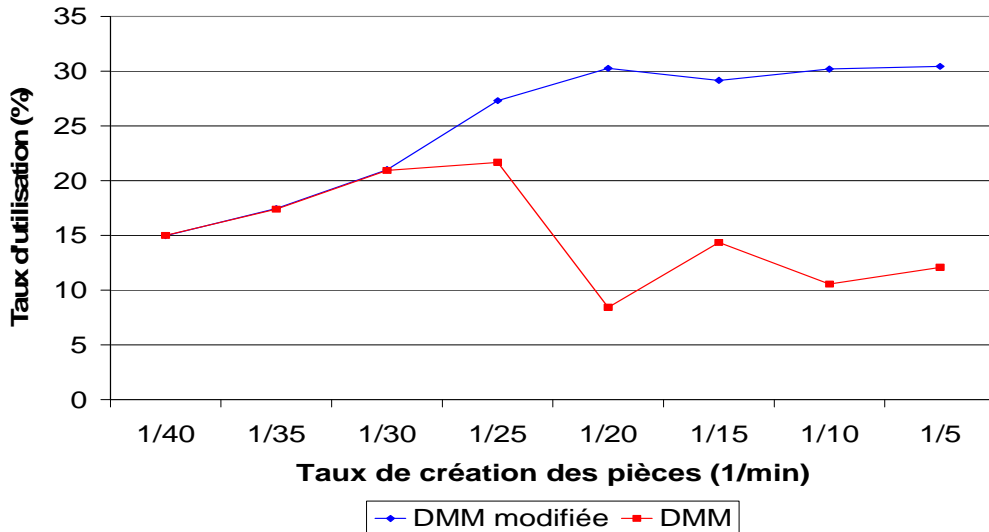


Figure 4.45 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	15	17,49	20,84	25,62	33,53	33,51	33,56	33,64
	DMM	15	17,48	20,76	25,62	30,67	23,75	27,63	24,68

Tableau 4.34 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 6.

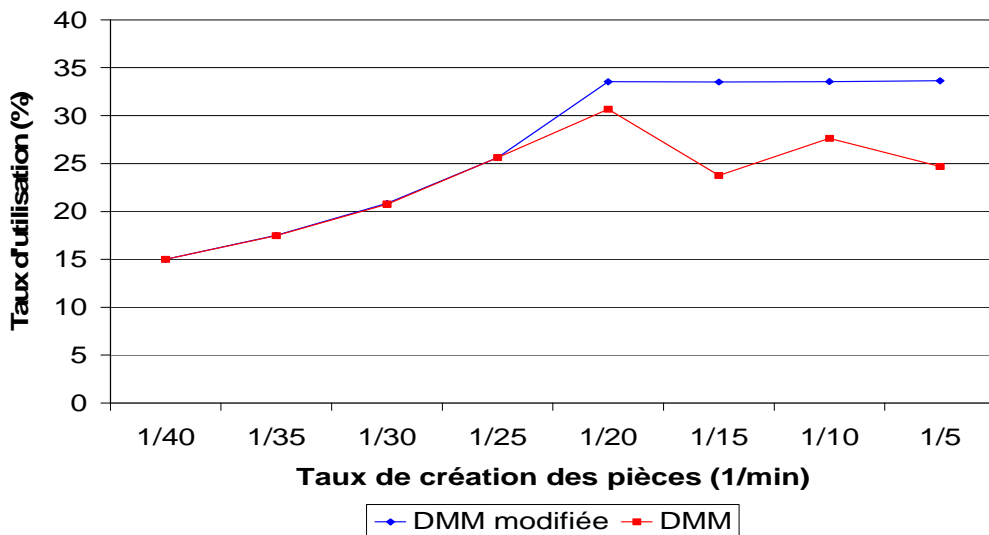


Figure 4.46 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 6.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	30,19	32,57	33,56	34,01
	DMM	10,55	22,05	27,63	31,23

Tableau 4.35 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

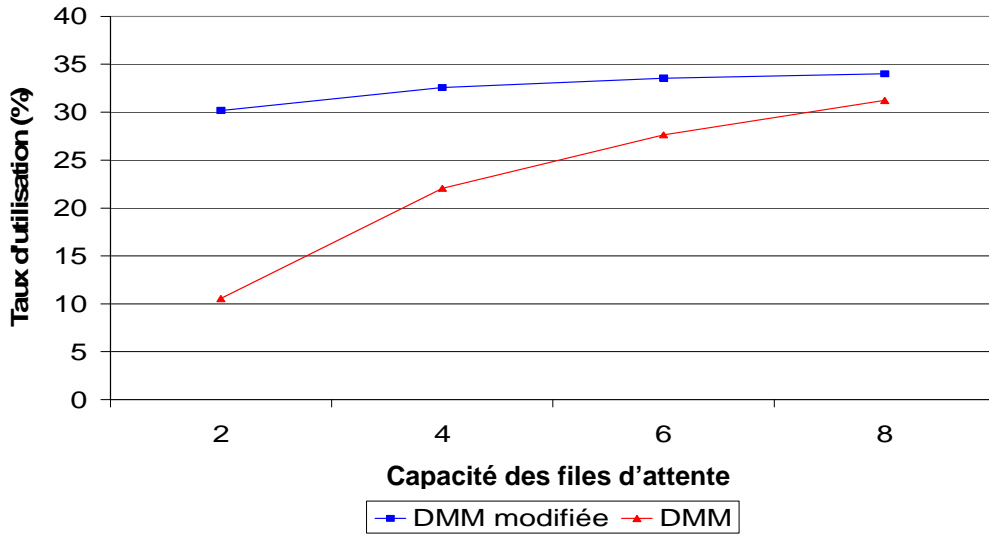


Figure 4.47 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/10 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	30,26	32,46	33,53	34,03
	DMM	8,43	19,56	30,67	31,69

Tableau 4.36 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

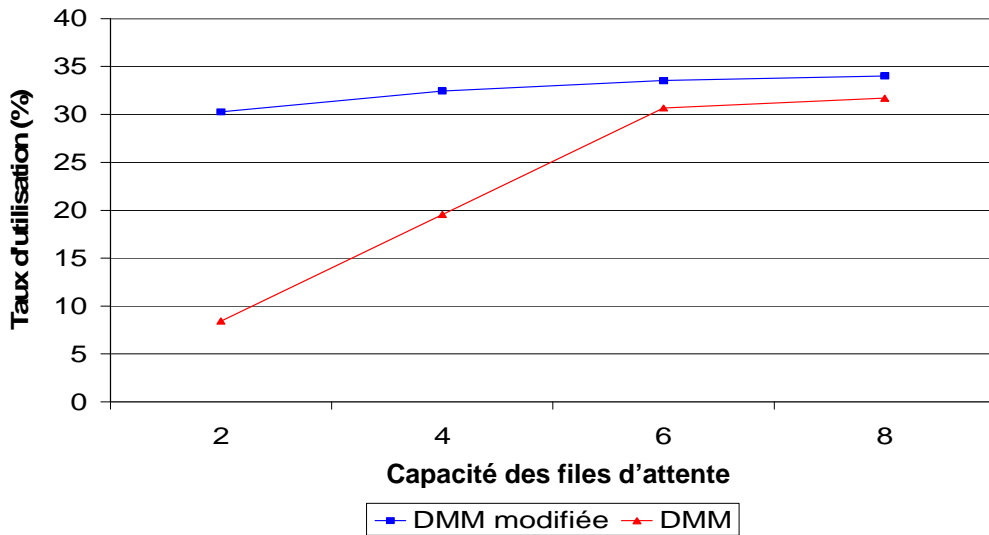


Figure 4.48 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.4 Etude comparative entre la règle DMM et la règle DMM modifiée avec introduction de pannes:

Dans cette partie de ce chapitre nous allons donner les résultats et les interprétations de l'étude comparative entre la règle DMM et la règle DMM modifiée présentés déjà dans le paragraphe précédent, avec l'introduction de pannes.

Les pannes sont introduites sur les ressources toutes les 100 heures. La panne va durer 2 heures suivant une loi exponentielle.

4.4.1 Taux de production :

La simulation du système en introduisant des pannes, nous montre que le taux de production pour la règle DMM modifiée est nettement supérieur à celui de la règle DMM pour un taux de création supérieur ou égale à 1/25 et avec une capacité de file d'attente égale à 2 (voir figure 4.49).

La figure 4.50 nous montre que le taux de production pour une file d'attente inférieure ou égale à 4 est plus important pour la règle DMM modifiée par rapport à la règle DMM.

De ces résultats nous pouvons constater que le taux de production en utilisant la règle DMM modifiée est plus important que celui en utilisant la règle DMM pour des files d'attente petites et des taux de création élevés. Donc le taux de production d'un système saturé est plus élevé pour la DMM modifiée même avec la présence de pannes.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	99,99	99,97	99,62	85,02	66,70	50,91	34,29	17,04
	DMM	99,99	99,97	99,95	53,07	32,46	29,29	15,43	8,55

Tableau 4.37 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

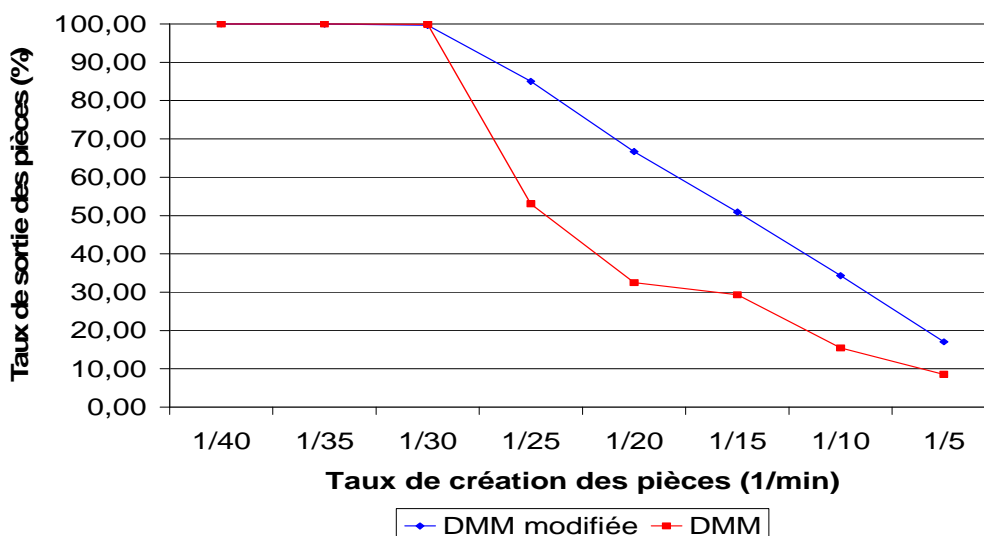


Figure 4.49 : Taux de sortie des pièces pour une capacité de file d'attente = 2.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux de sortie des pièces (%)	DMM modifiée	66,70	90,6	93,11	94,24
	DMM	32,46	76,07	91,94	95,69

Tableau 4.38 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

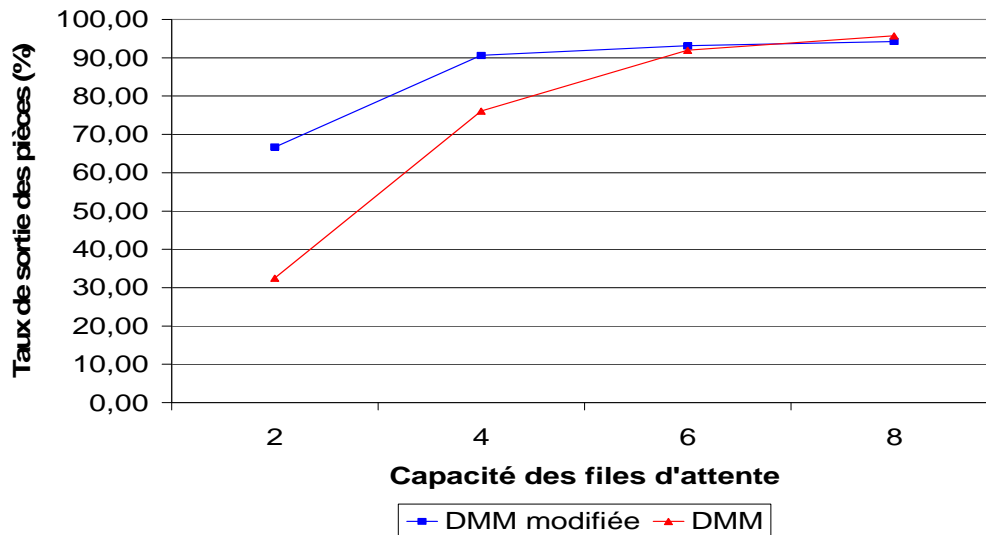


Figure 4.50 : Taux de sortie des pièces pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.4.2 Temps de cycle:

D'après les résultats illustrés dans les figures 4.51 et 4.52, nous remarquons que le temps de cycle de la DMM modifiée est plus important que celui de la DMM pour un taux de création de pièces supérieur à 1/30. Ces résultats sont dues aux :

- Taux de production élevé pour la DMM modifiée.
- Taux d'utilisation des machines élevé pour la DMM modifiée par rapport à la DMM.
- Pannes qui surviennent chaque 100 heures et qui durent 2 heures.

Tous ces critères cités dessus vont augmenter le temps de cycle, puisque les pièces vont rester plus de temps dans le système.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	91,10	99,13	119,99	325,16	353,34	346,81	339,85	341,13
	DMM	91,35	101,65	120,91	185,32	203,79	193,81	199,65	203,07

Tableau 4.39 : Temps de cycle pour une capacité de file d'attente = 2.

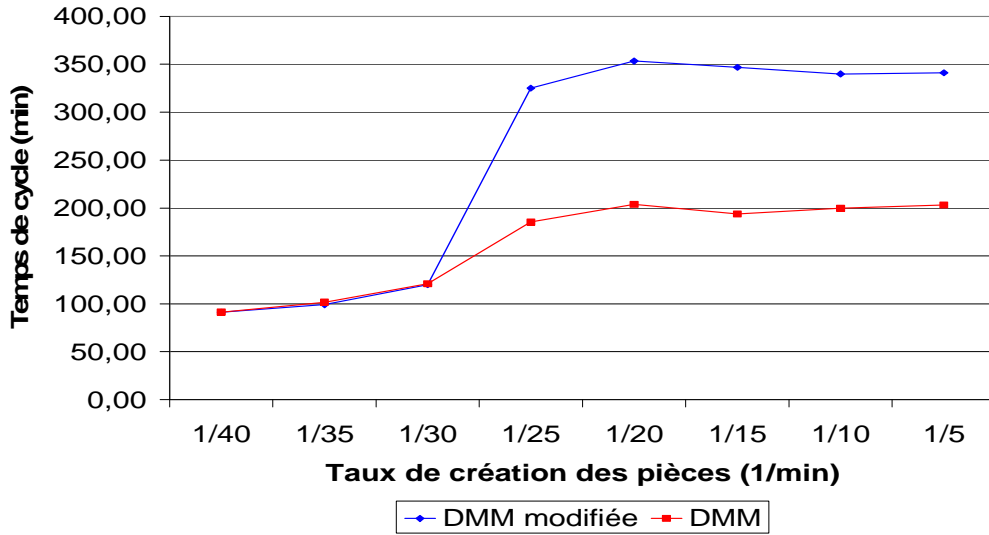


Figure 4.51 : Temps de cycle pour une capacité de file d’attente = 2.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Temps de cycle (min)	DMM modifiée	353,34	309,84	414,32	519,36
	DMM	203,79	239,49	276,95	319,23

Tableau 4.40 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

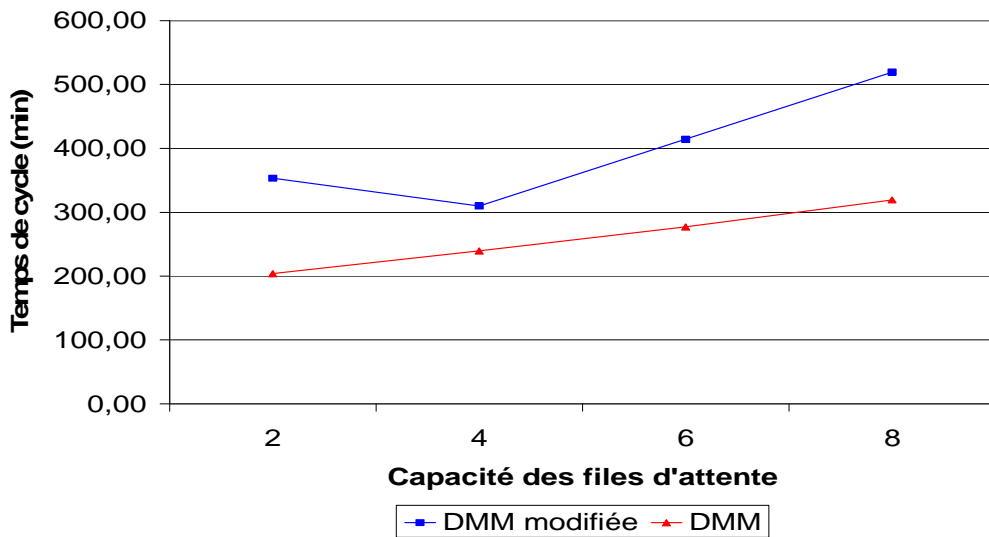


Figure 4.52 : Temps de cycle pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.4.3 Les en-cours :

Le nombre de pièces qui restent dans le système est plus grand pour la règle DMM modifiée vis-à-vis de la règle DMM, cela est expliqué par l'augmentation de l'utilisation des machines et la présence importante des pièces dans le système lors de l'utilisation de la règle DMM modifiée (voir figure 4.53 et 4.54).

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	2,80	3,40	6,90	19,10	15,80	10,30	13,70	10,10
	DMM	2,70	2,80	3,70	0,60	0,40	0,40	0,30	0,00

Tableau 4.41 : Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2.

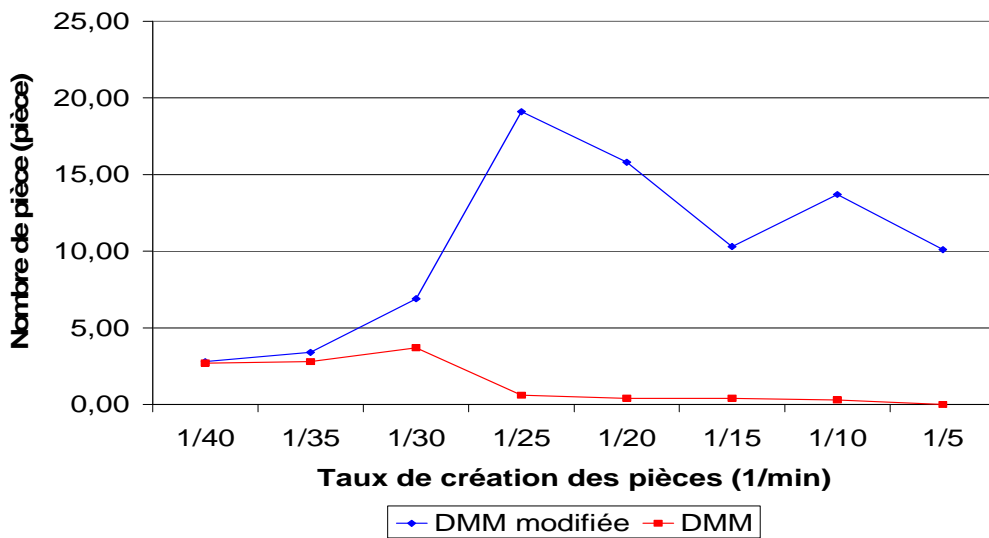


Figure 4.53 : Les en-cours pour une capacité de file d'attente = 2.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Nombre de pièce (pièce)	DMM modifiée	15,80	14,10	21,30	25,80
	DMM	0,40	3,90	9,40	14,10

Tableau 4.42 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

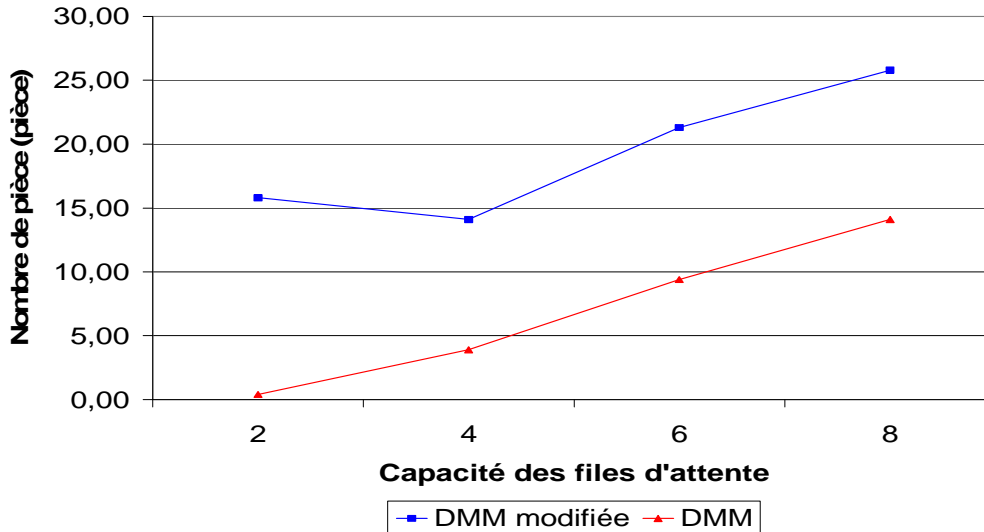


Figure 4.54 : Les en-cours pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.4.4 Taux d'utilisation des machines :

Comme nous pouvons bien le remarquer sur les figures (4.55 à 4.58), avec un taux de création de pièces supérieur à 1/30, le taux d'utilisation des machines est toujours plus important en utilisant la règle DMM modifiée. Les figures (4.59 à 4.62), nous montrent que pour une capacité de files d'attente inférieure à 6 pièces, les machines sont moins utilisées en employant la règle DMM. Ce qui nous ramène à dire que l'utilisation de la règle DMM modifiée augmente l'utilisation des machines pour des systèmes saturés.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	12,79	14,67	16,89	17,35	17,06	17,25	17,50	17,33
	DMM	12,66	14,56	16,99	10,86	8,23	9,91	7,96	8,72

Tableau 4.43 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2.

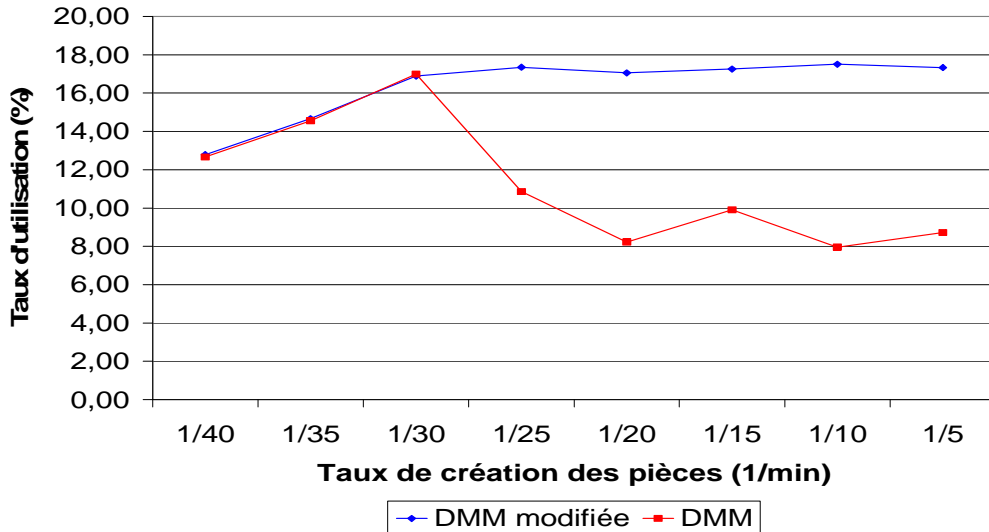


Figure 4.55 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	49,88	56,94	66,78	77,16	77,77	78,13	78,50	78,75
	DMM	49,96	57,23	66,81	42,71	33,02	39,30	31,21	34,83

Tableau 4.44 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2.

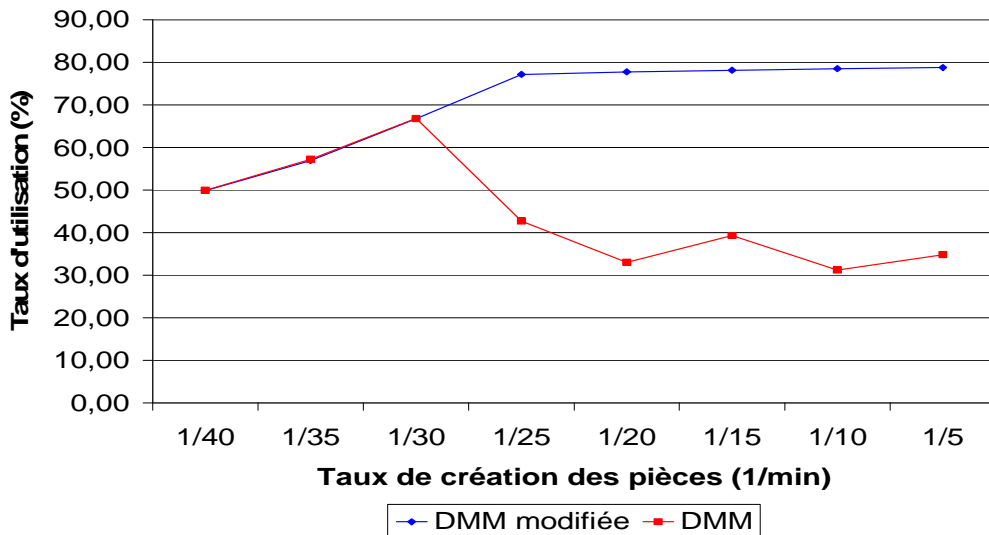


Figure 4.56 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	1,47	1,73	2,72	22,21	25,27	24,31	23,55	23,73
	DMM	1,48	1,77	2,56	2,98	2,88	2,79	2,28	3,01

Tableau 4.45 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2.

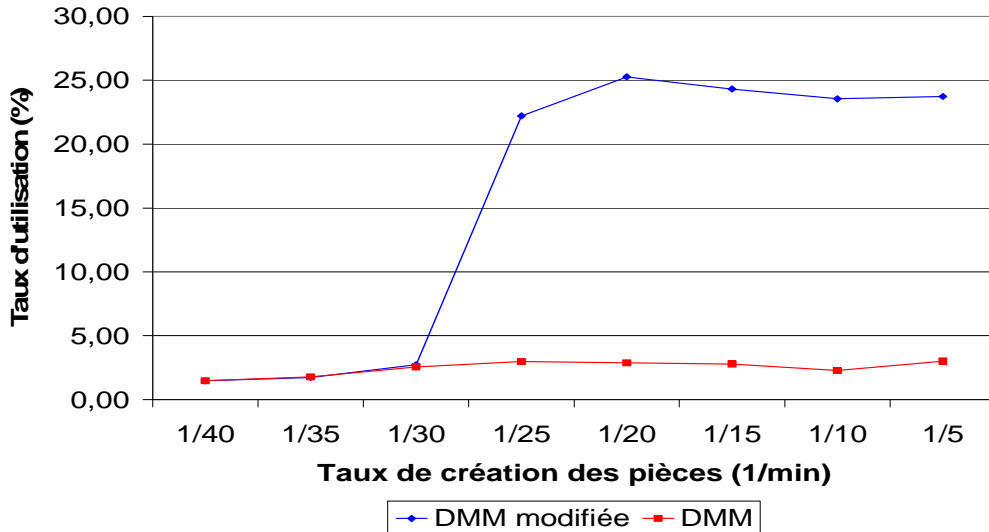


Figure 4.57 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour une capacité de file d'attente = 2.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	17,99	20,49	23,91	24,52	24,02	24,43	24,64	24,49
	DMM	18,08	20,58	23,95	15,31	11,67	14,10	11,11	12,29

Tableau 4.46 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2.

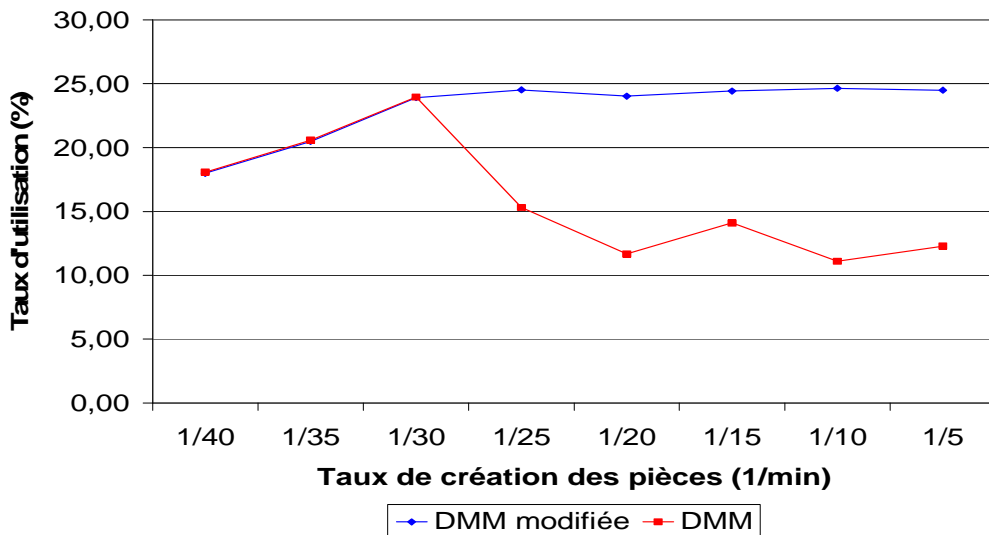


Figure 4.58 : Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour une capacité de file d'attente = 2.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 (%)	DMM modifiée	17,05	23,09	23,72	23,96
	DMM	8,22	19,53	23,46	24,3

Tableau 4.47 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

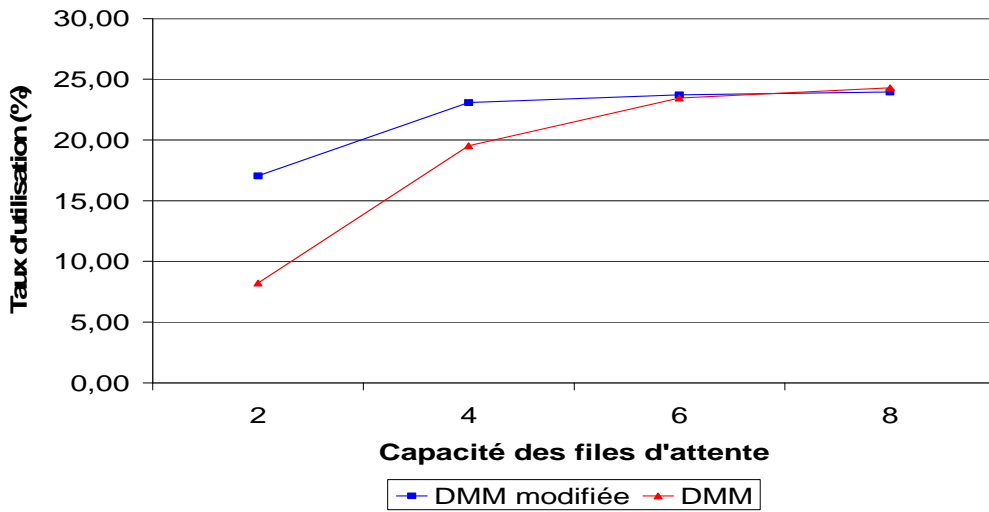


Figure 4.59 : Le taux d'utilisation des machines FV1 et FV2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines T1 et T2 (%)	DMM modifiée	77,76	90,41	92,79	94,01
	DMM	33,01	75,71	91,71	95,49

Tableau 4.48 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

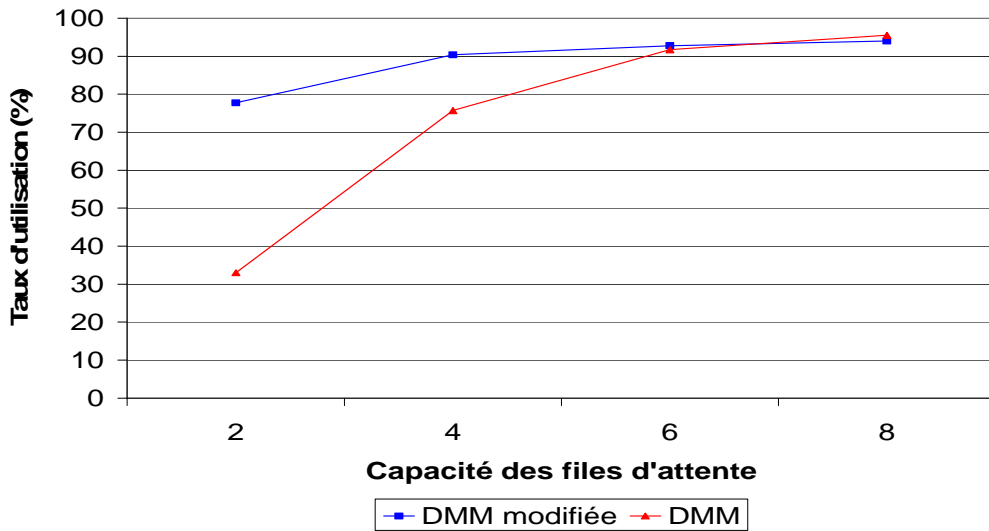


Figure 4.60 : Le taux d'utilisation des machines T1 et T2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de la machine TP (%)	DMM modifiée	25,27	2,92	2,73	2,73
	DMM	2,88	2,47	2,66	2,77

Tableau 4.49 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

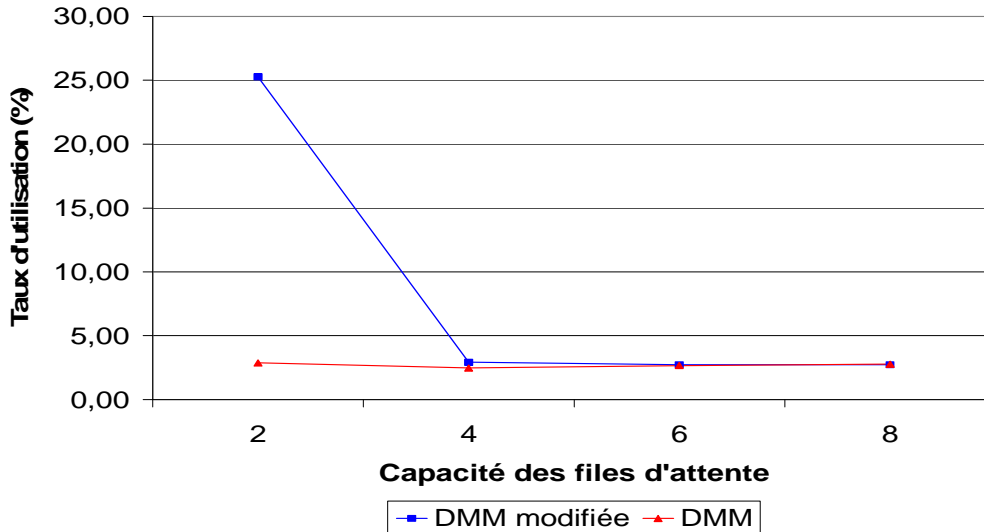


Figure 4.61 : Le taux d'utilisation de la machine TP pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 (%)	DMM modifiée	24,02	32,56	33,51	33,83
	DMM	11,66	27,35	33,16	34,55

Tableau 4.50 Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

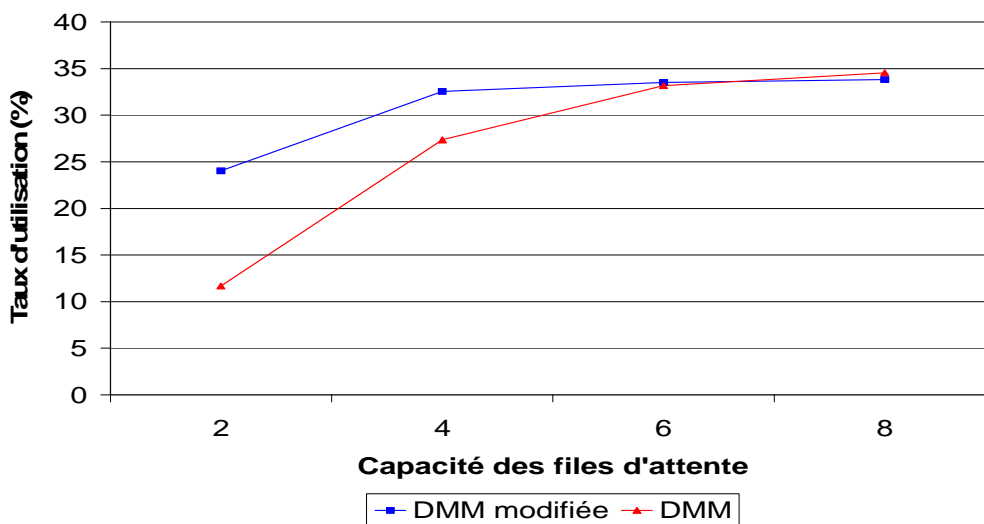


Figure 4.62 Le taux d'utilisation des machines FH1 et FH2 pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.4.5 Taux d'utilisation de l'AGV:

Les figures suivantes (4.63 et 4.64) nous montrent que pour un système saturé le taux d'utilisation de l'AGV est plus important pour la règle DMM modifiée même avec la présence de

pannes, cela est dû aux taux de production élevé et à l'augmentation de l'utilisation des machines dans la règle DMM modifiée.

Taux de création des pièces (1/min)		1/40	1/35	1/30	1/25	1/20	1/15	1/10	1/5
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	14,98	17,55	21,19	24,28	24,07	24,54	24,67	24,54
	DMM	15,00	17,61	21,06	14,20	10,94	12,98	10,41	11,59

Tableau 4.51 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

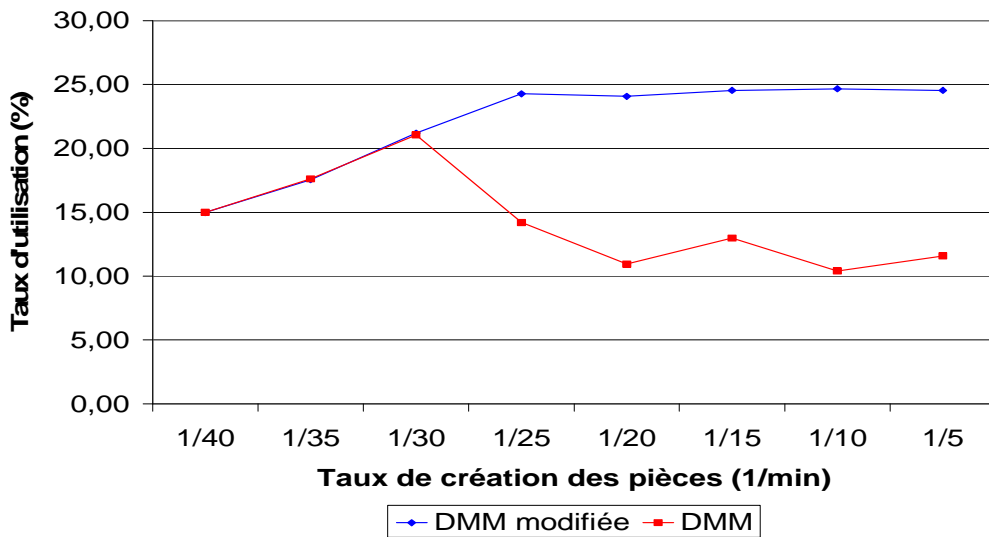


Figure 4.63 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour une capacité de file d'attente = 2.

Capacité des files d'attente		2	4	6	8
Taux d'utilisation de l'AGV (%)	DMM modifiée	24,07	32,46	33,58	34,08
	DMM	10,94	25,28	30,66	31,68

Tableau 4.52 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

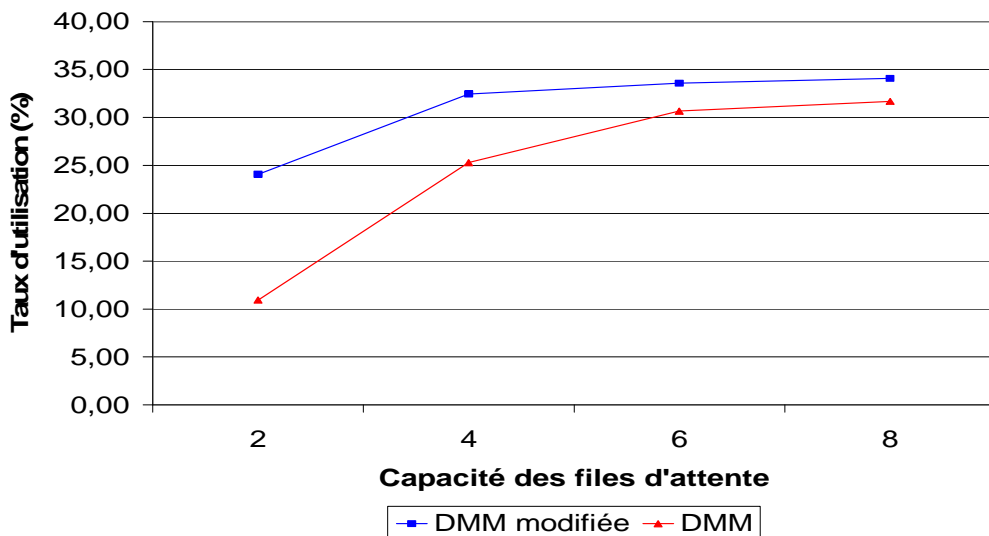


Figure 4.64 : Le taux d'utilisation de l'AGV pour un taux de création de pièce = 1/20 min.

4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre dans un premier temps nous avons présenté le modèle simulé par ARENA, en donnant les représentations des différentes stations utilisées. Ensuite nous avons donné les résultats et les interprétations obtenus des différentes simulations effectuées.

Les résultats obtenus ont tous montré que la méthode DMM modifiée a donné des résultats meilleurs que la méthode DMM pour un système de production saturé. Pour des taux de création de pièce élevés et des files d'attente petite la méthode DMM modifiée a nettement augmenté les performances du système de production d'où l'augmentation du taux de production, l'augmentation du taux de l'utilisation des machines et l'augmentation de l'utilisation du système de manutention même avec la présences de pannes.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'ordonnancement des systèmes flexibles de production et aux règles d'affectation que nous avons exposé dans le chapitre deux. En particulier nous avons étudié la méthode DMM qui est une règle très peu étudiée, développée par [Saygin et al 01] pour la sélection des routages alternatifs en temps réel dans les FMS. Notre travail consistait à améliorer la méthode DMM pour augmenter les performances des systèmes flexibles de production.

Pour cela, nous avons modélisé un système flexible de production à l'aide du logiciel ARENA. Afin d'étudier les deux méthodes nous avons fait plusieurs simulations en changeant certains critères de simulation.

Nous avons d'abord commencé par faire varier le temps d'arrivée (le taux de création) des pièces et garder la capacité des files d'attente fixes. Les résultats obtenus ont montré que la méthode que nous avons proposée, a donné de meilleures performances pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines et du système de transport pour un système flexible de production saturé.

Puis nous avons fixé le temps de création des pièces et nous avons fait varier les capacités des files d'attente, les résultats obtenus après les simulations ont montré que pour un système à petite capacité de file d'attente, la méthode que nous avons proposée est plus performante.

Ensuite, nous avons simulé le système avec les deux critères de simulation déjà mentionnés, mais en ajoutant des pannes aux machines du système. Les résultats donnés après la simulation montrent que la méthode DMM modifiée présente des performances nettement meilleures que celles de la méthode DMM.

Les résultats ainsi obtenus, nous montrent que l'amélioration de la méthode DMM que nous avons proposée a nettement augmenté les performances d'un système flexible de production saturé tel que le taux de production, le taux d'utilisation des machines et le taux d'utilisation du système de manutention. En raison de la complexité des FMS, cette méthode n'a pas pu améliorer les performances concernant le temps de cycle et le taux des en-cours du système. Cela est dû au fait que le nombre de pièces qui circulent dans le système est plus élevé lors de l'utilisation de la méthode DMM modifiée.

On peut conclure que la performance des règles de priorité ou de sélection de routage tel que la DMM dépend de la configuration de l'atelier et des conditions opératoires, dans une vision

d'ordonnancement ou de sélection de routage temps réel, la performance des règles de priorité dépend aussi grandement de l'état réel de l'atelier. Ainsi nous suggérons pour une sélection de routages alternatifs en temps réel de combiner la règle DMM que nous avons proposé avec d'autres règles de priorité ou de sélectionner d'abord les règles de priorité en fonction de l'état de l'atelier réel.

Annexe A

Abréviations :

FMS	FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM
DMM	DISSIMILARITY MAXIMIZATION METHOD
MOCN	MACHINES-OUTILS À COMMANDE NUMÉRIQUE
OF	ORDRE DE FABRICATION
GPAO	GESTION DE PRODUCTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR
CODECO	CONDUITE DÉCENTRALISÉE COORDONNÉE
PFA	PRODUCTION FLOW ANALYSIS
SLCA	SINGLE LINKAGE CLUSTER ANALYSIS
ROC	RANK ORDER CLUSTERING
FIFO	FIRST IN FIRST OUT
SPT	SHORTEST PROCESSING TIME
EDD	EARLIEST DUE DATE
SRT	SHORTEST REMAINING TIME
ODD	OPERATION DUE DATE
S/OPN	LEAST SLACK PER OPERATION
SPT-T	SHORTEST PROCESSING TIME TRUNCATED
MST	MINIMUM SLACK TIME
WINQ	WORK IN QUEUE
FV	Fraiseuse Verticale
FH	Fraiseuse Horizontale
T	Tour
TP	Toupie
SC	Station de Chargement
SD	Station de Déchargement
AGV	Automated Guided Vehicle

Annexe B

Variables et symboles :

Chapitre 1 :

A_{ij} : Matrice d'incidence (machine / pièce).

a_{ij} : Les éléments de la matrice A_{ij} .

S_{ij} : Coefficients de similitude.

ME : Mesure de l'efficacité.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la pièce } i \text{ appartient à la famille de pièce } j. \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

d_{ij} : La distance (la dissimilitude) de Hamming.

F_k : Ensemble de plan d'usinage pour les pièces k , $k=1, \dots, l$.

C_j : Coût de production du plan d'usinage j .

Chapitre 2 :

C_i : Date de fin effective du job i .

r_i : Date d'arrivée du job i .

d_i : Date échéance du job i .

N_i : Nombre d'opérations initiales du job i .

ϕ : Ensemble des jobs terminés.

$n = \text{Card}(\phi)$.

F_i : Temps de cycle (Flow time).

L_i : Le retard algébrique (Lateness).

T_i : Le retard ou retard global (Tardiness).

RMST : Moyenne quadratique du retard (Root Mean Square of Tardines).

NT : Le nombre de jobs en retard.

PT : Le pourcentage de jobs en retard.

CT : Le retard conditionnel.

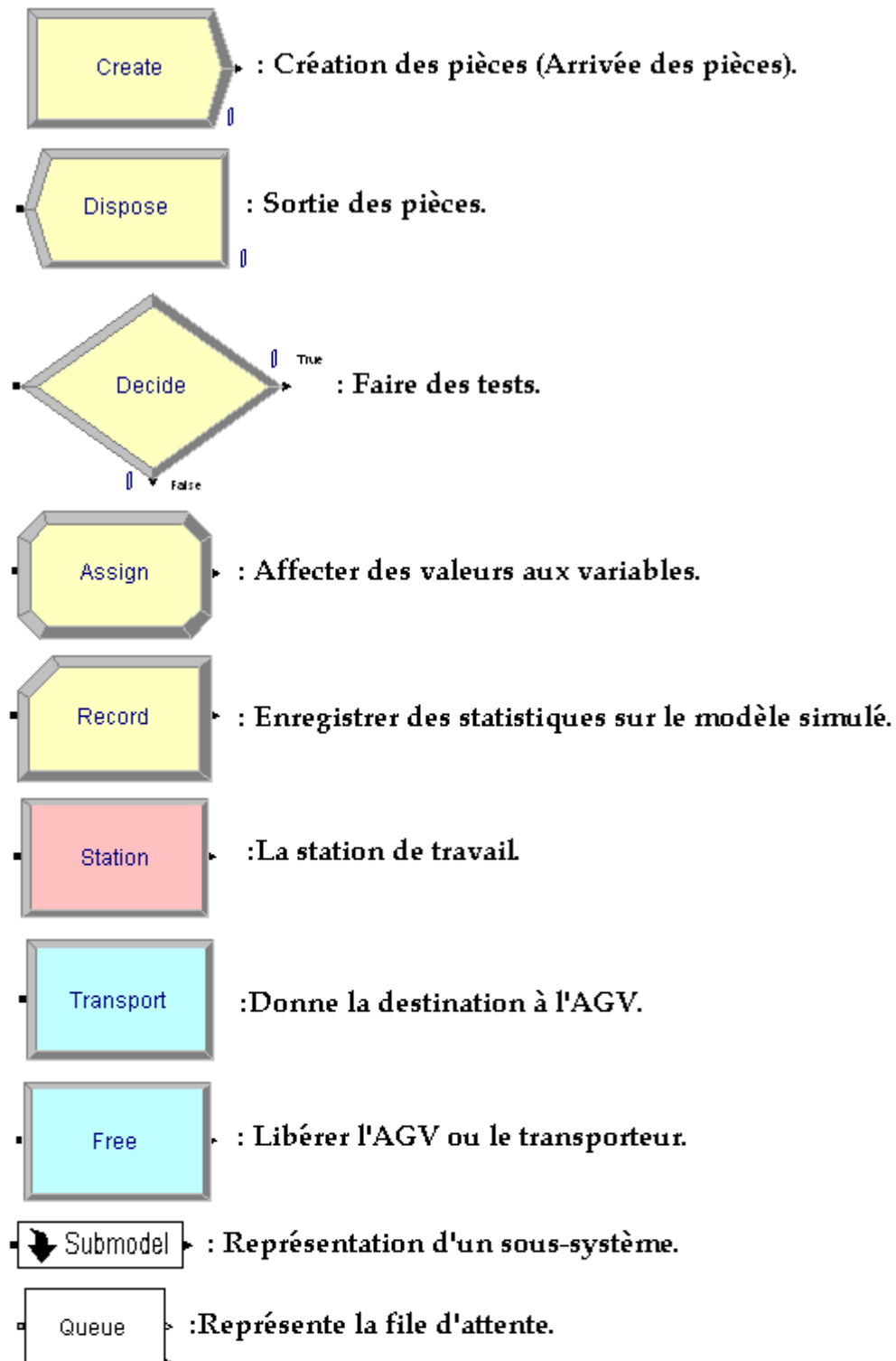
Chapitre 3 :

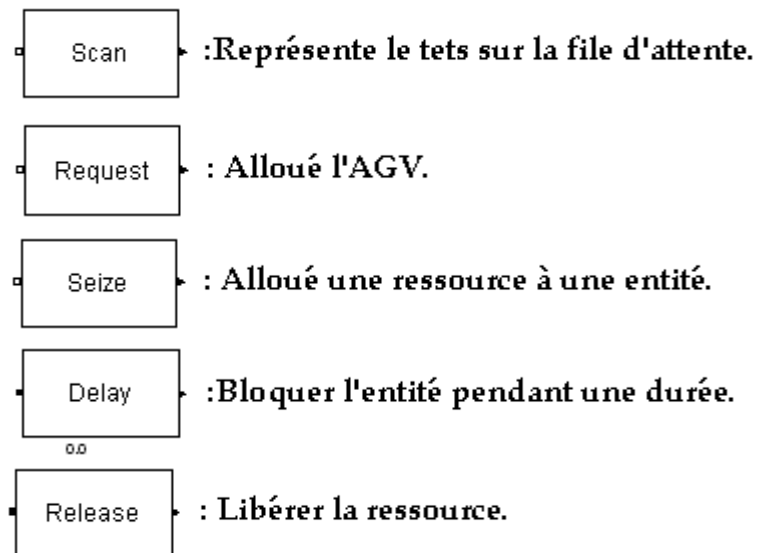
D_{ij} : Coefficient de dissimilitude entre les routages i et j .

X_j : L'état du routage (sélectionné ou non).

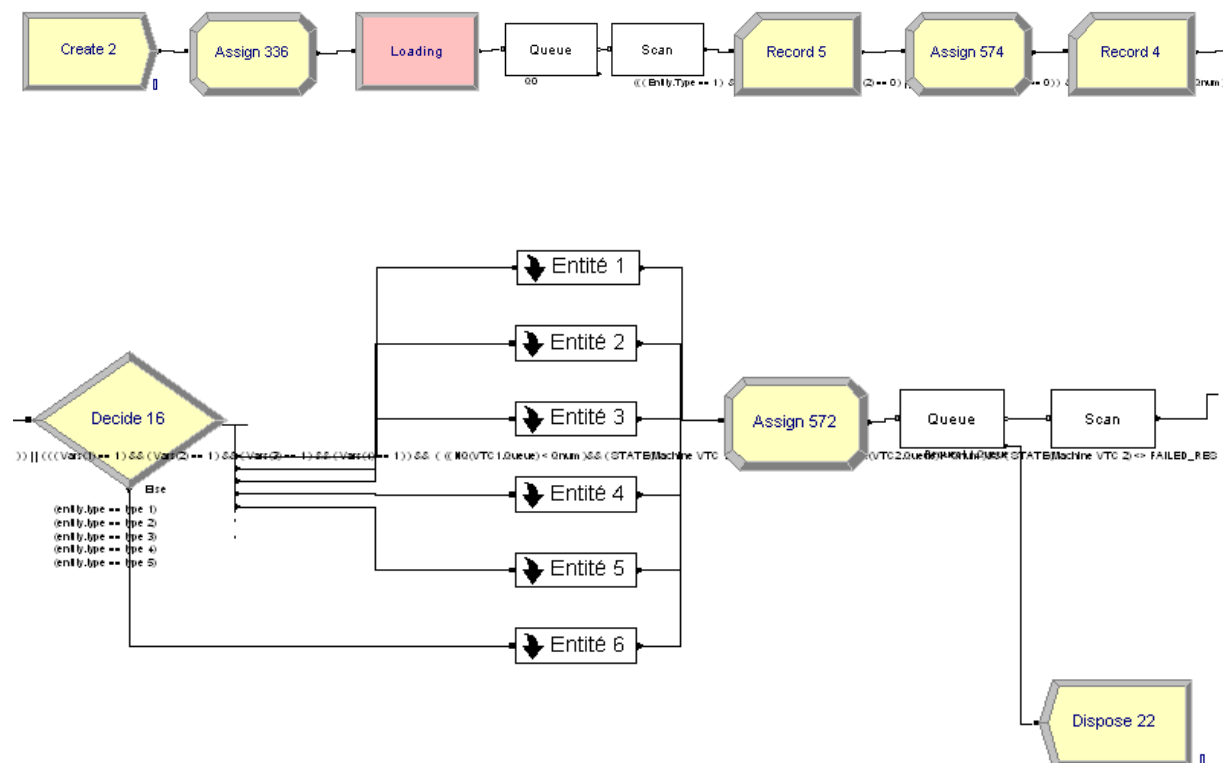
Annexe C

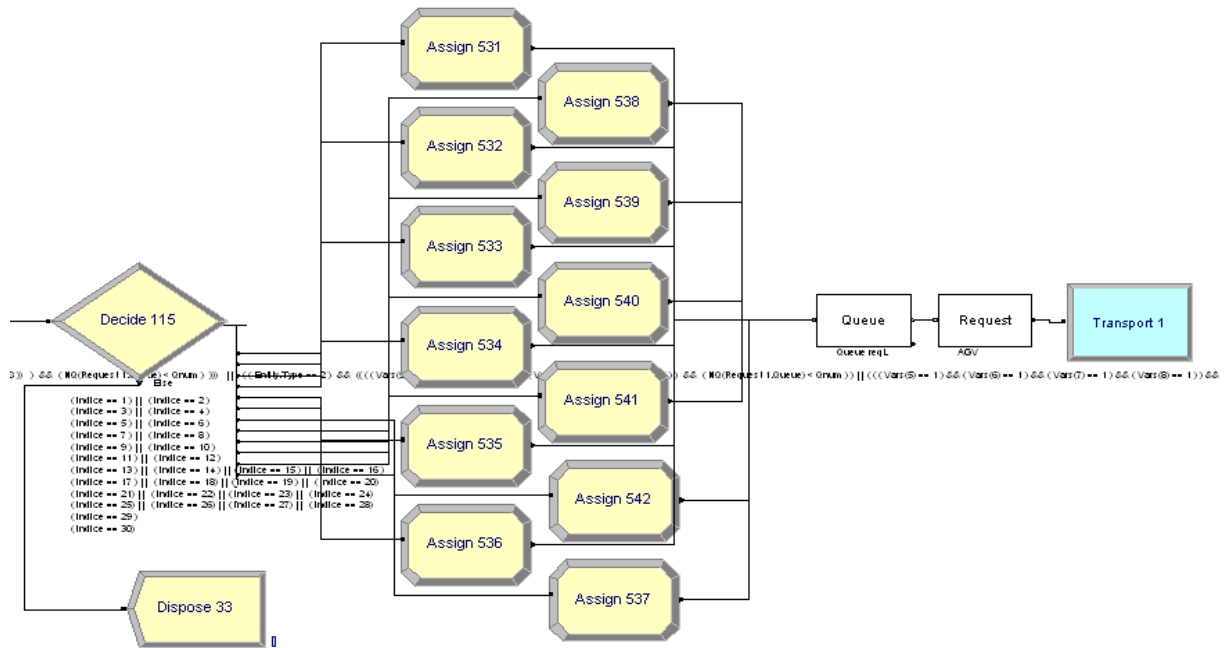
Légendes :



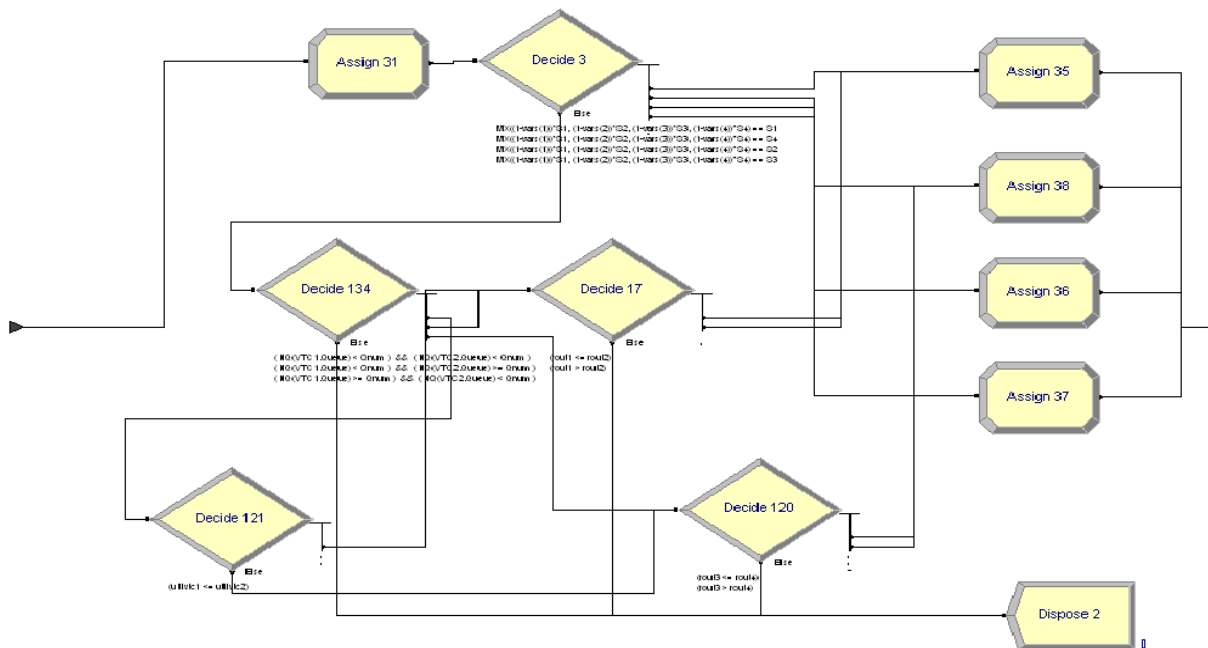


Figures :

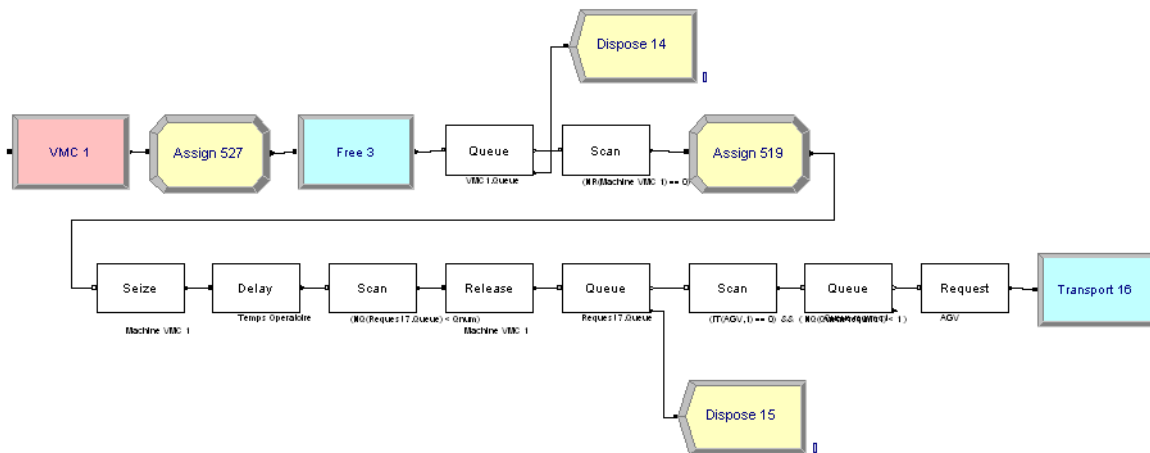




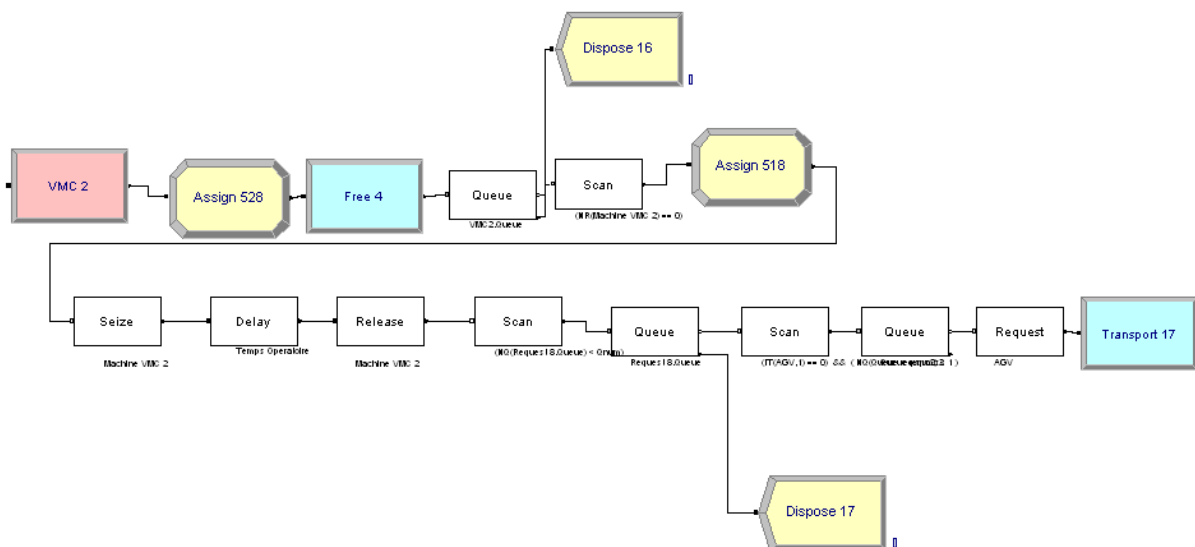
Représentation de la station de chargement.



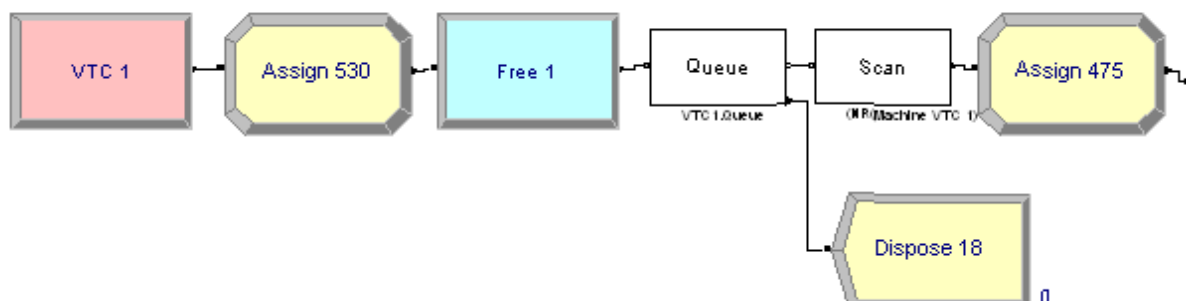
Module représentant la sélection de routage pour l'entité 1 (pièce A).

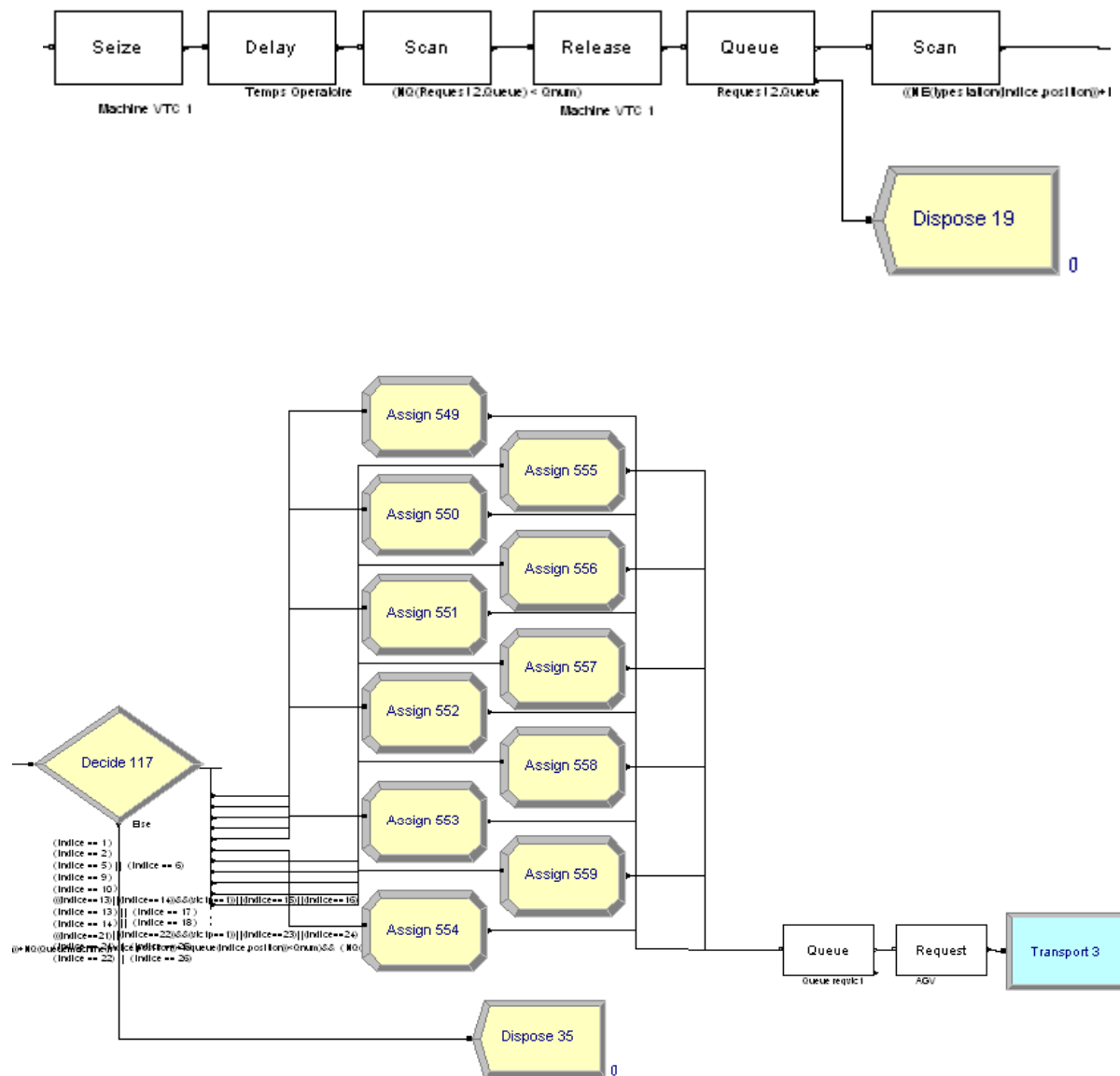


Représentation de la station FV1.

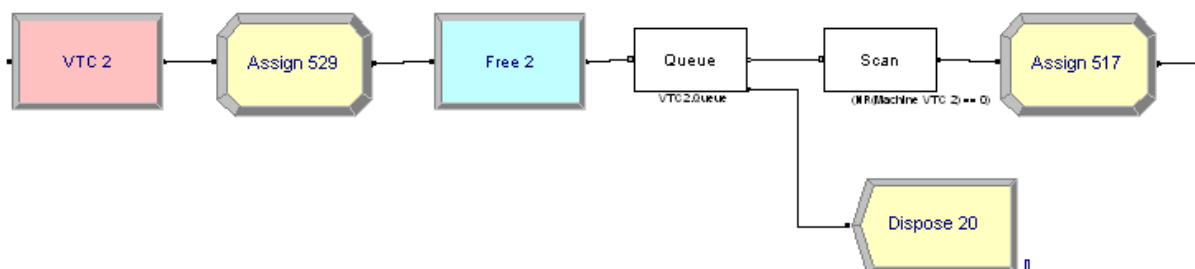


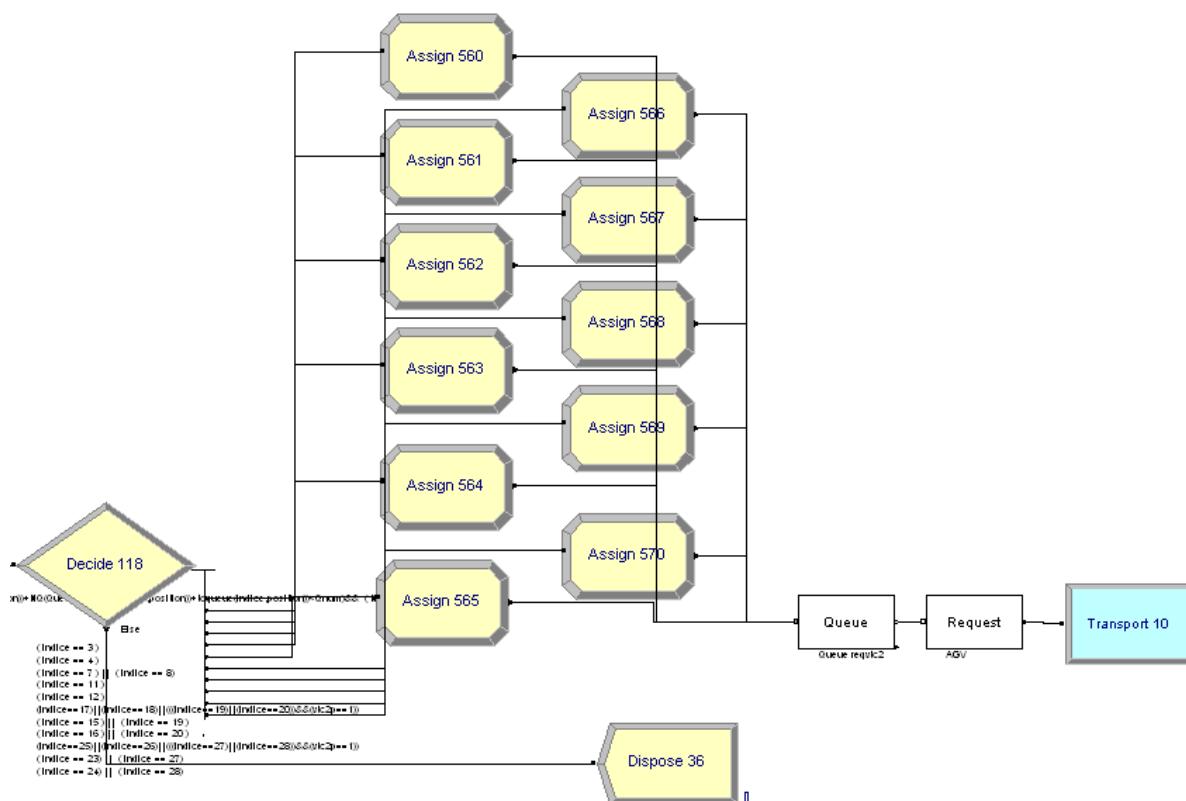
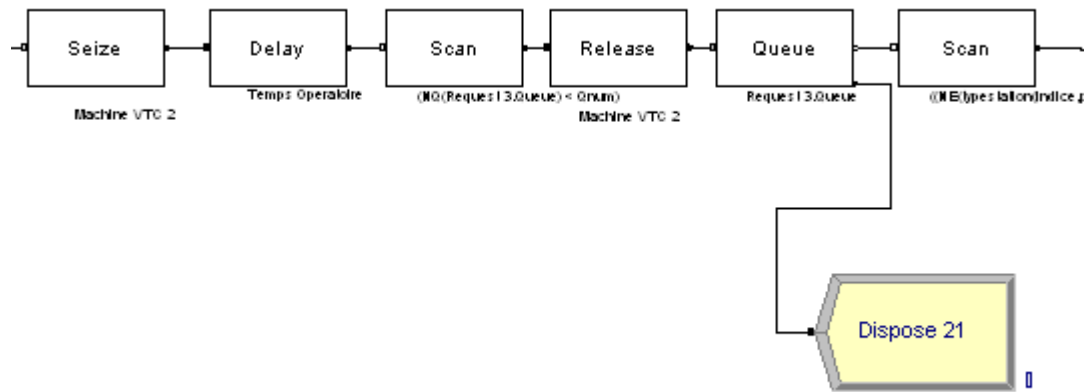
Représentation de la station FV2.



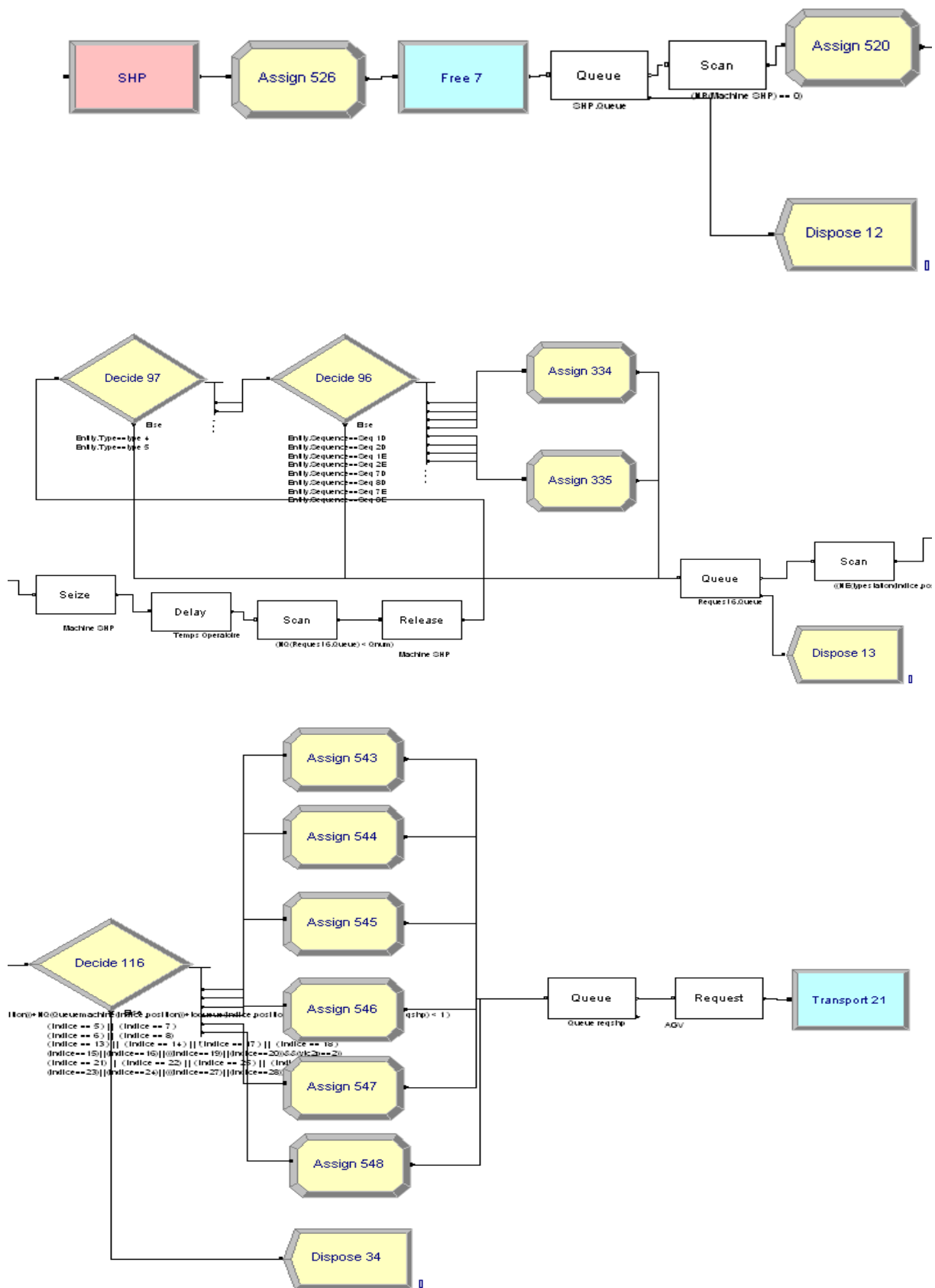


Représentation de la station T1.

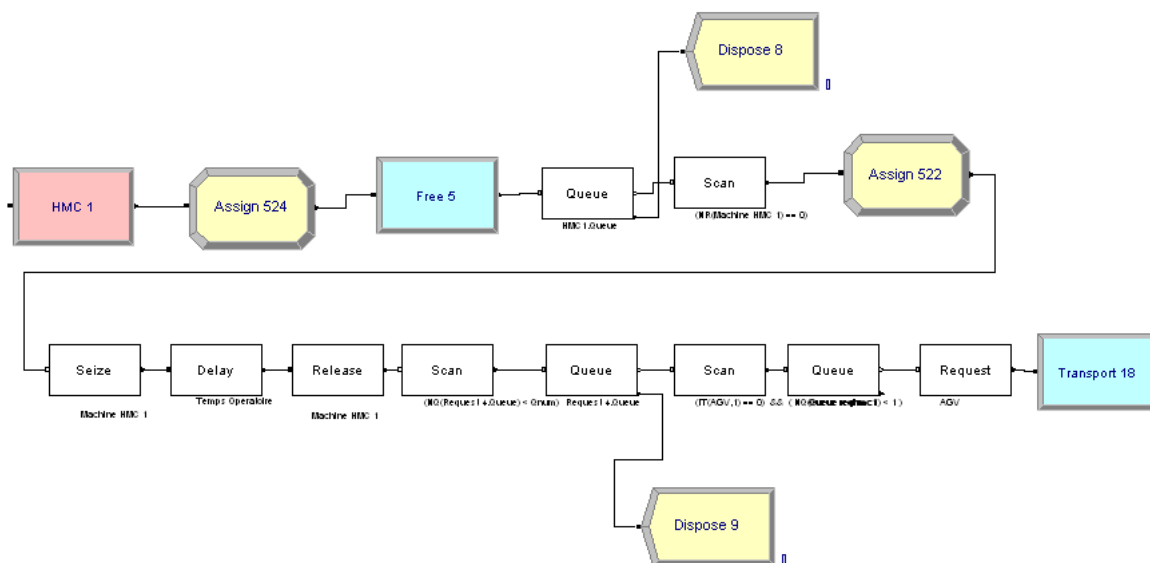




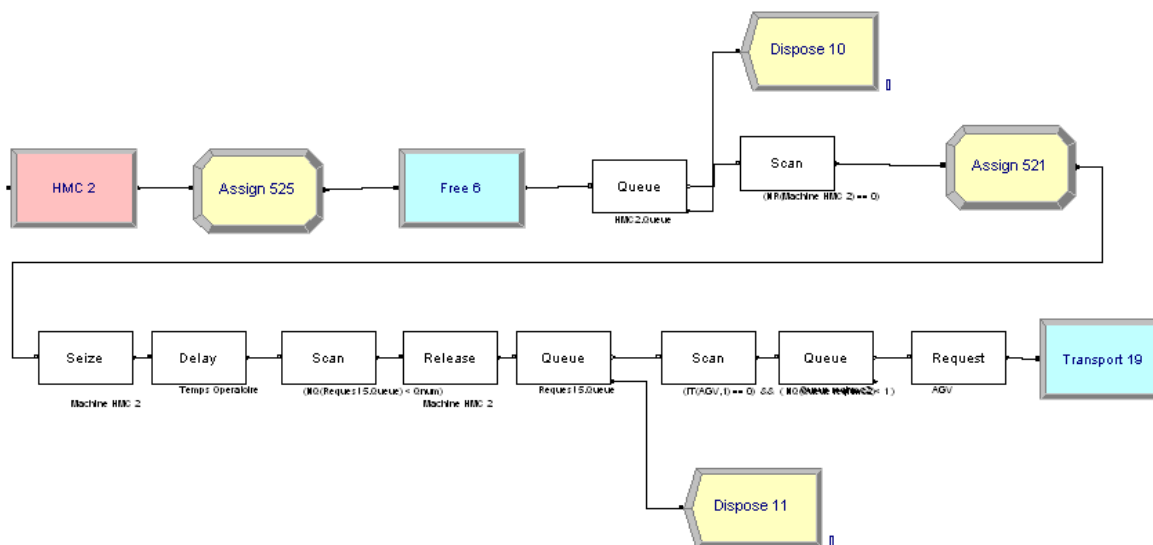
Représentation de la station T2.



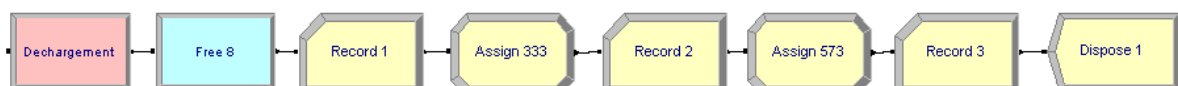
Représentation de la station TP.



Représentation de la station FH1.



Représentation de la station FH2.



Représentation de la station de déchargement.

Bibliographie

- [Abrudan 96] Abrudan I. - Systeme flexible de fabricatie - concepte de proiectare si management, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1996.
- [Adamou 97] Adamou M. - Contribution à la modélisation en vue de la conduite des systèmes flexibles d'assemblage à l'aide des réseaux de Petri orientés objet, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1997.
- [Aldanondo et Cavaillé 01] M. Aldanondo, J. B. Cavaillé, "Ordonnancement et gestion de production dans l'industrie", dans *Traité IC2 : Gestion de production*, J. Erschler, B. Grabot (Eds), Hermès, 2001, pp. 45-78.
- [Artiba et Aghezzaf 97] A. Artiba, E. H. Aghezzaf, "An architecture of a multi-model system for planning and scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.10, n°5, pp. 380-393, 1997.
- [Askin et Standridge 93] R.G. Askin and C.R.Standridge, "Modeling and Analysis of Manufacturing Systems", Jolin Wiley & sons, New york.1993.
- [Askin et Subramanian 87] R. Askin and S. Subramanian, "A cost-based heuristic for group technology configuration." *Int. J. Prod. Res.*, vol. 25, no. 1, pp. 101-114, 1987.
- [Baek et al. 99] D.C. Baek, S.Y. Oh, W.C. Yoon, "A visualized human-computer interactive approach to job shop scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.12, n°1, pp. 75-83 , 1999.
- [Baker 74] Baker, K.R., 1974, *Introduction to sequencing and scheduling*, John & Wiley.
- [Baker 84] Baker, K.R., 1984, "Sequencing rules and due-date assignments in a job-shop", *Management Science*, Vol. 30, No. 9, 1093-1104.
- [Barrett et Barman 86] Barrett, R. T. et Barman S., 1986, "A SLAM II Simulation study of a simplified flow shop", *Simulation*, Vol. 47, No. 5, Novembre 1986, 181-189.
- [Basnet et Mize 94] C. Basnet and J. H. Mize, "Scheduling and control of flexible manufacturing systems: a critical review ", *International journal of Computer Integrated Manufacturing*, 7(6), pp. 340-355, 1994.
- [Bel et Bensana 88] G. Bel, E. Bensana, D. Dubois, "Construction d'ordonnancements prévisionnels : un compromis entre approches classiques et systèmes experts", *Revue d'Automatique, Productique, Informatique Industrielle*, vol.22, n°5, 1988, pp. 509-536.
- [Bensana et Bel 88] E. Bensana, G. Bel, D. Dubois, "OPAL: a multi-knowledge based system for industrial job-shop scheduling", *International Journal of Production Research*, vol.26, n°3, 1988, pp. 795-815.

- [Bérard et al. 97] F. Bérard, C. Azzaro-Pantel, L. Pibouleau, S. Domenech, "Résolution de problèmes d'ordonnancement en génie des procédés", 2ème Congrès International Franco-Québécois, "Le génie industriel dans un monde sans frontières", Albi, France, 3-5 Septembre, 1997.
- [Bérard et al. 98] C. Bérard, B. Grabot, P. Nguyen, "Coopérations Recherche/Entreprises pour la conception de logiciels d'ordonnancement : SipaPlus, Io, TAPAS", Revue Française de Gestion Industrielle, vol.17, n°4, 1998, pp. 21-38.
- [Berrah 97] L. Berrah, "Une approche d'évaluation de la performance industrielle. Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif", Thèse de Doctorat en Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 1997.
- [Beslon 95] G. Beslon, "Contrôle sensori-moteur par réseaux neuromimétiques modulaires - Approche pour le pilotage réactif en atelier flexible - ", Thèse de Doctorat en ingénierie informatique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Novembre 1995.
- [Black 83] J. T. Black, "Cellular manufacturing systems reduce setup time, make small lot production economical," *Indust. Eng.*, Nov., pp. 3648, 1983.
- [Blackstone et al 82] Blackstone, J.H., Phillips, D.T. et Hogg, G.L., 1982, "A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations", *International Journal of Production Research*, Vol. 20, No. 1, 27-45.
- [Bonetto 87] R. Bonetto, - *Les ateliers flexibles de production* (2nd Edition) -Paris : Hermes, 1987 - 250 p.
- [Boucon 91] D. Boucon, "Ordonnancement d'atelier : Aide au choix des règles de priorité", Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Avril 1991.
- [Boukachour et al. 97] J. Boukachour, T. Galinho, J.-P. Pécuchet, "Un réseau de neurones pour bien sélectionner les heuristiques d'ordonnancement", *MOSIM 97*, 1ère Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Rouen, France, 5-6 Juin, 1997.
- [Burbidge 63] J. L. Burbidge, "Production flow analysis," *The Production Engineer*, vol. 42, no. 12, pp. 742, 1963.
- [Burbidge 71] J. L. Burbidge, « Production flow analysis », *Prod. Engineer*, pp. 139-152, Apr/May. 1971.
- [Burbidge 92] J. L. Burbidge, "Change to group technology: Process organization is obsolete," *Int. J. Production Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 1209-1219, 1992.
- [Byrne et Chutima 97] M. D. Byrne and P. Chutima, "Real-time operational control of an FMS with full routing flexibility", *International journal of Production Economics* 51, pp. 109-113, 1997.
- [Caux et al 95] Caux, C., Pierreval, H., et Portmann, M.C., "Les algorithmes génétiques et leur application aux problèmes d'ordonnancement", A paraître dans *APII*.

- [Chang et Lo 01] P.-T. Chang, Y.-T. Lo, "Modelling of job shop scheduling with multiple quantitative and qualitative objectives and a GA/TS mixture approach", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.14, n°4, 2001, pp. 367-384.
- [Cho et Wysk 95] H. Cho and R. A. Wysk, "Intelligent workstation controller for computer-integrated manufacturing : problems and models", *Journal of Manufacturing Systems*, 14(4), pp. 252-263, 1995.
- [Craye et Gentina 89] Craye, E., Gentina, J.C. - «Distributed Implementation and Hierarchical Level for Control of Flexible Manufacturing Systems » - Actes de AIPAC'89 - Vol. 2 - 1989 - p. 190-193.
- [Das et Nagendra 97] S. K. Das and P. Nagendra, "Selection of routes in a flexible manufacturing facility", *International Journal of Production Economics*, 48, pp.237-247, 1997.
- [Davis 91] L. Davis, *Handbook of genetic algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [Dell'Amico et Trubian 93] M. Dell'Amico, M. Trubian, "Applying Tabu Search to the job shop scheduling problem", *Annals of Operation Research*, vol., n°41, 1993, pp.
- [Draghici et al 98] G. Draghici, N. Brnzei, I. Filipas, "La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production", *Les Cahiers des Enseignements Francophones en Roumanie*, 1998.
- [Dubois et Prade 87] D. Dubois, H. Prade, *Théorie de possibilités, Applications à la représentation des connaissances en informatique*, Masson, 1987.
- [Dubois et Prade 89] D. Dubois, H. Prade, "Processing fuzzy temporal knowledge", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol.19, n°4, 1989, pp. 729-744.
- [Erschler 76] J. Erschler, "Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement", *Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier*, 1976.
- [Esquirol et Lopez 99] P. Esquirol, P. Lopez, *L'ordonnancement*, Economica, 1999.
- [Fargier 94] H. Fargier, "Problèmes de satisfaction de contraintes flexibles, application à l'ordonnancement de production", *Thèse de Doctorat en Informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse*, Juin 1994.
- [Fargier 97] H. Fargier, "Fuzzy scheduling: principles and experiments", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 655-668.
- [Farhoodi 90] 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.

- [Ferrell et al. 00] W. Ferrell Jr., J. Sale, J. Sams, M. Yellamraju, "Evaluating simple scheduling rules in a mixed shop environment", *Computers and Industrial Engineering*, vol., n°38, 2000, pp. 39-66.
- [Fortemps 97] P. Fortemps, "Jobshop scheduling with imprecise durations: a fuzzy approach", *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol.5, n°4, 1997, pp. 557-569.
- [Fox 83] M.S. Fox, "Constraint-directed search: a case study in job shop scheduling", Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, 1983.
- [Giard 94] Giard, V. - *Gestion de la Production (2nd Edition)* - Paris : Economica Eds, 1994 - 1068 p.
- [Glover 89] F. Glover, "Tabu search, part 1", *Orsa Journal on computing*, vol.1, n°3, 1989, pp. 190-206.
- [Glover 90] F. Glover, "Tabu search, part 2", *Orsa Journal on computing*, vol.2, n°1, 1990, pp. 4-32.
- [Goldberg 89] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [Gousty et Kieffer 88] Y. Gousty, J.P. Kieffer, "Une nouvelle typologie des systèmes industriels de production", *Revue française de gestion*, vol.juin-juillet-août, n°, 1988, pp. 104-112.
- [GOTHA 93] 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.
- [Grabot 98] 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.
- [Grabot et al. 97] B. Grabot, L. Geneste, A. Dupeux, "Tuning of fuzzy rules for multiobjective scheduling", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 695-703.
- [Grabot et al. 99] B. Grabot, C. Bérard, P. Nguyen, "An implementation of man-software cooperative scheduling: the IO software", *Production Planning and Control*, vol.10, n°3, 1999, pp. 238-250.
- [Gupta et al 89] Y. P. Gupta, M. C. Gupta, and C. R. Bector, "A review of scheduling rules in flexible manufacturing systems", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2, pp. 356-377, 1989.
- [Han et Ham 86] C. Han and I. Ham, "Multiobjective cluster analysis for part family formations," *J. Manufacturing Sysrs.*, vol. 5, no. 4, pp. 223-230, 1986.
- [Hatchuel et Sardas 92] Hatchuel, A., Sardas, J.C. - «Les grandes transitions contemporaines des systèmes de production, une démarche typologique » - In : De Tressac, G, Dubois, P. – *Les nouvelles rationalisations de la production* - Toulouse : Cépaduès-Editions, 1992- p. 1-24.

- [Hertz et Widmer 94] A. Hertz, M. Widmer, "La méthode Tabou appliquée aux problèmes d'ordonnancement", Journées d'étude "Ordonnancement en entreprise", Groupement de Recherche en Automatique, Bordeaux, France, 16-17 Juin, 1994.
- [Holland 75] J.M. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
- [Ishii et Muraki 96] N. Ishii and M. Muraki, "A process-variability-based on-line scheduling system in multi product batch process", *Computing in Chemical Engineering*, 20, pp. 217-234, 1996.
- [Kallel et al 85] Kallel, G., Pellet, X., Binder, Z. - «Conduite Décentralisée Coordonnée d'Atelier » - *Revue d'Automatique, de Productique et d'Informatique Industrielle (APII)* - 1985, Vol. 19, N°. 4 - p. 371-387.
- [Kamrani et Logendran 98] A. K. Kamrani and R. Logendran, "Group Technology and Cellular Manufacturing Methodologies and applications", Volume 1, Gordon and Breach Science Publishers.
- [Kazerooni et al 97] A. Kazerooni, F. T. S. Chan and K. Abhary, "A fuzzy integrated decision-making support system for scheduling of FMS using simulation", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 10 (1), pp, 27-34, 1997.
- [King 80] J. R. King, « Machine-component group formulation in production flow analysis : An approach using a rank order clustering algorithm », *Int. J. Prod. Res.*, vol. no. 2, pp. 213-232, 1980.
- [King et Nakornchai 82] J. R. King and V. Nakornchai, "Machine-component group formation in group technology: Review and extension," *Int. J. Production Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 117-133, 1982.
- [Kiran et Smith 84] Kiran, A.S., et Smith, M.S., 1984, "Simulation studies in job shop scheduling: a survey", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 8, No. 2, 46-51.
- [Kouiss et al 97] K. Kouiss, H. Pierreval and N. Mebarki, "Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling", *Journal of intelligent Manufacturing*, 8, pp. 41-47, 1997.
- [Kusiak et al 86] A. Kusiak, A. Vannelli, and K. R. Kumar, "Clustering analysis: Models and algorithms," *Contr. Cybern.*, vol. 15, no. 2, pp. 139-154, 1986.
- [Kusiak 87] A. Kusiak, "The generalized p-median problem," Working Paper 20187, Dep. Mech. Indust. Eng., Univ. of Manitoba, Winnipeg, Canada, 1987.
- [Kusiak et Heragu 87] A. Kusiak and S. S. Heragu, "Group technology," *Computers in Industry*, vol. 9, no. 2, pp. 83-91, 1987.
- [Kusiak et Chow 88] A. Kusiak and W. S. Chow, "Decomposition of Manufacturing Systems", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 5, October 1988.
- [Lashkari et al 87] R. S. Lashkari, S. P. Dutta, and G. Nadoli, "Part family formation in flexible manufacturing systems-An integer programming approach," in A. Kusiak, Ed., *Modern*

Production Management Systems. Amsterdam, The Netherlands: North Holland, 1987, pp. 627-635.

- [Lereno et al. 01] E. Loreno, B. Morello, P. Baptiste, "Système d'aide au paramétrage d'un logiciel d'ordonnancement", MOSIM 01, 3ème Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Troyes, France, 25-27 Avril, 2001.
- [Li et al. 00] Y. Li, K.F. Man, K.S. Tang, S. Kwong, W.H. Ip, "Genetic algorithm to production planning and scheduling problems for manufacturing systems", Production Planning and Control, vol.11, n°5, 2000, pp. 443-458.
- [Liu et MacCarthy 97] J. Liu and B. L. MacCarthy, "A goal MILP model for FMS scheduling ", European journal of operational research, 100, pp. 441-453, 1997.
- [Lopez et al. 92] P. Lopez, J. Erschler, P. Esquirol, "Ordonnancement de tâches sous contraintes : une approche énergétique", Revue d'Automatique, Productique, Informatique Industrielle, vol.26, n°5 6, 1992, pp. 453-481.
- [Lopez et al. 98] P. Lopez, P. Esquirol, L. Haudot, M. Sicard, "Cooperative system design in scheduling", International Journal of Production Research, vol.36, n°1, 1998, pp. 211-230.
- [Maccarthy et Liu 93] B.L. Maccarthy, J. Liu, "Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling", International Journal of Production research, vol.31, n°1, 1993, pp. 59-79.
- [Mamalis et al 95] A. G. Mamalis, I. Malagardis and E. Pachos, "On-line scheduling in metal removal processing using variable routing and control strategies", Computer Integrated Manufacturing Systems, 8, pp. 35-40, 1995.
- [McAuley 72] J. McAuley, «Machine grouping for efficient production », Prod. Engineer, pp, 53-57, Feb. 1972.
- [McCormick et al 72] W. T. McCormick, P. J. Schweitzer, and T. W. White, " Problem decomposition and data reorganization by cluster technique," Oper.Res., vol. 20, no. 5, pp. 993-1009, 1972.
- [Mebarki 95] Mebarki, N., 1995 "Une approche d'ordonnancement temps réel basée sur les règles de priorité des files d'attente", PhD thesis, Université de Claude Bernard Lyon1.
- [Mestoudjian et De crescenzo 87] Mestoudjian, J., et De Crescenzo, J., 1987, La gestion de production assistée par ordinateur, Editions de l'Usine Nouvelle.
- [Metropolis et al. 53] N.A. Metropolis, A. Rosenbluth, A. Teller, E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines", Journal of Chemistry and Physics, vol.6, n°21, 1953, pp. .
- [Mitrofanov 83] S. P. Mitrofanov, Group Technology in Industry, vols. 1 and 2, Leningrad, USSR: Mashinostroenie, (in Russian) 1983.

- [Montazeri et Van Wassenhove 90] M. Montazeri, L.N. VanWassenhove, "Analysis of scheduling rules for an FMS", *International Journal of Production Research*, vol.28, n°4, 1990, pp. 785-802.
- [Mulvey et Crowder 79] J. M. Mulvey and H. P. Crowder, "Clustering analysis: An application of Lagrangian relaxation," *Manag. Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 329-340, 1979.
- [Myers 00] K. Myers, "Planning with conflicting advice", AIPS 2000, 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling, Breckenbridge, Colorado, USA, 14-17 Avril, 2000.
- [Nof et al 79] S. Nof, M. Barash and J. Solberg, "Operational control of item flow in versatile manufacturing system", *International journal of production research*, 17, pp. 479-489, 1979.
- [Ow et Smith 88] P.S. Ow, S.F. Smith, "Viewing scheduling as an opportunistic problem solving process", *Annals of Operations Research*, vol.12, n°, 1988, pp. 85-108.
- [Panwalker et Iskander 77] S. S. Panwolker and W. Iskander, "A survey of scheduling rules", *Operations Research*, 25(1), pp. 45-61, 1977.
- [Peng et Chen 98] C. Peng, F.F. Chen, "Real-time control and scheduling of flexible manufacturing systems : a simulation based ordinal optimization approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (10), pp. 775-786, 1998.
- [Pierreval et Mebarki 97] H. Pierreval, N. Mebarki, "Dynamic selection of dispatching rules for manufacturing systems scheduling", *International Journal of Production Research*, vol.35, n°6, 1997, pp. 1575-1591.
- [Pierreval et Ralambondrainy 90] Pierreval, H. et Ralambondrainy, H., 1990, "A simulation and learning technique for generating knowledge about manufacturing systems behavior", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 41, 461-474.
- [Ponnambalam et al. 99] S.G. Ponnambalam, N. Jawahar, P. Aravindan, "A simulated annealing algorithm for job shop scheduling", *Production Planning and Control*, vol.10, n°8, 1999, pp. 767-777.
- [Ponnambalam et al. 01] S.G. Ponnambalam, P. Aravindan, S. Chandrasekaran, "Constructive and improvement flow shop heuristics: an extensive evaluation", *Production Planning and Control*, vol.12, n°4, 2001, pp. 335-344.
- [Portmann et Ghedjati 94] Portmann, M.C., et Ghedjati, F., 1994, "Méthodes approchées pour le problème d'ordonnancement avec machines non identiques en parallèles et contraintes de précedence", *Actes du Congrès Automatique Génie Informatique et Image (AGI'94)*, Poitiers, 2-3 Juin, 197-201.
- [Rachamadugu et Stecke 94] R. Rachamadugu and K. E. Stecke, "Classification and review of FMS scheduling procedures", *Production Planning and Control*, 5, pp. 2-20, 1994.
- [Ramasesh 90] Ramasesh, R., 1990, "Dynamic Job Shop Scheduling: A Survey of Simulation Research", *OMEGA*, Vol. 18, No. 1, 43-57.

- [Riane et al. 99] F. Riane, C. De Brauwer, A. Artiba, "OCEHO : un outil de comparaison et d'évaluation d'heuristiques de résolution de problèmes d'ordonnancement", *Journal Européen de Systèmes Automatisés*, vol.32, n°7 8, 1999, pp. 853-874.
- [Romanowicz et al. 97] R. Romanowicz, J. Jacot, A. Hertz, E. Verdebout, "An expert system prototype for the selection of scheduling method", *ETFA'97, 6th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Los Angeles, USA, 9-12 Septembre, 1997.
- [Russel et al 87] Russel, R.S., DAR-EL, E.M., et Taylor, B.W., 1987, "A comparative analysis of the COVERT job sequencing rule using various shop performance measures", *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 19, 1523-1540.
- [Sabuncuoglu 98] I. Sabuncuoglu, "Scheduling with neural networks: a review of literature and new research directions", *Production Planning and Control*, vol.9, n°1, 1998, pp. 2 12.
- [Sari 03] Z. Sari, "Modélisation, analyse et évaluation des performances d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel", thèse de doctorat d'état en productique, Université de Tlemcen, 2003.
- [Saygin et al 95] C. Saygin, S. E. Kilick, T. Toth and F.Erdelyi, "On scheduling approaches of flexible manufacturing systems: gap between theory and practice", *Selected paper – Postprint volume of the 3rd IFAC/IFIP/IFORS Workshop – Intelligent Manufacturing Systems 95*, Pergamon/Elsevier Science, pp. 61-66, 1995.
- [Saygin et Kilic 96] C. Saygin, S. E. Kilick, "Effect of flexible process plans on performance of flexible manufacturing systems", *proceedings of 7th International DAAM symposium*, Vienna, Austria, pp.393-394, 1996.
- [Saygin et Kilic 97] C. Saygin, S. E. Kilick, "Scheduling of flexible manufacturing system", *MicroCAD 97 Conference*, University of Miskolc, Hungary, vol. H, pp. 19-23, 1997.
- [Saygin et Kilic 99] C. Saygin and S.E. Kilic, "Integrating flexible manufacturing systems with scheduling in flexible manufacturing system", *International journal of advanced Manufacturing Technology*, 15(4), pp.268-280, 1999.
- [Saygin et al 01] C. Saygin, F.F. Chen and J. Singh, "Real-Time Manipulation of alternative Routings in Flexible Manufacturing Systems: A simulation Study", *International journal of advanced Manufacturing Technology*, 18, pp.755-763, 2001.
- [Schultz 89] Schultz, C.R., 1989, "An expediting heuristic for the shortest processing time dispatching rule", *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 1, 31-41.
- [Schwalb et Dechter 97] E. Schwalb, R. Dechter, "Processing disjunctions in temporal constraint networks", *Artificial Intelligence*, vol., n°93, 1997, pp. 29-61.
- [Shukla et Chen 96] C. S. Shukla and F. F. Chen, "The state of the art in intelligent real-time FMS control: a comprehensive survey", *Journal of intelligent Manufacturing*, 7, pp. 441-455, 1996.
- [Simon 77] H.A. Simon, *The new science of management decision*, Prentice-Hall, 1977.

- [Smith 92] S. F. Smith, "Knowledge-Based production management: approaches, results and prospects", *Production Planning and Control*, vol.3, n°4, 1992, pp. 350-380.
- [Sneath et Sokal 73] P. H. A. Sneath and R. R. Sokal, *Numerical Taxonomy*. San Francisco, CA: Freeman and Co., 1973.
- [Taillard 94] E. Taillard, "Parallel tabu search technique for the job shop scheduling problem", *Orsa Journal on Computing*, vol., n°6, 1994.
- [Türksen 97] I.B. Türksen, "Scheduling system design: three fuzzy approaches", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 669-693.
- [Vakharia 86] A. J. Vakharia, "Methods of cell formation in group technology: A framework for evaluation," *J. Op. Management*, vol. 6, no. 3, pp. 257-271, 1986.
- [Van Bael 99] P. Van Bael, "A study of rescheduling strategies and abstraction levels for a chemical process scheduling problem", *Production Planning and Control*, vol.10, n°4, 1999, pp. 359-364.
- [Wemmerlov et Hyer 86] U. Wemmerlov and N. L. Hyer, "Procedures for the part-family machine group identification problem in cellular manufacturing," *J. Op. Management*, vol. 6, no. 2, pp. 125-147, 1986.
- [Wu et Wysk 89] S. Y. D. Wu and R. A. Wysk, "An application of discrete event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing", *International journal of Production Research*, 27, pp. 1603-1623, 1989.
- [Zadeh 65] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol.8, n°, 1965, pp. 338-353.
- [Zadeh 78] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility", *Fuzzy sets and Systems*, vol., n°1, 1978, pp. 3 28.

Résumé

Les systèmes de fabrication et de production moderne offrent une grande flexibilité et des avantages divers tel que l'augmentation de la productivité, l'augmentation des ressources, la réduction des en-cours etc. Dans de tels systèmes, les décisions d'allocation et d'ordonnancement des opérations et des plans de processus sont généralement prises dynamiquement et à très court terme, en fonction de l'état du système de production, des caractéristiques du plan de production et des objectifs de production.

La manipulation et la sélection de plan de processus et des routages alternatifs utilisent plusieurs règles d'affectation. Parmi ces règles d'affectation nous avons la règle DMM (Dissimilarity Maximization Method) qui est une règle de sélection de routage alternatif en temps réel dans un FMS. Les résultats donnés par cette règle dans le cas d'un système saturé ont montré certains inconvénients comme le faible taux de production et d'utilisation des ressources.

Pour cela, nous proposons dans ce mémoire une amélioration de cette règle en se basant sur la sélection de routages en fonction de l'état des files d'attente des premières machines dans chaque routage en temps réel, toute en gardant le principe de fonctionnement de cette règle.

Cette approche a été implémentée dans un logiciel de simulation (ARENA). Sur un modèle d'atelier, les tests effectués ont montré que la méthode DMM modifiée comparée à la méthode DMM, donnait de meilleurs résultats sur certains critères de performance, tels que le taux de production et le taux d'utilisation des ressources pour un système de production saturé.